الجمهـــوريـــــة الجزائـــريـــــة الديمقـــراطيـــــة الشـعبيـــة
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التـــعلـــيـــــم العـــــالـــــــي والبـــحـــــــث العـلمـــــي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أ حمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Sécurité Industrielle et Environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle

Spécialité : Sécurité Industrielle et Environnement

Thème

Implantation Process Safety Management

Présenté et soutenu publiquement par :

BEKHTAOUI Abdelhakim & ZAFAOUI Dounia Ichrak

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Dr.CHAHMANA Safia	MCA	IMSI	**Présidente**
Dr.SEGUENI. Fouzia	MCB	IMSI	**Encadrant**
Mr.METAOUI Habib	ING HSE	AOA	**Co-encadrant**
Dr. GUETARNI Islam Hadj Mohamed	MCB	IMSI	**Examinateur**

Année 2025/2026

IMPLANTATION PROCESS SAFETY MANAGEMENT

Resumé :

Ce mémoire traite de l'implémentation du Process Safety Management (PSM) dans l'industrie pétrochimique, en se basant sur le référentiel du CCPS (20 éléments). L'étude s'appuie sur un cas pratique réalisé au sein de la société Algero-Oman Fertilizer Company (AOA). L'objectif principal est de démontrer l'importance vitale d'une bonne implémentation : Le PSM construit nos barrières de protection, et le cas pratique nous démontre comment les failles de son implémentation font céder ces barrières une à une, transformant une simple opération de maintenance en un événement majeur de perte de confinement. À travers l'analyse approfondie d'un incident de fuite d'ammoniac sur la pompe de transfert P-601, nous avons appliqué la méthode AMDEC et la modélisation en Noeud Papillon (Bow-Tie) pour évaluer l'efficacité des barrières de sécurité. Les résultats ont permis de proposer un plan d'actions correctives SMART, soulignant l'importance vitale de l'intégrité mécanique, de la rigueur des procédures de maintenance (notamment le test d'étanchéité à l'azote) et de la préparation aux urgences.

Mots clés :

Sécurité des procédés, PSM (CCPS-RBPS), Ammoniac, LOPC (Événement Tier 1), AMDEC, Nœud Papillon (Bow-Tie), Intégrité mécanique, API 682, Garniture mécanique, Indicateurs de performance, AOA, Industrie pétrochimique.

Abstract :

This thesis examines the implementation of Process Safety Management (PSM) in the petrochemical industry, based on the CCPS framework (20 elements). The study draws on a practical case conducted within the Algero-Oman Fertilizer Company (AOA). The main objective is to demonstrate the vital importance of proper implementation. PSM builds our protective barriers, and the case study shows how failures in its implementation cause these barriers to collapse one by one, turning a simple maintenance operation into a major loss-of-containment event. Through an in-depth analysis of an ammonia leak incident on transfer pump P-601, we applied the FMECA method and Bow-Tie modeling to assess the effectiveness of the safety barriers. The results led to the proposal of a SMART corrective action plan, highlighting the vital importance of mechanical integrity, rigorous maintenance procedures (in particular the nitrogen leak test), and emergency preparedness.

Keywords : Process Safety, PSM (CCPS-RBPS), Ammonia, LOPC (Tier 1 Event), FMECA, Bow-Tie, Mechanical integrity, API 682, Mechanical seal, Performance indicators, AOA, Petrochemical industry.

تطبيق إدارة سلامة العمليات

الملخص :تتناول هذه المذكرة تنفيذ إدارة سلامة العمليات (PSM) في صناعة البتروكيماويات، بالاعتماد على الإطار المرجعي لمركز السلامة الكيميائية (CCPS) (20 عنصراً). تعتمد الدراسة على حالة عملية أُجريت في الشركة الجزائرية العمانية للأسمدة (AOA).الهدف الرئيسي هو إثبات الأهمية الحيوية للتطبيق الجيد: حيث تقوم إدارة سلامة العمليات ببناء حواجز الحماية الخاصة بنا، وتوضح لنا الحالة العملية كيف تؤدي ثغرات تنفيذها إلى انهيار هذه الحواجز واحدة تلو الأخرى، مما يحول عملية صيانة بسيطة إلى حدث رئيسي لفقدان الاحتواء الأولي .(LOPC) من خلال التحليل المتعمق لحادث تسرب الأمونيا في مضخة النقلP-601 ، قمنا بتطبيق طريقة تحليل أنماط الفشل وآثاره وحرجيتها (AMDEC) ونمذجة عقدة الفراشة (Bow-Tie) لتقييم فعالية حواجز السلامة. سمحت النتائج باقتراح خطة عمل تصحيحية ذكية(SMART) ، مع تسليط الضوء على الأهمية الحيوية للسلامة الميكانيكية، وصرامة إجراءات الصيانة (خاصة اختبار التسرب بالنيتروجين)، والاستعداد لحالات الطوارئ.

الكلمات المفتاحية :سلامة العمليات، إدارة سلامة العمليات(CCPS-RBPS) ، الأمونيا، فقدان الاحتواء الأولي) حدث من المستوى الأول(LOPC ، تحليلAMDEC ، عقدة الفراشة(Bow-Tie) ، السلامة الميكانيكية، معيار682 API ، الختم الميكانيكي (Garniture mécanique)، مؤشرات الأداء، شركةAOA ، صناعة البتروكيماويات.

Remerciements

« Nous n'avons entrepris ce parcours que par la volonté d'Allah, et nous n'en avons atteint l'aboutissement que grâce à Son aide. À Lui reviennent la louange et la gratitude pour les bienfaits qu'Il nous a accordés tout au long de ce chemin. »

Au terme de ce mémoire de fin d'études portant sur le Management de la sécurité des Procédés, nous souhaitons exprimer notre profonde reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Nous adressons tout d'abord nos sincères remerciements à notre encadrante, **Mme SEGUENI Fouzia**, pour la confiance qu'elle nous a accordée, la qualité de son encadrement, sa disponibilité et ses précieux conseils. Son accompagnement a constitué un soutien essentiel tout au long de cette expérience.

Nos remerciements vont également à notre Co-encadrant, **M. METAOUI Habib**, pour son suivi attentif, ses recommandations pertinentes et son engagement constant, qui ont grandement contribué à l'avancement de ce projet.

Nous tenons à exprimer une reconnaissance particulière à **M. Abou Bakr Mimouni** pour son aide précieuse lors de la réalisation de l'étude pratique. Sa disponibilité, son professionnalisme et ses conseils avisés nous ont permis de mener à bien cette partie du travail dans les meilleures conditions. Nous remercions également **M. BOUHAFS Mohamed** et **M. TOUNSI Amine** pour leur soutien, leurs encouragements et leur accompagnement tout au long de notre stage au sein de l'AOA.

Nous exprimons notre gratitude aux membres du jury qui ont bien voulu accepter d'examiner et d'évaluer ce travail.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à l'ensemble des enseignants, professionnels et personnes qui, de près ou de loin, ont apporté leur contribution à la réussite de ce mémoire.

À toutes ces personnes, nous témoignons notre profonde gratitude et notre respect.

Dédicace

ZAFAOUI Dounia Ichrak

﴿وَآخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ﴾

تعبت وسهرت ونلت، واليوم ثمرة حصادي أهديها إلى والديّ الحبيبين، لا تُسعفني الكلمات للتعبير عن الحب والدعم غير المشروط والتضحيات التي قدمتموها من أجل نجاحي. إلى امي الحبيبة التي غمرتني بدعائها، إلى من أحمل اسمه بكل فخر، ومن حصد الأشواك عن دربي ليمهد لي طريق العلم والدي الغالي قدوتي في المثابرة والقوة، الذي آمن بي دائمًا. عسى أن تكون هذه الرسالة ثمرة إخلاصكم وفخرًا لقلوبكم

إلى روح جدي رحمة الله علية، الى كل من أحب، إلى عائلتي وأحبائي، وإلى أساتذتي الأفاضل الذين أناروا طريقي بمعرفتهم، وإلى كل من صادفتهم في طريقي وشجعوني، قريبين كانوا أم بعيدين، طوال هذه الرحلة.

أهديكم ثمرة جهدي وتخرجي تعبيراً عن شكري وامتناني

BEKHTAOUI Abdelhakim

{وَأَن لَّيْسَ لِلْإِنسَانِ إِلَّا مَا سَعَىٰ * وَأَنَّ سَعْيَهُ سَوْفَ يُرَىٰ}

أُهدي قطافَ هذا السهر الطويل، والجهدَ المضني الذي نحتُّ فصوله من عرق جبيني، إلى من وقفت كالحصن المنيع حين تهاوت الجدران، وجمعت في كفيها حنان الأمومة وحزم الأبوة..

لأمي الغالية وتاج رأسي؛ هاهو حلمكِ الذي سقيتهِ بعبق دعواتكِ يثمر

وإلى ذاك الغائب الذي لا يغيب عن قلبي، ذاك النجم الذي أفَلَ عن دنيائي وظل مضيئاً في سمائي؛ لِرُوحِ والدي الحبيب (تَغَمَّدَهُ اللهُ بِوَاسِعِ رَحْمَتِهِ..) .اليوم، وها أنا ذا أهديه لكِ.

راجياً من العليّ القدير أن يتقبل هذا العمل صلةً لبرّكم، وأن يثيبكم عني خير الجزاء._

وامتداداً لهذا العرفان، أزُفُّ بشرى هذا النجاح إلى كل من أحبّه قلبي؛ إلى رفقاء الدرب وأصدقاء الأيام، وأختصُّ بالشكر عائلتي وإخوتي، وفي مقدّمتهم شقيقة الروح واليد الرقيقة التي ما فتئت تشد أزري كلما أثقلني المسير، أختي الغالية.

وفي الختام، أتقدم بتحية إجلالٍ لمنابر العلم وصناع الأثر، أساتذتي الأجلاء، ولكل من مدّ لي يد العون؛ شكراً لكم جميعاً لأنكم كنتم جزءاً من رحلة تخرجي، وسنداً لي لأُتوَّج اليوم بهذا النجاح

Sommaire

Remerciements ..... **iv**

Dédicace ..... **v**

Sommaire ..... **vi**

Liste des figures ..... **x**

Liste des tableaux ..... **xii**

Liste des abréviations ..... **xiii**

Liste des symboles ..... **xv**

Introduction générale **1**

CHAPITRE I : Fondements de la Sécurité des Procédés et Analyse des Risques Majeurs **2**

I.1 Introduction 3

I.2 Définition synthétique : 3

I.3 Les 3 piliers du procède 3

I.4 La sécurité des procédés 4

I.5 Distinction cruciale 5

Sécurité des procédés vs Sécurité au travail 5

I.5.1 Sécurité au travail 5

I.5.2 Sécurité des procédés 5

I.6 Concepts associés 7

I.5.1 Risque 7

I.6.2 Danger 7

I.6.3 Evénement dangereux 7

I.6.3 Conséquence : 7

I.7 Typologie des accidents majeurs 7

I.7.1 La catastrophe de Seveso (1976) 7

I.7.2 La catastrophe de Bhopal 1984 9

I.7.2.1 Contexte et description de l'accident 9
I.7.2.3 Causes immédiates 10
I.7.2.5 Causes profondes et facteurs aggravants 10
I.7.2.6 Conséquences industrielles et mesures correctives 10
I.7.2.7 Alternative technologique 10
I.7.3 La catastrophe de Piper Alpha le 6 juillet 1988 11
I.7.4 L'explosion de la raffinerie BP Texas City 2005 12
I.8 Modèles de causalité des accidents 15
I.8.1 Le modèle linéaire de Heinrich L'Effet Domino 15
I.8.2 Modèle de Swiss cheese (reason) 18
I.9 Modèle de barrière de sécurité 19
I.9.1 Les nœuds papillon dans la gestion des risques 19
I.10 Indicateurs de performance en sécurité des procédés 20
I.10.1 Indicateurs avancés retardés (Leading vs legging) : 20
I.10.2 Classification selon le CCPS/API 754 21
II.11 Conclusion 25
CHAPITRE II : Le Système de Management de la Sécurité des Procédés (PSM) et ses éléments clés 26
II.1 Introduction 27
II.2 Architecture d'un système de management (PSM) 27
II.2.1 Définition de PSM 27
II.2.2 Les objectifs clés de la sécurité des procédés (PSM) 27
II.2.3 Le modèle PDCA Pour les éléments du PSM-RBPS 28
II.2.4 Les différents référentiels mondiaux 29
II.3 Les piliers du management des risques - Basé sur le CCPS [3] 31
II.3.1 Pilier 1 : S'engager pour la sécurité des processus 31
II.3.2 Comprendre les dangers et les risques 36
II.3.3 Gérer des risques (Le cœur opérationnel) : 38
II.3.4 Tirer les leçons de l'expérience 45

II.4 Conclusion 49

CHAPITRE III : Présentation de l'Entreprise AOA 50

III.1 Introduction 51

III.2 Identification de l'établissement 52

III.3 Situation géographique du complexe 53

..... 53

III.4 Fiche technique du complexe 53

III.5 Les principales zones du complexe 55

III.6 Description du processus de fabrication d'ammoniac 55

III.6.1 Unité d'ammoniac 55

III.6.2 Unité d'urée 56

III.6.3 Utilités 57

III.7 Direction HSE 61

III.8 Conclusion 62

CHAPITRE IV : Méthodologie d'implantation du système PSM au sein du complexe AOA 63

IV.1 Introduction 64

IV.2 Phase 1 : Évaluation et Diagnostic *[Assessment & Diagnosis]* 64

IV.2.1 Définition de l'évaluation : 64

IV.2.2 Analyse des écarts : 64

IV.2 Phase 2 : Préparation et Élaboration *[Preparation & Elaboration]* 64

IV.3 Phase 3 : Développement *[Development]* 66

IV.4 Phase 4 : Déploiement du système *[System Deployment]* 67

IV.5 Phase 5 : Audit et Amélioration *[Audit and Improvement]* 67

IV.6 Conclusion 70

CHAPITRE V : Application du PSM - Cas pratique - Enquête sur un incident de fuite D'ammoniac pompe P-601 71

V.1 Introduction 72

V.1.1 Préambule 72

V.1.2 Le pilier « Apprendre de l'expérience » (Learning from Experience)..... 72
V.1.3 L'élément n° 17 – « Investigation d'incidents »..... 73
V.1.4 Niveaux d'analyse..... 73
V.1.5 Principes clés de l'investigation..... 73
V.2 Contexte Opérationnel..... 73
V.2.1 Description de l'équipement étudié P-601 A/B/C..... 75
V.2.2 Système d'Étanchéité Double (Plan API 53A & 62)..... 77
V.3 Scénario d'incident : Perte de confinement d'ammoniac LOPC post-maintenance..... 79
V.3.1 Description du Scénario..... 79
V.3.2 Quantité d'ammoniac libérée..... 80
V.3.4 Paramètres de Calcul..... 80
V.3.5 Classification de l'incident selon API RP 754..... 81
V.3.6 Déroulement et limites des barrières de mitigation..... 82
V.3.7 Analyse du système de gestion de la sécurité des procédés PSM : selon les 20 éléments CCPS appliquée à l'incident..... 84
V.3.8 Analyse de la Fiabilité par la Méthode AMDEC..... 85
V.3.9 Analyse et synthèse des résultats..... 86
V.3.10 Plan de Mise en Conformité PSM et Actions de Mitigation issues de l'AMDEC..... 90
V.3.11 Nœud de papillon : Les Barrières de Prévention et de Protection pour l'Intégrité Mécanique de la Pompe P-601..... 93
V.4 Synthèse : De la théorie à la réalité opérationnelle – L'implémentation du PSM face au cas de la pompe P-601..... 94
V.4.1 Le contexte de l'étude : Une transition proactive vers le PSM au sein d'AOA..... 94
V.4.2 Le cas d'étude (Pompe P-601) : La manifestation physique d'un déficit systémique..... 94
V.4.3 L'articulation entre le cas pratique et l'implémentation du PSM..... 94
V.4.4. Conclusion de la synthèse..... 95
V.5 Conclusion..... 95
Conclusion générale..... 97
Bibliographie..... 99

Liste des figures

Figure I-1: *Systéme integré de procédé* 4
Figure I-2: Le concept des couches de protection 4
Figure I-3: process safety pyramid (adapted from ccps) 5
Figure I-4: Matrice de risques de l'intégrité – Méthodologie et analyse 6
Figure I-5: analyse causale et séquentielle de la catastrophe de piper alpha 12
Figure I-6 : L'explosion de la raffinerie BP Texas City 15
Figure I-7 : La blessure est causée par l'action de facteurs précédents 16
Figure I-8 : L'acte dangereux et le danger mécanique constituent le facteur central de la séquence accidentelle 16
Figure I-9: La suppression du facteur central rend l'action des facteurs précédents inefficace 17
Figure I-10 : Modèle du gruyère (James Reason) 18
Figure I-11: Pyramide des indicateurs de performance en sécurité des procédés selon l'API RP 754 24
Figure II-1 : modèle PDCA Pour les éléments du PSM-RBPS 29
Figure II-2: Les 14 éléments de PSM 30
Figure II-3 : Les piliers du management des risques 31
Figure II-4: échelle de la culture de la sécurité 31
Figure II-5: Codes et normes 33
Figure II-6: Les différentes sources d'acquisition de la compétence 34
Figure II-7: Cycle de gestion des connaissances et évolution de la donnée vers la sagesse 36
Figure II-8: Le processus global d'identification des dangers et d'évaluation des risques (HIRA) 37
Figure II-9: format de procédure opérationnelle 38
Figure II-10: Exemples de travaux critiques nécessitant des permis spécifiques 39
Figure II-11: procédure de haut niveau 42
Figure II-12: Séquence de la revue de sécurité de pré-démarrage (PSSR) 43
Figure II-13: Analyse systémique de l'erreur humaine : Ancienne vision vs Nouvelle vision 44
Figure II-14: Processus d'enquête sur les incidents et hiérarchisation des outils d'investigation 46
Figure II-15: pyramide de sécurité 47
Figure III-1: Enseigne à l'entrée du complexe AOA 52
Figure III-2: Vue générale complexe AOA 52
Figure III-3: Situation géographique du complexe AOA &Vue aérienne 53
Figure III-4: Les Principales zones du complexe 55

Figure III-5 : Diagramme bloc procédé d'ammoniac 56
Figure III-6: Équipements principaux du Process de fabrication d'ammoniac 56
Figure III-7 : Diagramme bloc procédé d'urée 57
Figure III-8: Direction HSE 61
Figure V-1: la section de réfrigération NH3 75
Figure V-2: Les pompes A/B/C 76
Figure V-3 : Schéma de principe de l'étanchéité de la pompe P-601 : Circuit du fluide de barrage (API 53A) et système de rinçage Quench (API 62). 78
Figure V-4 : Documentation des Procédures Opératoires Standards (SOP) de l'unité Ammoniac et exemple d'une fiche d'instruction (AOA). 79
Figure V-5 : **Photo.** Figurant la direction du nuage toxique vers le Nord selon le vent dominant 81
Figure V-6 : Pyramide de classification 82
Figure V-7: Activation manuelle de système de déluge **Figure V-8** : Détecteur fixe d'ammoniac 83
Figure V-9 : Swiss cheeses model 83
Figure V-10 : Les critères d'évaluation 86
Figure V-11 : Les Modes de défaillance sur la pompe selon mechanical seal6423MM311-01-6031007_Rev02_01 89

Liste des tableaux

Tableau I-1 Tableau comparatif entre la Sécurité au Travail et la Sécurité des Procédés.....6
Tableau I-2 : Types d'indicateurs avancés et retardés 21
Tableau I-3: Seuils de classification des événements de Tier 1 22
Tableau I-4 : Seuils de classification des événements de Tier 2 23
Tableau I-5: Synthèse des indicateurs de performance (Tier 1 à 4) 24
Tableau IV-1 : Les formation 65
Tableau IV-2 : Répartition des procédures du système PSM par niveau [Tier 1 et Tier 2] 66
Tableau IV-3 : Planning du projet 67
Tableau V-1 : Fiche technique simplifiée (Ebara).....77
Tableau V-2 : les éléments CCPS appliquée à l'incident 84
Tableau V-3 : Méthode AMDEC.....87
Tableau V-4 : Mise en Conformité PSM et Actions de Mitigation issues de l'AMDEC 90

Liste des abréviations

A

- **ACA** : Apparent Cause Analysis (Analyse des causes apparentes)
- **AMDEC** : Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
- **AOA** : Algero-Oman Fertilizer Company
- **API** : American Petroleum Institute
- **ARI** : Appareil Respiratoire Isolant

C

- **CCPS** : Center for Chemical Process Safety
- **CCR** : Central Control Room (Salle de contrôle centrale)
- **CFR** : Code of Federal Regulations
- **CO2** : Dioxyde de carbone
- **CSB** : Chemical Safety Board

E - G

- **EDG** : Emergency Diesel Generator (Générateur diesel de secours)
- **EPI** : Équipements de Protection Individuelle
- **GTG** : Gaz Turbine Generator (Générateur à turbine à gaz)

H

- **HAZOP** : Hazard and Operability Study (Analyse des risques liés aux procédés)
- **HIRA** : Hazard Identification and Risk Assessment
- **HSE** : Hygiène, Sécurité et Environnement

I - K

- **IMSI** : Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle
- **IPR** : Indice de Priorisation de Risque
- **KPI** : Key Performance Indicator (Indicateur clé de performance)

L

- **LG** : Level Gauge (Indicateur de niveau)
- **LOPC** : Loss of Primary Containment (Perte de confinement primaire)
- **LSL / LSLL** : Level Switch Low / Level Switch Low Low (Détecteur de niveau bas / très bas)

M

- **MOC** : Management of Change (Gestion du changement)
- **MTTF** : Mean Time To Failure (Temps moyen jusqu'à la première défaillance)

N - O

- **NH3** : Ammoniac
- **OSHA** : Occupational Safety and Health Administration

P

- **PDCA** : Plan-Do-Check-Act (Roue de Deming)
- **PHA** : Process Hazard Analysis (Analyse des risques des procédés)
- **PSI** : Process Safety Information (Informations sur la sécurité des procédés)
- **PSM** : Process Safety Management (Système de Management de la Sécurité des Procédés)
- **PSSR** : Pre-Startup Safety Review (Revue de sécurité de pré-démarrage)
- **PT / PIT** : Pressure Transmitter / Pressure Indicator Transmitter (Transmetteur de pression)

R - S

- **RBPS** : Risk Based Process Safety (Sécurité des procédés basée sur les risques)
- **RCA** : Root Cause Analysis (Analyse des causes racines)
- **RTO** : Région Transport Ouest
- **SIS** : Safety Instrumented System (Système instrumenté de sécurité / d'arrêt d'urgence)
- **SOP** : Standard Operating Procedure (Procédure opératoire standard)
- **SST** : Santé et Sécurité au Travail

T

- **TCP / TCDD** : Trichlorophénol / Tétrachlorodibenzo-p-dioxine (Dioxine)
- **TF / TG** : Taux de Fréquence / Taux de Gravité
- **TIH** : Toxic Inhalation Hazard (Danger d'inhalation toxique)

Liste des symboles

A: Surface de la brèche ou de l'orifice [m^2]

Cd: Coefficient de décharge

G: Gravité de l'événement

P: Probabilité d'occurrence / Pression [kg/cm^2 ou Pa]

ΔP: Différentiel de pression

Qm: Débit massique [kg/s]

R: Risque

T: Température [°C]

λ: Taux de défaillance [défaillance/h]

μ: Taux de réparation [réparation/h]

ρ: Masse volumique du fluide [kg/m^3]

Introduction générale

L'industrie chimique et pétrochimique manipule quotidiennement des substances hautement dangereuses, nécessitant une maîtrise absolue des risques pour prévenir les catastrophes. L'histoire industrielle a amplement démontré que la sécurité classique au travail ne suffit pas à protéger les installations, l'environnement et les populations environnantes. C'est dans cette optique que la Sécurité des Procédés (Process Safety Management - PSM) s'est imposée comme une discipline indispensable, offrant une approche systémique globale pour garantir l'intégrité des opérations complexes.

Dans le cadre de notre formation, ce projet de fin d'études se penche sur l'implémentation opérationnelle du PSM au sein d'un environnement à haut risque. Notre étude s'appuie sur un stage pratique effectué à la société Algero-Oman Fertilizer Company (AOA), un complexe majeur de production d'ammoniac et d'urée.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail de recherche, qui s'articule autour de la problématique centrale suivante : Comment évaluer l'efficacité de l'implantation structurée selon les 5 phases au sein d'AOA (la méthode d'implantation par AIE), et quels sont les points à améliorer que l'on peut découvrir et corriger à travers un cas pratique ?

Pour répondre à cette problématique, notre démarche s'appuie sur une évaluation concrète sur le terrain. Nous avons effectué ce cas pratique afin d'évaluer l'efficacité réelle de l'implantation par AIE, d'identifier les défaillances potentielles et de découvrir les points d'amélioration nécessaires pour optimiser le système. Pour mener à bien cette analyse, ce travail est structuré en cinq chapitres complémentaires :

» Le Chapitre I aborde les définitions fondamentales de la sécurité des procédés, l'historique des accidents majeurs et les modèles de causalité.

» Le Chapitre II détaille le Système de Management de la Sécurité des Procédés (PSM), en se focalisant sur les 20 éléments clés du modèle CCPS.

» Le Chapitre III est consacré à la présentation détaillée de l'entreprise d'accueil, AOA, et de ses procédés techniques de fabrication d'engrais.

» Le Chapitre IV propose la méthodologie stratégique pour le déploiement opérationnel du PSM structurée en cinq phases (Évaluation, Préparation, Développement, Déploiement et Audit).

» Le Chapitre V illustre la mise en œuvre opérationnelle à travers un cas pratique réel : l'investigation détaillée d'un incident de fuite d'ammoniac sur la pompe de transfert P-601. Ce chapitre utilise l'AMDEC et le Nœud Papillon pour concevoir un plan de mitigation robuste et mettre en évidence les points à améliorer.

CHAPITRE I : Fondements de la Sécurité des Procédés et Analyse des Risques Majeurs

I.1 Introduction

L'évaluation et la maîtrise des risques industriels exigent avant tout une compréhension claire des concepts fondamentaux qui régissent les systèmes complexes. Ce premier chapitre est consacré à la présentation des généralités de la sécurité des procédés, en établissant une distinction fondamentale avec la sécurité au travail. Nous examinerons la typologie des accidents majeurs qui ont radicalement transformé les réglementations mondiales (Seveso, Bhopal, Piper Alpha et Texas City) et explorerons les différents modèles de causalité, allant du modèle linéaire de Heinrich au modèle en plaques de Swiss Cheese de Reason. Enfin, nous introduirons la notion d'indicateurs de performance (Leading et Lagging), essentiels pour diagnostiquer préventivement l'état des barrières de sécurité.

Un procédé n'est pas seulement une machine ou une réaction chimique isolée c'est un système intégré.

I.2 Définition synthétique :

Un procédé est un ensemble organisé d'équipements, de substances chimiques, de systèmes de contrôle et de procédures humaines, combinés pour réaliser une transformation physique ou chimique de la matière (fabrication, manipulation, stockage ou transport).

I.3 Les 3 piliers du procède

- **La Chimie et la Physique :** Les réactions de transformation (synthèse, craquage, mélange) et les états de la matière (gaz, liquide, solide) sous certaines conditions de pression (P) et de température (T).
- **Le Matériel (Haardware) :** L'ensemble des équipements statiques (colonnes, réservoirs, tuyauteries) et rotatifs (pompes, compresseurs) conçus pour contenir les substances.
- **Le Système de Contrôle et l'Humain :** Les instruments de mesure, les automates de sécurité et les opérateurs qui pilotent l'ensemble via des modes opératoires.

En résumé Le procédé est le "contenant" et le "contenu" travaillant ensemble pour transformer une matière première en produit fini.[1], [2]

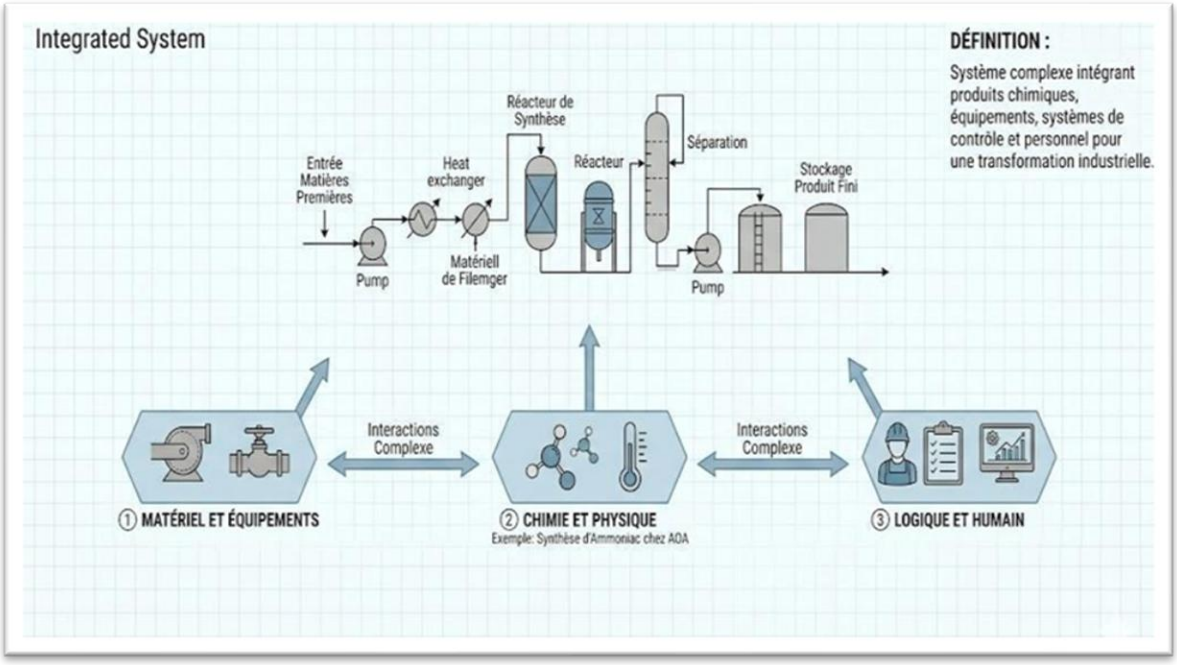


Figure I-1: *Systéme integré de procédé*

I.4 La sécurité des procédés

La sécurité des procédés est un cadre discipliné pour la gestion de l'intégrité des systèmes d'exploitation et des processus manipulant des substances dangereuses, en appliquant des principes de conception, d'ingénierie et de maintenance pour prévenir les rejets accidentels, les incendies et les explosions.[3], [4]

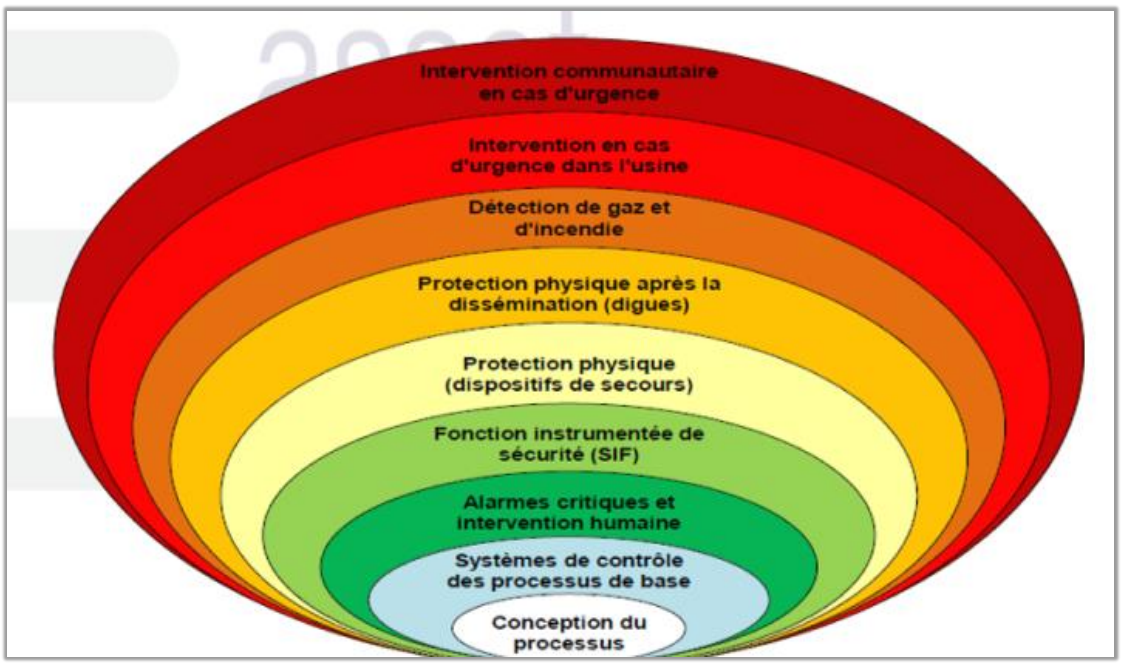


Figure I-2*: Le concept des couches de protection*

I.5 Distinction cruciale

Sécurité des procédés vs Sécurité au travail

I.5.1 Sécurité au travail

La sécurité du personnel se concentre sur les éléments susceptibles de causer des blessures ou des dommages à une personne. Les risques liés à la sécurité du personnel entraînent des événements fréquents et peu graves tels que les glissades, les trébuchements et les chutes.[4]

I.5.2 Sécurité des procédés

Vise à prévenir les incidents impliquant des fuites, des déversements, des incendies ou des explosions en veillant à ce que les installations soient bien conçues, exploitées en toute sécurité et correctement entretenues. Elle consiste notamment à s'assurer que les installations sont correctement conçues et construites, avec des systèmes en place pour surveiller et contrôler les risques. La sécurité des procédés peut également être considérée comme le résultat d'un large éventail de systèmes techniques, de gestion et opérationnels fonctionnant ensemble pour atteindre le résultat souhaité. Lorsque le résultat souhaité n'est pas atteint, un incident de sécurité des procédés se produit.[4]

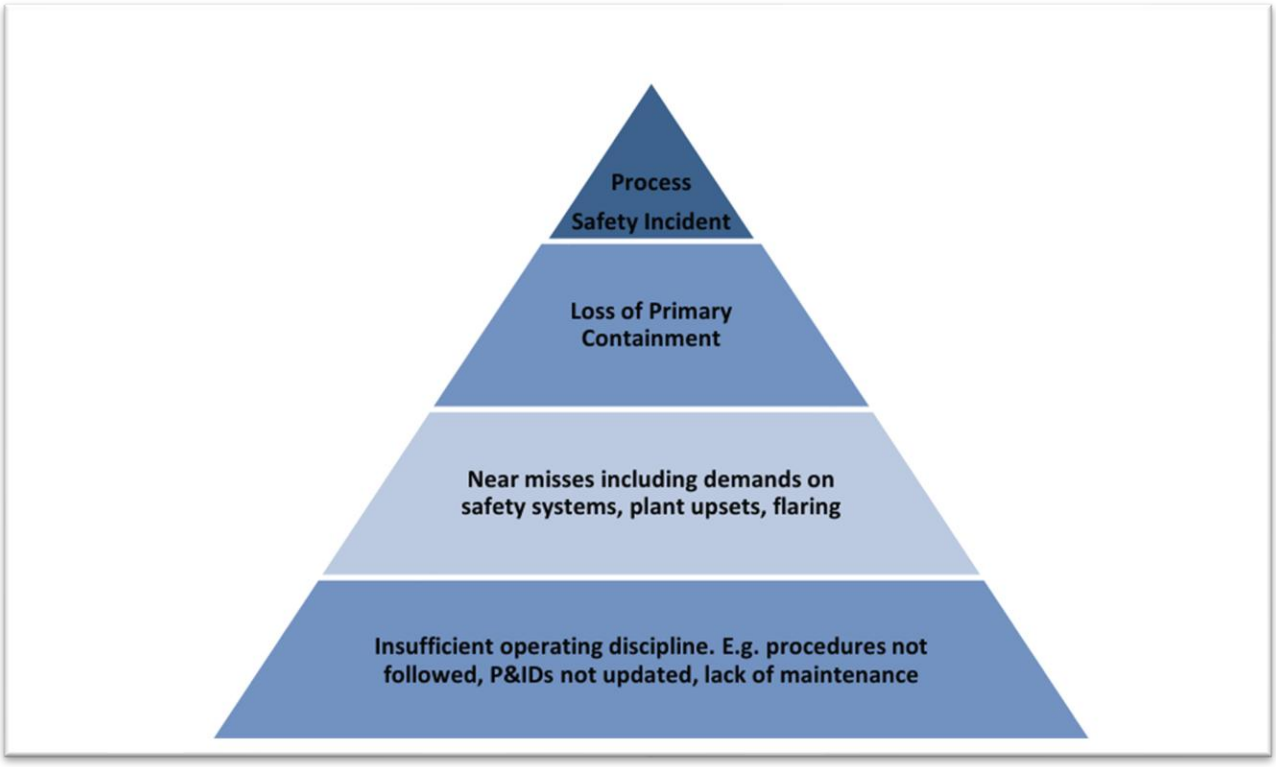


***Figure I-3**: process safety pyramid (adapted from ccps)*

Tableau I-1 *Tableau comparatif entre la Sécurité au Travail et la Sécurité des Procédés*

Caractéristique	**Sécurité au Travail (Occupational)**	**Sécurité des Procédés (Process)**
Cible	L'individu (l'opérateur).	L'installation et l'environnement.
Type d'accident	Chutes, coupures, brûlures, glissades.	Fuites toxiques, explosions, incendie (libération d'énergie)
Fréquence	Élevée (arrive souvent).	Très faible (rare).
Gravité	Limitée (souvent un seul blessé).	Catastrophique (multiples décès, dégâts majeurs).
Indicateur clé	Taux de fréquence (TF). Taux de gravité (TG)	Intégrité des barrières et Tier 1/2.

On retrouve cette opposition sur la figure I.4 où une matrice probabilité/gravité distingue clairement les deux types de risques.



Figure I-4*: Matrice de risques de l'intégrité – Méthodologie et analyse*

I.6 Concepts associés

I.5.1 Risque

Elément caractérisant la survenue du dommage potentiel lié à une situation de danger. Il est habituellement défini par deux éléments : la probabilité de survenance du dommage et la gravité des conséquences (R = P× G).[5]

I.6.2 Danger

Une propriété intrinsèque d'une substance, d'un agent, d'une source d'énergie ou d'une situation qui peut provoquer des dommages pour les personnes, les biens et l'environnement.[5]

I.6.3 Evénement dangereux

Un événement qui expose les personnes, les biens ou l'environnement à un danger ou à une source potentielle de préjudice.

Événement occurrence ou changement d'un ensemble particulier de circonstances

- Note 1 à l'article : Un événement peut être unique ou se reproduire et peut avoir plusieurs causes et plusieurs conséquences.
- Note 2 à l'article : Un événement peut être quelque chose qui est attendu, mais qui ne se produit pas, ou quelque chose auquel on ne s'attend pas, mais qui se produit.
- Note 3 à l'article : Un événement peut être une source de risque. [6]

I.6.3 Conséquence :

La conséquence est la mesure de l'ampleur des effets dommageables résultant de la matérialisation d'un phénomène dangereux (perte de confinement de matière ou d'énergie). Elle représente l'impact réel ou potentiel d'un événement accidentel sur différentes cibles, notamment l'homme, l'environnement, les actifs matériels et l'image de l'organisation.

Accident majeur : Un événement dangereux qui peut entraîner de nombreux décès, des dommages importants aux actifs ou un impact environnemental à grande échelle.[1], [3]

I.7 Typologie des accidents majeurs

I.7.1 La catastrophe de Seveso (1976)

I.7.1.1 Contexte et installation

- **Le site :** L'événement s'est produit à l'usine chimique ICMESA (appartenant à la société Givaudane), située à Meda, en bordure de Seveso, une commune italienne de 17 000 habitants au nord de Milan.
- **La production :** L'usine fabriquait des produits chimiques intermédiaires pour l'industrie pharmaceutique, cosmétique et la fabrication d'herbicides.

- **Le procédé :** L'usine produisait notamment du TCP (trichlorophénol), obtenu par une réaction chimique nécessitant de la soude caustique et des températures contrôlées entre 150 °C et 160 °C.

I.7.1.2 Séquence des événements

- **Le 10 juillet 1976 [12h37] :** Un disque de sécurité (soupape) se rompt sur un réacteur chimique en raison d'une surpression (3 atmosphères). Le personnel de maintenance entend un sifflement et un épais nuage blanc s'échappe du toit pendant environ 20 minutes. Poussé par le vent, ce nuage contamine une trajectoire de 6 km vers le sud-est.
- **Le 11 juillet :** Les autorités locales conseillent de ne pas consommer les fruits et légumes locaux, car « certaines » substances toxiques se sont échappées.
- **Les jours suivants :** Des animaux (lapins, oiseaux) commencent à mourir et des enfants sont hospitalisés pour de graves brûlures au visage et sur le corps.
- **Du 23 au 26 juillet :** Face à la gravité de la situation et à la confirmation de la présence de dioxine, les autorités commencent l'évacuation de centaines de riverains.

I.7.1.3 Causes

- **Causes organisationnelles :** Une loi italienne obligeait les usines à s'arrêter complètement le week-end. De plus, l'entreprise ICMESA cachait ses véritables activités (production de TCP) aux autorités de régulation et contournait les questions en utilisant ses relations dans l'administration. Les employés n'étaient pas informés des risques liés aux produits qu'ils manipulaient et ne recevaient aucune formation de sécurité.
- **Causes techniques :** Pour respecter l'arrêt du week-end, le cycle de production a été interrompu sans agitation ni refroidissement. Cependant, la turbine à vapeur (qui fournissait l'énergie d'activation) a continué de fonctionner, ce qui a provoqué une surchauffe de la masse de réaction à plus de 230 °C. À cette température, la réaction est devenue exothermique, générant une surpression et libérant de la dioxine (TCDD). Enfin, le fabricant du disque de sécurité avait recommandé l'installation d'un deuxième réservoir pour récupérer les matières toxiques en cas de rupture, mais ce dispositif n'avait pas été installé.

I.7.1.4 Conséquences

- **Rejets toxiques :** Près de 3 tonnes de produits chimiques ont été rejetées dans l'air, contenant une quantité importante de dioxine (TCDD), l'une des molécules les plus toxiques.
- **Impact sanitaire :** 36 589 personnes ont été exposées directement ou indirectement. On a observé 447 cas de chloracné [graves éruptions cutanées], une augmentation des risques de cancer [5,7 % des personnes exposées, notamment cancer du sein et troubles lymphatiques] et une altération du ratio des naissances lors des 7 années suivantes [62 % de filles contre 38 % de garçons]. De nombreuses femmes enceintes ont eu recours à des avortements de masse par crainte de malformations.
- **Impact environnemental :** L'agriculture locale a été interdite et 80 000 animaux ont été abattus préventivement pour éviter la propagation de la dioxine dans la chaîne alimentaire.

I.7.1.5 Enseignements / changements réglementaires

- **Réactions immédiates :** Le gouvernement italien a débloqué 40 milliards de lires et créé deux commissions pour organiser la mise en quarantaine et la décontamination de la zone. Les directeurs techniques et de production de l'usine ont été arrêtés.
- **Changement de paradigme :** Les sources soulignent que ce désastre a marqué un tournant fondamental dans la prise de conscience écologique mondiale ; la communauté scientifique considère aujourd'hui qu'il y a un âge de l'environnement « avant et après Seveso.[7], [8]

I.7.2 La catastrophe de Bhopal 1984

I.7.2.1 Contexte et description de l'accident

Le 3 décembre 1984, à Bhopal (Madhya Pradesh, Inde), une fuite d'isocyanate de méthyle (MIC) s'est produite dans l'usine chimique d'Union Carbide, où ce composé était utilisé comme intermédiaire dans la fabrication de l'insecticide carbaryl. Le gaz toxique s'est propagé au-delà du périmètre de l'usine, provoquant l'une des pires catastrophes de l'histoire de l'industrie chimique.

I.7.2.2 Conséquences humaines

Le bilan officiel fait état de 2 153 morts, mais certaines estimations non officielles avancent des chiffres bien plus élevés. Environ 200 000 personnes ont été blessées. La majorité des victimes vivaient dans un bidonville qui s'était développé à proximité immédiate de l'usine.

I.7.2.3 Causes immédiates

La cause directe de l'accident est la contamination d'un réservoir de stockage de MIC par plusieurs tonnes d'eau et de chloroforme. Cette contamination a déclenché une réaction en chaîne exothermique, entraînant une augmentation brutale de la température et de la pression à l'intérieur du réservoir. La soupape de sécurité s'est alors ouverte, libérant des vapeurs de MIC dans l'atmosphère.

I.7.2.4 Défaillances des barrières de sécurité

Plusieurs équipements de protection, censés empêcher ou limiter le rejet, étaient hors service ou partiellement inopérants :

- Le système de réfrigération (destiné à maintenir le réservoir à basse température) était arrêté.
- Le système d'épuration (lavage des vapeurs) n'était pas immédiatement disponible.
- La torchère (combustion des vapeurs résiduelles) était hors service.
- Ces défaillances traduisent un manque d'intégrité mécanique et une absence de maintenance des barrières d'atténuation.

I.7.2.5 Causes profondes et facteurs aggravants

L'infiltration d'eau dans le réservoir pourrait être due à un sabotage. Toutefois, quel que soit le déclencheur, les conséquences auraient été bien moindres si trois conditions avaient été réunies :

- Une quantité de MIC stockée plus faible.
- L'absence de bidonville à proximité de l'usine.
- Le maintien en état de fonctionnement de tous les équipements de protection.

I.7.2.6 Conséquences industrielles et mesures correctives

À la suite de Bhopal, Union Carbide et d'autres entreprises chimiques ont réduit considérablement leurs stocks de MIC et d'intermédiaires dangereux. Un an après la catastrophe, Union Carbide annonçait une réduction de 75 % de ses stocks d'intermédiaires toxiques.

I.7.2.7 Alternative technologique

Le carbaryl (produit final) était fabriqué en deux étapes :

- Réaction du phosgène avec la méthylamine pour produire du MIC.
- Réaction du MIC avec l'alpha-naphtol.

Or, il est possible de fabriquer le même produit à partir des mêmes matières premières via un procédé alternatif qui évite la formation et le stockage de l'intermédiaire MIC, supprimant ainsi le danger à la source (principe d'innocuité intrinsèque).[9]

Remarque : Bhopal est l'accident fondateur qui a forcé les industries à créer les systèmes de management comme l'OSHA PSM ou le CCPS.

I.7.3 La catastrophe de Piper Alpha le 6 juillet 1988

I.7.3.1 Contexte et installation

Située en Mer du Nord, la plateforme Piper Alpha était un hub majeur de production de pétrole et de gaz. Elle recevait et compressait également le gaz provenant des plateformes voisines [Tartan et Claymore] pour l'envoyer vers la côte écossaise.

I.7.3.2 Séquence accidentelle Phénoménologie

- **Événement initiateur :** À 21h55, une fuite massive de condensats de gaz s'enflamme dans le module C [compression], créant une première explosion qui détruit les murs coupe-feu [non conçus pour les explosions].
- **Effet Domino :** La chaleur intense des premiers incendies a provoqué la rupture des colonnes montantes [*risers*] de gaz haute pression venant de Tartan et Claymore. Ces plateformes ont continué de pomper, transformant Piper Alpha en un **chalumeau géant**.
- **Destruction structurelle :** Vers 22h50, la structure en acier, affaiblie par une chaleur dépassant les **1 000°C**, a perdu sa capacité portante, entraînant l'effondrement total de la plateforme.

I.7.3.3 Analyse des causes selon les sources de référence

Selon le Rapport Cullen [1990] et Trevor Kletz [2009], l'accident est dû à :

- Échec du Permis de Travail : Une soupape de sécurité avait été retirée pour maintenance sur la Pompe A. L'équipe de nuit, ignorant ces travaux, a démarré la pompe. Le gaz s'est échappé par la bride ouverte.
- Conception et Maintenance : Le système de déluge (extinction automatique) était sur "manuel" pour protéger les plongeurs et n'a jamais été réactivé.
- Isolation de l'installation : L'absence de vannes d'isolement sous-marines automatiques a permis au gaz des autres plateformes d'alimenter le brasier.

I.7.3.4 Bilan et Enseignements

- **Bilan Humain :** 167 décès sur 226 personnes. La plupart ont péri par asphyxie dans le bloc vie, qui n'était pas étanche aux fumées.

- **Héritage Réglementaire :** Cet accident a imposé le concept de **"Safety Case"** (Dossier de sécurité) et a forcé la relocalisation des zones de vie loin des zones de production.[9], [10], [11]

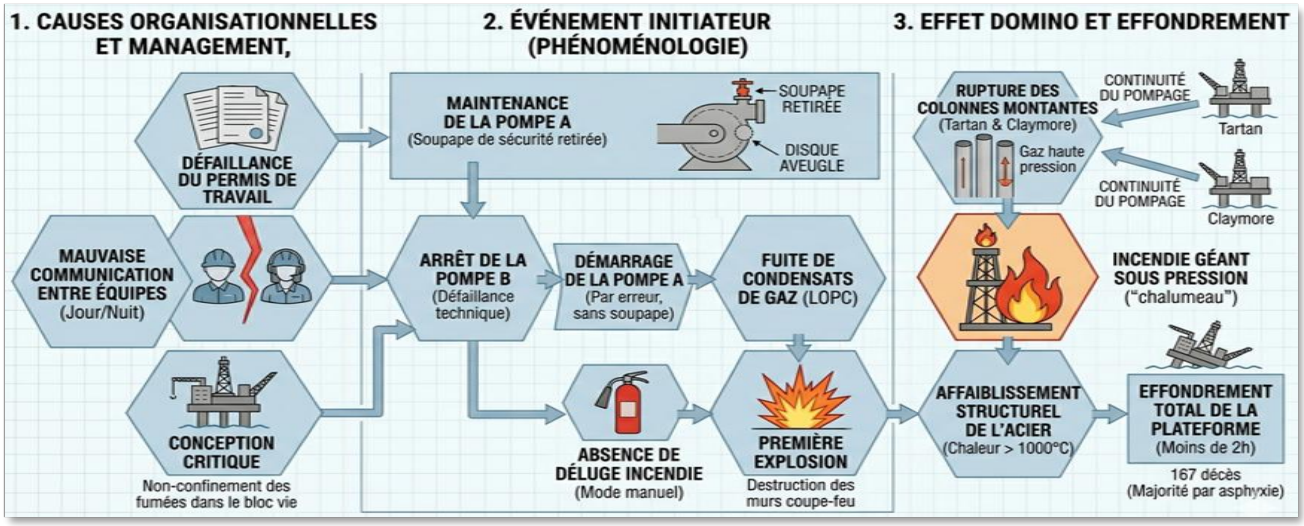


***Figure I-5**: analyse causale et séquentielle de la catastrophe de piper alpha*

I.7.4 L'explosion de la raffinerie BP Texas City 2005

I.7.4.1 Contexte et installation

- **L'installation :** La raffinerie BP de Texas City était la troisième plus grande des États-Unis, avec une capacité de traitement de 470 000 barils de pétrole par jour.
- **L'unité impliquée :** L'explosion s'est produite dans l'unité d'isomérisation, un procédé destiné à augmenter l'indice d'octane de l'essence.
- **L'équipement clé :** Le cœur du problème a été la tour de fractionnement [raffinate splitter], conçue pour séparer les composants légers et lourds de l'essence. Le liquide traité [le raffinat] est hautement inflammable.

I.7.4.2 Séquence des événements 23 mars 2005

- **Surcharge :** En raison de failles dans les procédures de démarrage et d'erreurs d'instrumentation, la tour de fractionnement a été trop remplie de liquide.
- **Surchauffe et surpression :** La tour a surchauffé et la pression a monté, ce qui a déclenché l'ouverture de la soupape de sûreté.
- **Débordement :** Les hydrocarbures se sont déversés dans le réservoir et la cheminée de purge [blowdown drum & stack].
- **Formation du nuage :** Les hydrocarbures ont débordé par le sommet de la cheminée de purge pour former une flaque au sol.

- **Explosion :** Les vapeurs inflammables ont formé un nuage qui s'est embrasé, provoquant une explosion de nuage de vapeur (VCE) massive.

I.7.4.3 Causes techniques

- Surcharge et débordement de l'unité : L'accident s'est produit dans l'unité d'isomérisation. La tour de fractionnement [raffinate splitter] a été surchargée de liquides hautement inflammables. La tour a surchauffé, la pression a monté et la soupape de sûreté s'est déclenchée, envoyant les hydrocarbures vers un réservoir de purge et sa cheminée [blowdown stack].
- Formation d'un nuage de vapeur : Les hydrocarbures ont débordé par le haut de la cheminée, formant une flaque au sol puis un nuage de vapeur qui a fini par exploser.
- Équipements obsolètes et défectueux : L'équipement directement impliqué dans l'explosion reposait sur une conception vétuste qui avait déjà été retirée de la plupart des autres raffineries et usines chimiques. De plus, des éléments clés de l'instrumentation ne fonctionnaient pas.
- Emplacement dangereux des installations : La présence de remorques de travail occupées situées à proximité immédiate de l'unité d'isomérisation a considérablement aggravé les conséquences humaines de l'explosion.

I.7.4.3 Causes humaines et organisationnelles

- Erreurs de manipulation et de procédure : L'incident a été directement amorcé par des erreurs d'instrumentation et des failles dans les procédures de démarrage de l'unité, ainsi que par diverses erreurs humaines. Les opérateurs et le personnel de maintenance souffraient par ailleurs d'une surcharge de travail et effectuaient de nombreuses heures supplémentaires.
- Réductions budgétaires et "mentalité de chéquier" : Au cours de la décennie précédant le drame, BP a privilégié la réduction des coûts et la rentabilité au détriment de la sécurité. Une coupe de 25 % dans les coûts fixes entre 1998 et 2000 a eu un impact désastreux sur la maintenance préventive et l'infrastructure, entraînant une détérioration progressive des installations.
- Faux sentiment de sécurité : La direction a confondu la "sécurité au travail" [les blessures individuelles] et la "sécurité des procédés" [les risques de catastrophes industrielles]. L'entreprise s'est félicitée d'une baisse de 70 % des blessures individuelles l'année précédant l'explosion, ce qui a généré un dangereux excès de confiance et fait oublier que des risques d'explosion majeurs persistaient.

- Culture de sécurité toxique et manque de leadership : Les enquêtes ont mis en évidence une tolérance généralisée face au non-respect des règles de sécurité de base et un faible niveau de conscience des dangers. La direction de BP, jusqu'au sommet de l'entreprise, a ignoré les nombreux signaux d'alarme et les accidents mortels survenus au cours des années précédentes. Le (PDG) et les cadres dirigeants n'ont pas su instaurer la sécurité comme une valeur fondamentale de l'entreprise.
- Mauvaise communication et dilution des responsabilités : Un système de gestion décentralisé et des changements organisationnels ont conduit à un manque de communication, à des responsabilités floues et à un environnement de travail caractérisé par la résistance au changement et le manque de confiance.

I.7.4.4 Conséquences

- **Bilan humain :** L'accident a causé la mort de 15 personnes et fait 500 blessés (bien qu'un autre rapport cite 14 morts et 170 blessés).
- **Destructions matérielles :** L'explosion a dévasté la zone, nécessitant des recherches complexes dans les décombres.
- **Sanctions financières :** En octobre 2009, l'OSHA [Occupational Safety and Health Administration] a infligé à BP **la plus forte amende de son histoire, s'élevant à 87 millions de dollars**.
- **Enseignements / changements réglementaires** L'accident a déclenché trois grandes enquêtes, dont une dirigée par le Chemical Safety Board (CSB) et une autre par un panel indépendant présidé par James Baker. Ces enquêtes ont mené à des recommandations fondamentales pour l'industrie :
- **Le leadership de la direction :** La haute direction doit établir la **sécurité des procédés comme une valeur fondamentale**, fournir un leadership efficace et s'assurer que les employés comprennent les attentes.
- **Séparation des types de sécurité :** Il est devenu impératif de cesser d'évaluer la sécurité d'une usine uniquement sur la base des accidents du travail classiques, en développant des **indicateurs de performance spécifiques à la sécurité des procédés**.
- **Renforcement de l'expertise et de l'audit :** Le panel a recommandé la création d'un système robuste de gestion de la sécurité des procédés, d'audits efficaces, et d'une meilleure formation du personnel.
- **Responsabilité :** Suite à cet événement, des actionnaires ont réclamé que les bonus des dirigeants soient directement liés aux performances de l'entreprise en matière de sécurité et d'environnement.[12], [13]



Figure I-6 *: L'explosion de la raffinerie BP Texas City*

I.8 Modèles de causalité des accidents

I.8.1 Le modèle linéaire de Heinrich L'Effet Domino

I.8.1.1 Le modèle des dominos de Heinrich sur les causes des accidents

Herbert W. Heinrich était un chercheur pionnier en matière de sécurité au travail, dont la de 1931 publication, Industriel Accident Prevention : A Scientific Approche [Heinrich 1931]

Était basée sur l'analyse d'une grande quantité de données sur les accidents recueillies par son employeur, une grande compagnie d'assurance. Ce travail, qui s'est poursuivi pendant plus de trente ans, a identifié les facteurs causaux des accidents industriels, notamment les « actes dangereux des personnes » et les « conditions mécaniques ou physiques dangereuses ».

Heinrich est surtout connu pour avoir créé le concept de la « pyramide de sécurité ». Il a également développé le « modèle des cinq dominos » sur les causes des accidents, un modèle d'accident séquentiel qui a influencé la réflexion sur la sécurité au travail. Sa « théorie des dominos » représente une séquence d'accidents comme une chaîne causale d'événements, représentée par des dominos qui tombent en réaction en chaîne. La chute du premier domino entraîne la chute du deuxième, suivie du troisième, etc.[6]

Comme illustré ci-dessous.

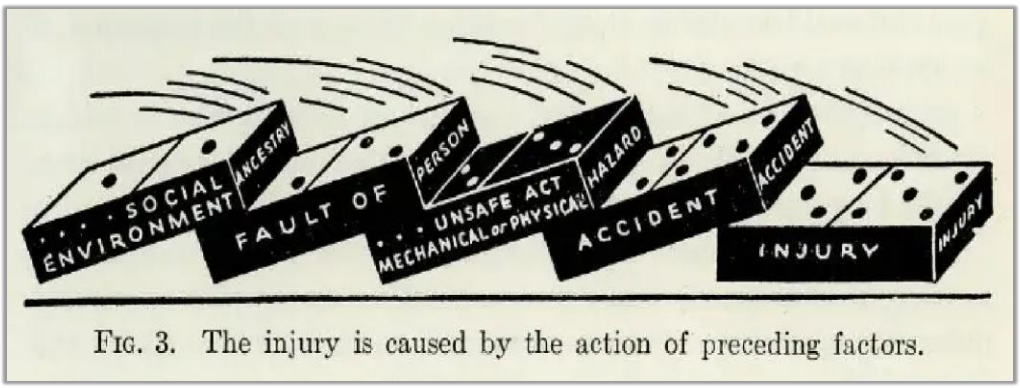


FIG. 3. The injury is caused by the action of preceding factors.

***Figure I-7** : La blessure est causée par l'action de facteurs précédents*

Le modèle domino de la causalité des accidents, tel que décrit par H. Heinrich dans l'édition de 1950 de son livre Industriel Accident Prevention : une approche scientifique Heinrich considérait la survenue d'une « blessure évitable » comme l'aboutissement d'une série d'événements formant une séquence, semblable à une rangée de dominos placés de telle sorte que la chute d'un premier domino fasse tomber le suivant, ce qui fait tomber le troisième, et ainsi de suite jusqu'à ce que toute la rangée soit renversée. Si cette séquence est interrompue par l'élimination d'un seul des nombreux facteurs qui la composent, la blessure ne se produira pas, comme illustré dans la figure ci-dessous :

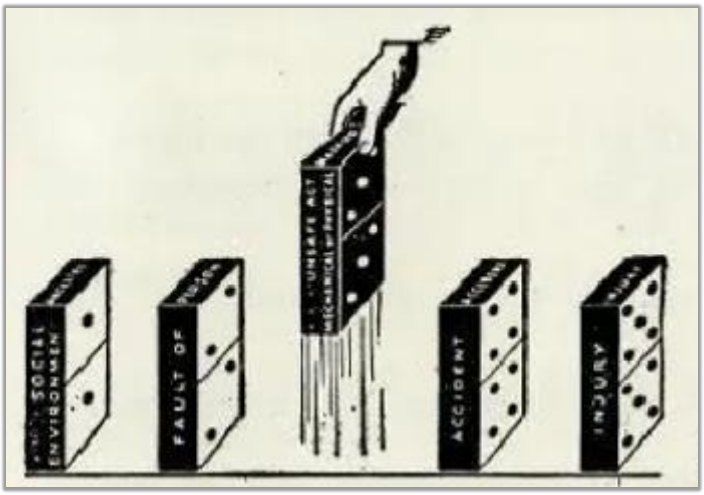


***Figure I-8** : L'acte dangereux et le danger mécanique constituent le facteur central de la séquence accidentelle*

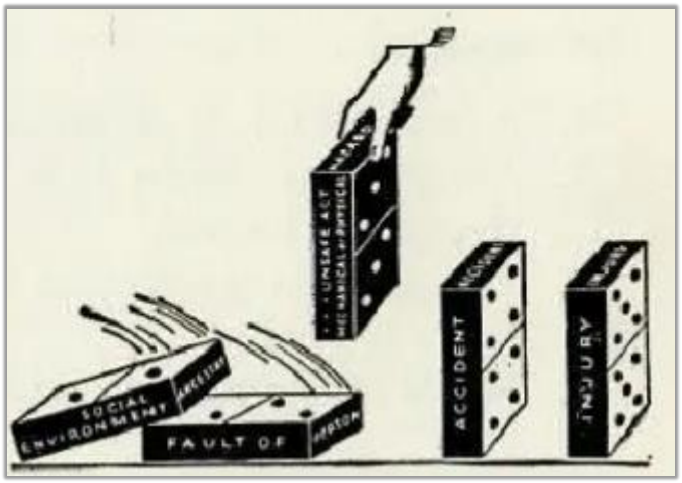


Figure I-9*: La suppression du facteur central rend l'action des facteurs précédents inefficace*

I.8.1.2 Prévention des accidents par interruption de la séquence accidentelle, extrait de l'édition de 1950 du livre industriel Accident Prevention : une approche scientifique

Dans la première version de ce modèle, publiée en 1931, les cinq facteurs identifiés étaient :

- Domino 1 : l'ascendance et l'environnement social du travailleur, qui influent sur ses compétences, ses croyances et ses « traits de caractère », et donc sur sa manière d'effectuer ses tâches.
- Domino 2 : la négligence ou les défauts personnels du travailleur, qui l'amènent à ne pas prêter suffisamment attention à la tâche (voir encadré sur la théorie de la « prédisposition aux accidents ».
- Domino 3 : un acte dangereux ou un risque mécanique/physique, tel qu'une erreur du travailleur «se tenir sous des charges suspendues, démarrer une machine sans avertissement… » ou une défaillance d'un équipement technique ou une machine insuffisamment protégée.
- Domino 4 : l'accident.
- Domino 5 : blessures ou pertes, conséquences de l'accident.

I.8.1.3 Critique

Le modèle des dominos est largement considéré aujourd'hui comme étant trop simpliste pour être un outil utile pour comprendre les facteurs causaux des accidents :

Il conduit à une vision excessivement simple de la contribution de la performance humaine aux accidents, et à se concentrer sur la formation et le respect des procédures [y compris les programmes de « sécurité comportementale »], plutôt que sur la conception du système, la charge de travail et les incitations.

Il adopte un modèle de causalité purement linéaire et mécanique, qui est inapproprié dans les systèmes complexes où les accidents sont généralement causés par de nombreux facteurs interagissant, partiellement concurrents et imprévisibles. « Les systèmes complexes tombent en panne de manière complexe » est un slogan utile.[6]

I.8.2 Modèle de Swiss cheese (reason)

Le gruyère de Reason, Modèles de causalité des accidents et nœuds papillon

James Reason [1990 et 1997] a développé l'idée du « modèle du gruyère » de défaillance du système présenté dans la figure 1-2 Ce modèle repose sur le principe de la « défense en profondeur », les tranches de fromage suisse représentant les couches protectrices [ou barrières] empêchant la réalisation des dangers et permettant ainsi aux conséquences de se manifester. Or, il est établi que les barrières ne sont jamais efficaces à 100 % et présentent chacune des faiblesses intermittentes et imprévues. Les trous dans les tranches de fromage symbolisent les facteurs de dégradation [ou baisses d'efficacité ou de fiabilité] des différentes parties du système et varient constamment en taille et en position. Pour qu'un accident majeur survienne, les trous du fromage suisse doivent s'aligner, créant ainsi une « trajectoire accidentelle » où la menace traverse tous les trous de toutes les défenses [ou barrières], entraînant une défaillance ou un accident majeur. Ce modèle montre également que la défaillance d'une barrière fragilise les barrières suivantes. Grâce à ce modèle, une stratégie de gestion des risques est efficace lorsque les barrières sont gérées de manière à garantir leur bon fonctionnement tout au long du cycle de vie de l'installation. Comparé au modèle du fromage suisse, le nœud papillon ajoute de la structure et offre une meilleure représentation des barrières associées spécifiquement à de multiples menaces et conséquences.[3], [14]

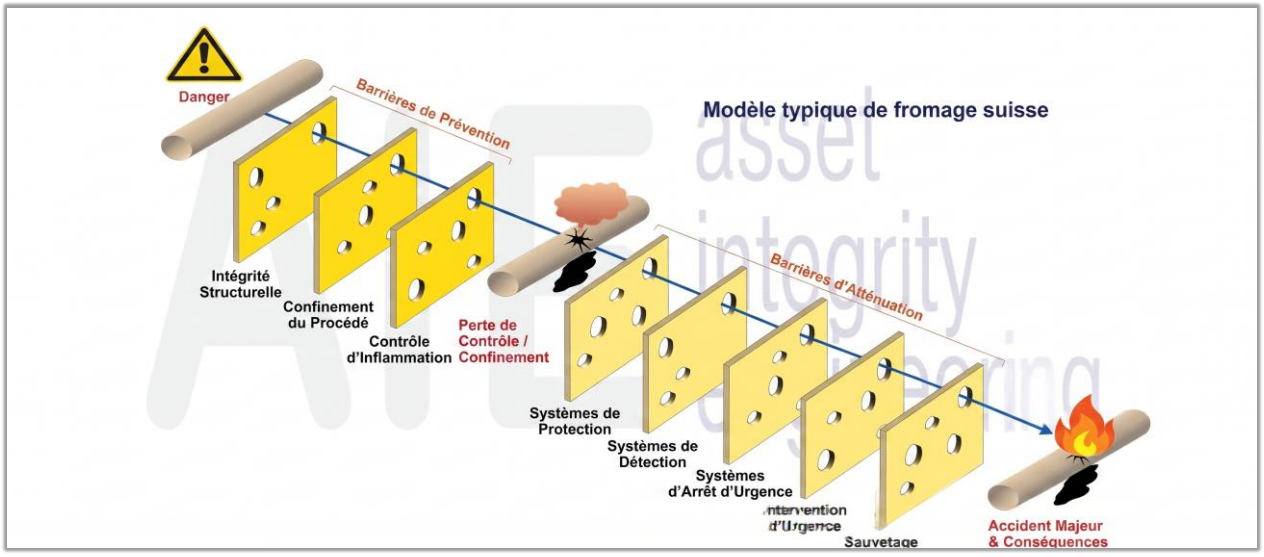


Figure I-10 *: Modèle du gruyère (James Reason)*

I.9 Modèle de barrière de sécurité

I.9.1 Les nœuds papillon dans la gestion des risques

On suppose souvent, en se basant sur la structure visuelle de la représentation, que les nœuds papillon supposent un modèle linéaire et événementiel des systèmes techniques et de leurs défaillances, c'est-à-dire un modèle linéaire de la causalité des accidents. Il est admis depuis un certain temps que ce type de modèle est inadéquat pour comprendre la dynamique des systèmes sociotechniques complexes modernes ou la manière dont ils peuvent entraîner des pertes [Leveson, 2011 ; Hollnagel, 2012], en particulier lorsqu'il existe à la fois un couplage étroit et une interaction complexe entre les éléments du système [Perrow, 1999]. Cependant, l'adoption des concepts et des structures de l'analyse en nœud papillon ne nécessite aucune hypothèse sur les mécanismes et les processus qui conduisent aux incidents [McLeod et Bowie, 2018]. Le modèle du fromage suisse de Reason apparaît linéaire dans la séquence temporelle dans laquelle les barrières fonctionnent ; le développement des trous, c'est-à-dire les mécanismes de causalité, peut cependant se dérouler par des processus linéaires ou non linéaires [Hudson, 2014]. De même, l'analyse en nœud papillon, et la compréhension des barrières, des mécanismes de défaillance et des contrôles qu'elle peut générer, est neutre par rapport à tout modèle sous-jacent de causalité des accidents.

Les nœuds papillon et le modèle présenté ici de barrières, de dégradation des barrières et de contrôle ne supposent aucun mécanisme particulier qui pourrait se trouver sur le chemin entre les menaces et les principaux événements et conséquences auxquels elles peuvent conduire. Il n'y a aucune raison pour qu'un modèle en nœud papillon ne soit pas basé sur des analyses non linéaires telles que (HAZOP) [(CCPS), 2008], STAMP [Leveson, 2011] ou FRAM [Hollnagel, 2012]. Essentiellement, plutôt que de se demander ce qui pourrait mal tourner et comment l'empêcher, l'analyse en nœud papillon se concentre sur ce qui doit bien se passer et comment l'assurer [McLeod et Bowie 2018].

I.9.2 Historique et contexte réglementaire des nœuds papillon

Il est généralement admis que la première mention de la méthode du nœud papillon est apparue dans les notes de cours d'ICI [Imperial Chemical Industries] lors d'une conférence sur l'analyse des dangers donnée à l'Université du Queensland, en Australie, en 1979, mais les circonstances et la date exactes de son origine ne sont pas tout à fait claires. Shell est reconnue comme la première grande entreprise à avoir pleinement intégré la méthode du nœud papillon dans ses pratiques commerciales, et à la fin des années 1990, cette approche était devenue une méthode courante dans de nombreuses autres entreprises.

Un important projet de recherche de l'UE, appelé ARAMIS, a étudié l'utilisation de la méthode d'évaluation des risques du nœud papillon dans le cadre de la directive Seveso II. Ce projet est décrit dans un numéro spécial du Journal of Hazardous Materials (Salvi & Debray, 2006), qui aborde

plusieurs aspects des nœuds papillon, notamment leur utilisation et leur succès en matière de communication et comme moyen d'apprentissage organisationnel Les régimes réglementaires et les normes adoptent de plus en plus le concept de barrière comme moyen de faciliter la gestion des risques pendant la phase opérationnelle et de communiquer efficacement à ce sujet. Dans les industries de transformation et pétrolières et gazières, la liste suivante fournit des exemples des principaux organismes de réglementation et de l'industrie actuels et de la manière dont ils adoptent une approche basée sur les barrières.

I.10 Indicateurs de performance en sécurité des procédés

I.10.1 Indicateurs avancés retardés (Leading vs legging) :

Les indicateurs de performance ou métriques peuvent être considérés comme avancés ou retardés. Ces deux types d'indicateurs ont leur place dans le système de mesure de la performance d'une opération et peuvent souvent être utilisés conjointement pour répondre à une exigence de performance spécifique.

Les indicateurs avancés sont des métriques orientées processus, telles que le taux de mise en œuvre ou la conformité aux politiques et procédures qui soutiennent le système de gestion de la sécurité et qui sont capables de prédire la performance.

Ils sont généralement liés aux contrôles situés à gauche d'un diagramme en nœud papillon.

Ils reflètent souvent les actions proactives entreprises par l'opérateur, telles que l'audit ou la surveillance proactive.

Les indicateurs retardés sont des métriques orientées résultats, telles que les taux d'incidents ou d'autres mesures de la performance passée.

Ils sont généralement liés aux facteurs d'atténuation situés à droite d'un diagramme en nœud papillon. Un indicateur de résultat se rapporte généralement aux conséquences (blessures ou incidents évités de justesse).

Aux actions réactives (intervention d'urgence) et implique souvent la notification de l'incident à l'autorité de réglementation Ou une enquête menée par l'exploitant.

De plus, ces deux types d'indicateurs de performance peuvent être considérés comme des indicateurs de santé et sécurité au travail (SST) ou des indicateurs de sécurité des procédés, bien qu'il existe un certain chevauchement. La SST concerne la sécurité des personnes, notamment les glissades, les trébuchements et les chutes. La sécurité des procédés vise à prévenir les incendies, les explosions et les incidents ou événements impliquant des matières dangereuses.[15], [16]

En résumé :

Indicateurs de résultats (Lagging) : Ils mesurent les échecs passés. Ils sont réactifs.

- Exemples : Nombre de fuites, incendies, ou blessures.

- Analogie : C'est comme regarder dans le rétroviseur pour conduire.

Indicateurs avancés (Leading) : Ils mesurent l'efficacité des barrières de sécurité et prédisent les performances futures. Ils sont proactifs.

- Exemples : Pourcentage de tests de soupapes réussis, nombre d'heures de formation PSM réalisées, délais de fermeture des recommandations d'inspections.

Tableau I-2 *: Types d'indicateurs avancés et retardés*

Indicateurs avancés (Leading indicators)	retardés (Indicateurs Lagging indicators)
Proactive	Reactive
Predictive	Basé sur les resultants
Côté gauche du diagramme nœud papillon	Côté droit du diagramme nœud papillon
Audit et surveillance	Enquête sur les incidents

Le règlement WHS PAGEO prescrit que l'exploitant élabore les indicateurs avancés et retardés et les documente dans le dossier de sécurité. Cependant, le règlement ne prescrit pas les indicateurs avancés et retardés spécifiques. Il appartient à l'exploitant d'élaborer ces indicateurs pour surveiller la performance en matière de santé et de sécurité de son exploitation. Il serait impossible de prescrire des indicateurs avancés et retardés qui soient pertinents pour tous les types d'exploitations couverts par le règlement (WHS PAGEO).

Bien que le règlement (WHS PAGEO) exige que l'exploitant élabore ces indicateurs de performance, il n'est pas tenu de les communiquer régulièrement à l'organisme de réglementation. Les inspecteurs sont plutôt censés discuter de ces indicateurs de performance avec l'exploitant lors des inspections, des réunions de liaison et autres échanges.

(WHS PAGEO): Work Health and Safety (Petroleum and Geothermal Energy Operations) Regulations 2022.[15], [16]

I.10.2 Classification selon le CCPS/API 754

Tier 1 : Événement de sécurité des procédés de grande ampleur

C'est l'indicateur de résultat (**Lagging**) le plus grave. Il représente une perte de confinement primaire (LOPC) avec une libération de substance dangereuse dépassant un seuil défini en un temps court (généralement 1h) ayant des conséquences majeures.

- **Conséquences typiques :** Un décès, une blessure grave, un incendie/explosion coûtant plus de $100,000, ou une évacuation de la population.

- **Exemple :** L'explosion d'un bac de stockage de produits chimiques ou une fuite massive de gaz toxique (comme à Seveso) obligeant le confinement des villages voisins.

Seuils pour le Tier 1 (Événements Majeurs) : Pour qu'une fuite soit classée en **Tier 1**, la quantité rejetée en **1 heure** doit dépasser les seuils suivants.[17]

Tableau I-3: *Seuils de classification des événements de Tier 1*

Catégorie de substance	Description	Seuil Tier 1(TQ)
Catégorie 1	Gaz toxiques (ex : Chlore, Phosgène)	**5 kg**
Catégorie 2	Liquides/Gaz très inflammables (ex : Propane, Hydrogène)	**25 kg**
Catégorie 3	Liquides inflammables modérés (Point éclair < 60°C)	**100 kg**
Catégorie 4	Liquides combustibles (Point éclair > 60°C)	**500 kg**

Tier 2 : Événement de sécurité des procédés de moindre ampleur

C'est aussi un indicateur de résultat (**Lagging**), mais pour des incidents moins sévères que le Tier 1. Une perte de confinement (LOPC) dont la quantité libérée est plus faible que le Tier 1 mais dépasse tout de même un seuil de signalement.

- **Conséquences typiques :** Une blessure nécessitant des soins médicaux simples (Recordable injury) ou un coût de dégâts matériels entre $2,500 et $100,000.
- **Exemple :** Une bride qui lâche sur une tuyauterie et provoque une petite nappe de produit chimique inflammable, rapidement maîtrisée par les pompiers du site sans blessé grave.[17]

Seuils pour le Tier 2 (Événements Significatifs) : Le **Tier 2** utilise les mêmes catégories, mais les Seuils sont **10 fois plus bas**. Si le rejet dépasse ces chiffres en **1 heure**, c'est un Tier 2.

Selon :

Tier 1 et 2 : fournissent des indicateurs de performance en matière de sécurité des procédés. Ils couvrent les incidents majeurs et les incidents moins graves. Les événements LOPC sont classés en tier 1 ou 2 selon l'ampleur des pertes par rapport aux seuils définis, et ils indiquent une défaillance

de plusieurs barrières. Ils sont si simples (par exemple, décès, blessure grave) qu'il est peu nécessaire de définir les indicateurs clés de performance (KPI), mais l'API fixe des valeurs seuils pour les quantités de LOPC. Il est également facile d'utiliser les événements définis dans différentes opérations.[15], [16]

Tableau I-4 *: Seuils de classification des événements de Tier 2*

Catégorie de substance	Description	Seuil Tier 2(TQ)
Catégorie 1	Gaz toxiques	**0.5 kg**
Catégorie 2	Liquides/Gaz très inflammables	**2.5 kg**
Catégorie 3	Liquides inflammables modérés	**10 kg**
Catégorie 4	Liquides combustibles	**50 kg**

Tier 3 : Défis aux systèmes de protection (Leading) :Ici, on passe aux indicateurs avancés (**Leading**). Ce sont des "presque accidents" ou des alertes sérieuses ; Un événement qui n'a pas causé de dommage, mais qui a sollicité une barrière de sécurité pour éviter le pire. C'est le signe que le système a failli, même si la sécurité a fonctionné.

- **Exemple 1 :** L'activation d'une **soupape de sécurité** (PSV) suite à une surpression anormale.
- **Exemple 2 :** Un système d'arrêt d'urgence (**SIS**) qui coupe l'unité car une température critique a été atteinte.
- **Utilité :** Si vous avez beaucoup de Tier 3, cela signifie qu'un Tier 1 ou 2 va bientôt arriver.[17]

Tier 4 : Indicateurs de discipline opérationnelle (Leading) :
Ce sont les indicateurs les plus proactifs. Ils mesurent la "santé" du système de management et l'exécution des activités de prévention et de la culture de sécurité sur le site.

- **Exemple 1 :** Le pourcentage de **maintenance préventive** réalisée à temps sur les équipements critiques.
- **Exemple 2 :** Le taux de réussite aux formations sur les procédures opératoires pour les techniciens.

- **Exemple 3 :** Le nombre d'inspections de tuyauteries réalisées par rapport au planning annuel.[17]

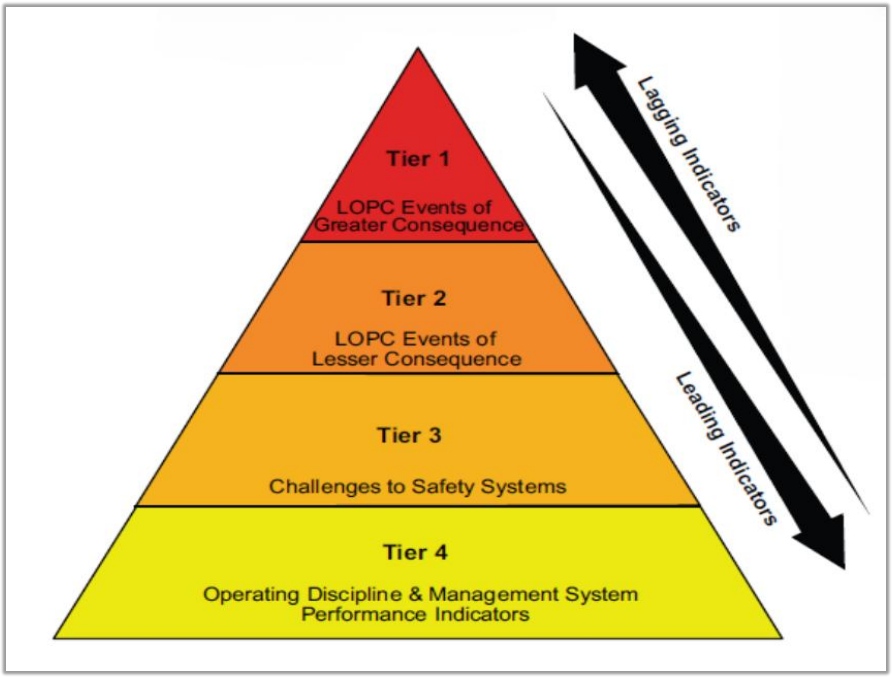


***Figure I-11**: Pyramide des indicateurs de performance en sécurité des procédés selon l'API RP 754*

***Tableau I-5**: Synthèse des indicateurs de performance (Tier 1 à 4)*

Tier	Type	Gravité	Observation
Tier 1	Lagging	Maximale	L'accident majeur (Échec total).
Tier 2	Lagging	Modérée	L'incident sérieux.
Tier 3	Leading	Faible	Les barrières ont été testées par le procédé.
Tier 4	Leading	Préventive	La vérification que tout le monde fait son travail.

1 Le lien avec le modèle de Reason (1.3) : Expliquez que les indicateurs de **Tier 3 et 4** servent à détecter les "trous dans le fromage suisse" avant que l'accident ne traverse toutes les tranches.
2 L'importance des seuils : Détaillez ce qui fait qu'un événement est classé Tier 1 ou Tier 2 (quantité de produit rejeté, impact sur le personnel)

3 **Critique des indicateurs :** Mentionnez que beaucoup d'entreprises font l'erreur de ne suivre que le taux d'accidents du travail (sécurité classique) au lieu de suivre l'intégrité des équipements (sécurité des procédés).

II.11 Conclusion

En somme, ce chapitre a mis en évidence que les accidents industriels majeurs ne sont jamais le fruit du hasard, mais résultent d'une défaillance en chaîne d'une multitude de barrières de prévention et d'atténuation. La distinction entre la sécurité des individus au travail et l'intégrité globale du procédé est une nuance cruciale qui justifie la mise en place d'indicateurs spécifiques (Tier 1 à 4). Comprendre ces fondements théoriques et les enseignements douloureux du passé est une étape préparatoire indispensable. Elle nous mène tout naturellement à l'étude des cadres de gestion systémiques conçus pour encadrer ces risques, ce qui fera l'objet du chapitre suivant dédié au Système de Management de la Sécurité des Procédés (PSM).

CHAPITRE II : Le Système de Management de la Sécurité des Procédés (PSM) et ses éléments clés

II.1 Introduction

La sécurité des procédés vise à prévenir les accidents majeurs (explosions, incendies, fuites toxiques) dans les industries à risques. Le Système de Management de la Sécurité des Procédés (PSM) est une approche structurée qui repose sur plusieurs éléments clés (analyse de risques, intégrité mécanique, gestion des changements, etc). Chaque élément agit comme une barrière de sécurité ; leur mise en œuvre cohérente permet de maîtriser les dangers et d'éviter les catastrophes. Ce chapitre présente les fondements du PSM, ses 14 composantes essentielles (référence OSHA 29 CFR 1910.119), ainsi que leur articulation dans une démarche d'amélioration continue, illustrée par les retours d'expérience d'accidents majeurs.

II.2 Architecture d'un système de management (PSM)

II.2.1 Définition de PSM

Selon CCPS :

Système de gestion axé sur la prévention, la préparation, l'atténuation,l'intervention et la restauration en cas de rejets catastrophiques de produits chimiques ou d'énergie provenant d'un processus associé à une installation [3]

Selon OSHA :

La gestion des risques associés aux processus utilisant des produits chimiques hautement dangereux afin de garantir des lieux de travail sûrs et sains.

Selon HSE :

Les parties du système de gestion d'une organisation destinées à prévenir les incidents majeurs résultant de la production, du stockage et de la manipulation de substances dangereuses.

Selon CCOHS :

L'utilisation de systèmes et de principes pour identifier en permanence les dangers, évaluer les risques et maîtriser les dangers associés aux processus à haut risque.[19]

II.2.2 Les objectifs clés de la sécurité des procédés (PSM)

L'implémentation d'un PSM au sein d'une organisation poursuit quatre objectifs fondamentaux :

- **.Prévention des pertes de confinement (LOPC) :**

  C'est l'objectif ultime. Il s'agit de maintenir l'intégrité technique des installations pour éviter toute fuite d'énergie ou de matière dangereuse. On parle souvent de "conserver le produit dans les lignes".

- **Protection de l'humain, de l'environnement et des actifs :**

Humain : Protéger les employés et les populations riveraines des effets thermiques, toxiques ou de surpression.

Environnement : Éviter les pollutions majeures (sols, nappes phréatiques, air).

Actifs : Préserver l'outil de production et éviter des coûts de reconstruction massifs.

- **Continuité de l'activité (Business Continuity) :**

Un accident de procédé majeur entraîne souvent l'arrêt définitif ou prolongé d'une usine. Le PSM garantit la pérennité économique de l'entreprise en minimisant les interruptions non planifiées.

- .**Conformité réglementaire et réputation :**

Répondre aux exigences légales (comme les directives Seveso en Europe ou l'OSHA aux États-Unis) et protéger l'image de marque de l'entreprise auprès du public et des autorités.

Note : Asuré le risque procédé durablement métrisé et resté éficase , prévenir et réduire les accident majeur liés aux installations.[3]

II.2.3 Le modèle PDCA Pour les éléments du PSM-RBPS

Il existe de nombreux modèles différents de systèmes de gestion de la sécurité, mais tous suivent Le même cycle Plan-Do-Check-Act (connu sous le nom de « PDCA ») dans le cadre d'un Processus d'amélioration continue.

Dans les systèmes de gestion de la sécurité des procès, la même structure de base est suivie :

- Politique (plan)
- Planification (plan)
- Mise en œuvre et exploitation (do)
- Vérification et action corrective (vérifier)
- Revue de direction (acte)
- Amélioration continue (agir) [18]

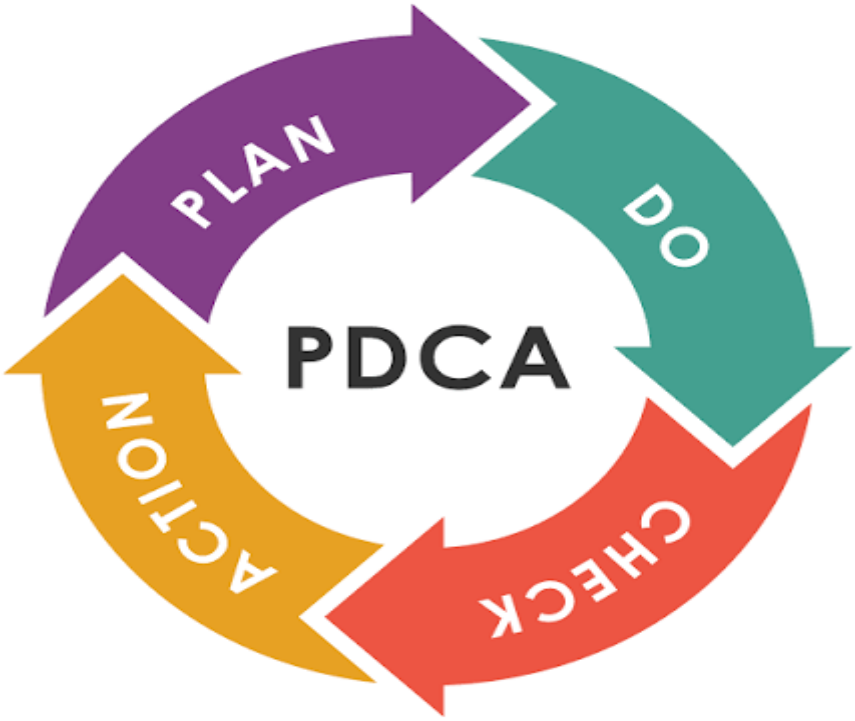


Figure II-1 *: modèle PDCA Pour les éléments du PSM-RBPS*

II.2.4 Les différents référentiels mondiaux

Le modèle OSHA 1910.119 les 14 éléments classiques et le modèle CCPS - Risk Based Process Safety (RBPS) les 20 éléments modernes.

II.2.4.1 Le modèle OSHA 1910.119 -*Les 14 éléments classiques*

Promulgué en 1992 aux États-Unis suite à la catastrophe de Bhopal, ce référentiel est **prescriptif**. Cela signifie qu'il définit une liste d'exigences minimales que les industries manipulant des substances hautement dangereuses doivent impérativement respecter. [2]

Les 14 éléments de l'OSHA :

1. Implication des employés.
2. Information sur la sécurité des procédés (PSI).
3. Analyse des risques des procédés (PHA).
4. Procédures d'exploitation.
5. Formation.
6. Sous-traitance.
7. Revue de sécurité prédémarrage (PSSR).
8. Intégrité mécanique.

9. Permis de travail à chaud.
10. Gestion du changement (MOC).
11. Enquête sur les incidents.
12. Planification et réponse aux urgences.
13. Audits de conformité.
14. Secrets commerciaux.

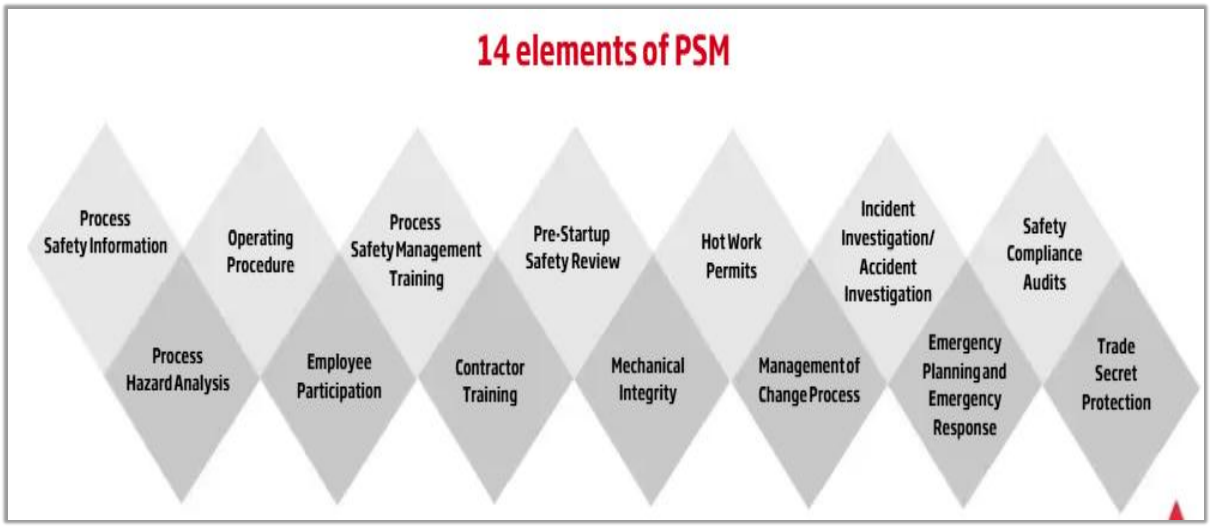


***Figure II-2**: Les 14 éléments de PSM*

II.2.4.2 Le modèle CCPS - Risk Based Process Safety (RBPS)

Publié en 2007 par le Center for Chemical Process Safety, ce modèle est plus moderne et flexible. Au lieu d'appliquer les mêmes règles partout, il suggère que l'effort de gestion doit être proportionnel au niveau e risque. Il est divisé en 4 piliers regroupant 20 éléments. [3]

Note : Tous les 20 éléments selon [3].

II.3 Les piliers du management des risques - Basé sur le CCPS [3]

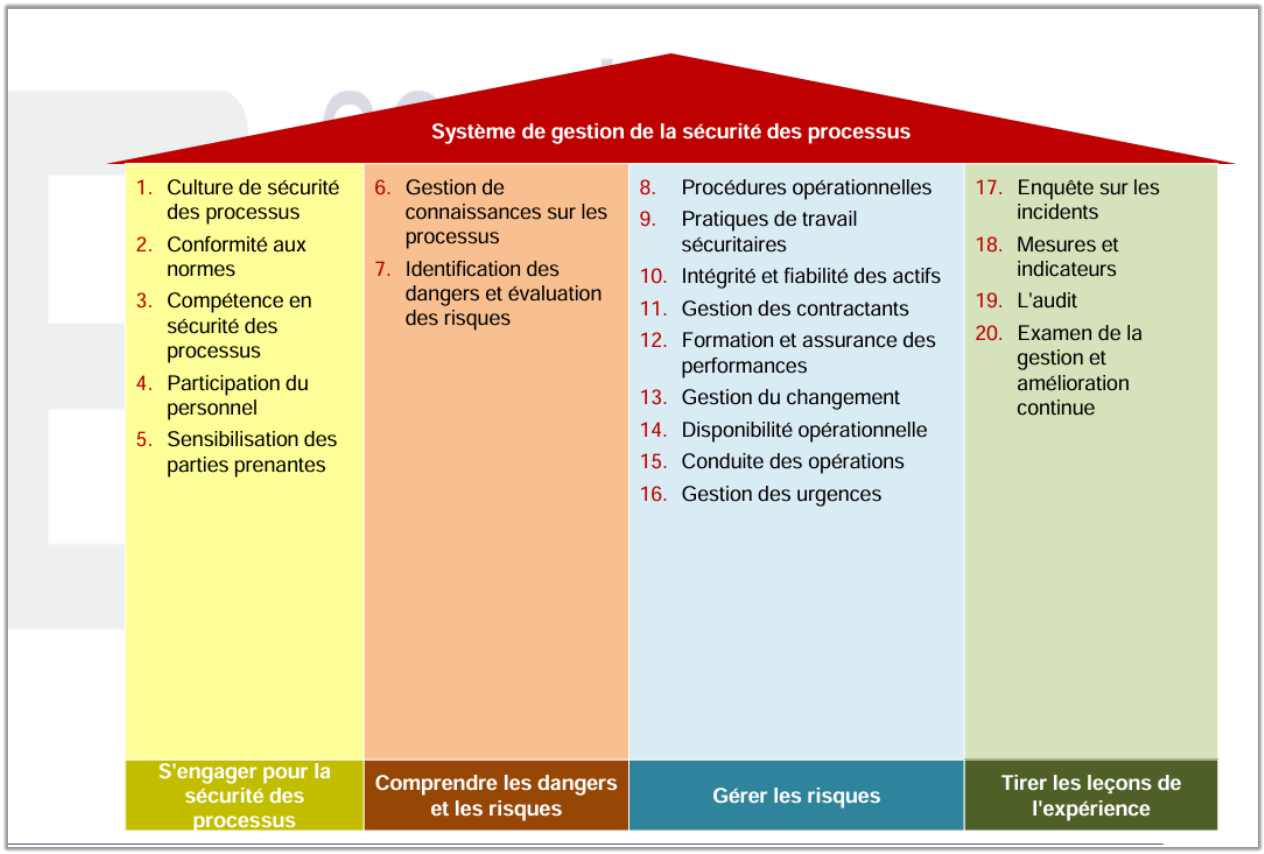


Figure II-3 *: Les piliers du management des risques*

II.3.1 Pilier 1 : S'engager pour la sécurité des processus

II.3.1.1 Élément 1 : Culture de sécurité des processus

Définition :

La combinaison des valeurs et des comportements du groupe qui déterminent la manière dont la sécurité des processus est gérée ("Comment nous faisons les choses ici", "Ce que nous attendons ici" et "Comment nous nous comportons quand personne ne nous regarde").



Figure II-4*: échelle de la culture de la sécurité*

Responsables :

- Le leadership est le premier responsable du développement, de la conduite et du maintien d'une culture saine.
- La responsabilité est ensuite répercutée en cascade au sein des organisations
- Chaque individu a un rôle à jouer dans le renforcement de la culture de sécurité des processus (valeurs, normes, mentalités et comportements).

Résultat attendu :

- une solide culture de sécurité des processus qui maximise l'efficacité des éléments du PSM

Principes clés

- Maintenir une pratique fiable
- Développer et mettre en œuvre une culture saine
- Contrôler et orienter la culture

II.3.1.2 Élément 2 : conformité aux normes

Définition :

Un système permettant d'identifier, de développer, d'acquérir, d'évaluer, de diffuser et de fournir un accès aux normes, codes, réglementations et lois applicables qui ont une incidence sur la sécurité des processus.

Exemples de règlements

- OSHA - norme de gestion de la sécurité des processus (29 CFR 1910.1 19)
- Norme nationale australienne pour le contrôle des installations présentant des risques majeurs
- Commission européenne Directive Seveso 11
- UK, Health and Safety Executive COMAH Regulations
- Norme coréenne OSHA PSM
- Système mexicain de gestion intégrale de la sécurité et de l'environnement (SIASPA)

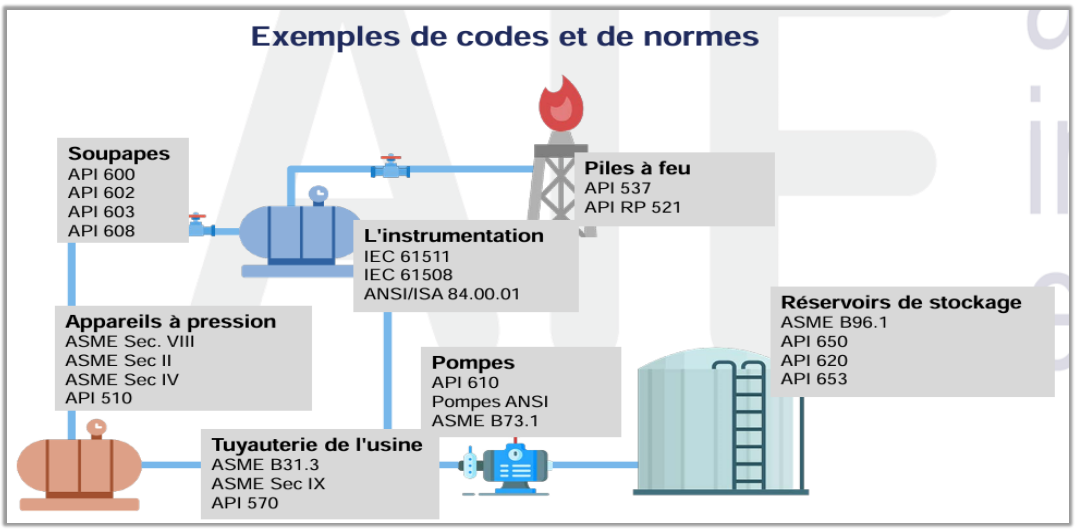


***Figure II-5**: Codes et normes*

Responsable :

- Principalement au sein du département technique
- Les exigences réglementaires sont généralement identifiées par une personne connaissant bien les agences d'État, en étroite collaboration avec le département juridique de l'entreprise.

Résultat attendu

- Ensemble de données précises, complètes, actualisées et accessibles–lignes directrices internes de l'entreprise–codes et normes–les règlements et lois applicables
- Système permettant d'assurer une conformité efficace et cohérente

Principes clés :

- Maintenir une pratique fiable
- Mener des activités de travail en matière de conformité
- Assurer le suivi des décisions, des actions et de l'utilisation des résultats obtenus en matière de conformité.

II.3.1.3 Élément 3 : compétence en sécurité des processus

Définition :

Ce système dédié au développement et au maintien des compétences en matière de sécurité des procédés (SP) repose sur l'amélioration continue des connaissances et des aptitudes du personnel. Il a pour vocation de garantir la mise à disposition ciblée des informations pertinentes aux

collaborateurs qui en ont besoin, tout en s'assurant que les acquis d'apprentissage soient appliqués de manière rigoureuse, cohérente et pérenne dans les pratiques opérationnelles.

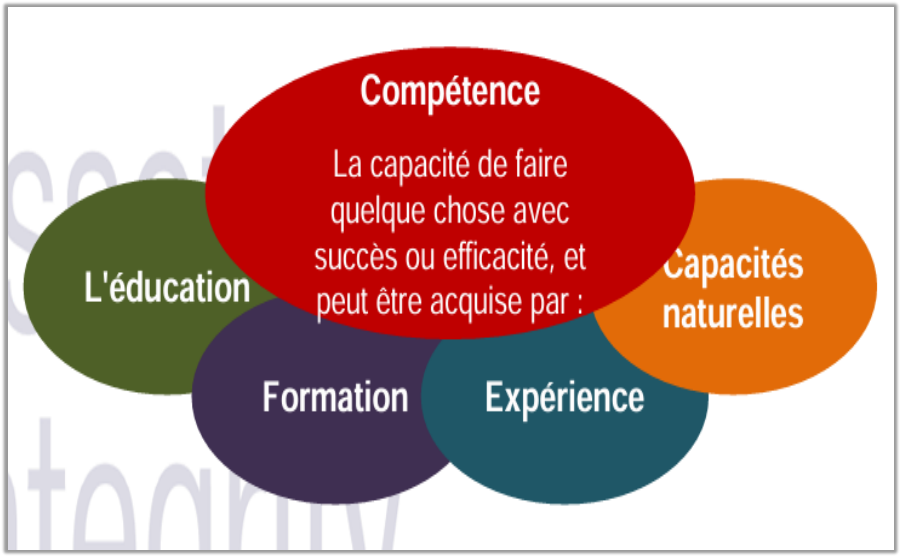


***Figure II-6**: Les différentes sources d'acquisition de la compétence*

Responsables :

- Une grande variété de personnel
- Souvent, c'est un ingénieur/spécialiste qui pilote le système
- Implique le personnel de différents départements et la direction (technique, HSE, opérations, RH, etc.)

Résultat attendu :

Une compréhension des connaissances permettant d'améliorer la prise de décision au sein d'une organisation, en augmentant la probabilité que les individus agissent de manière appropriée dans des situations anormales.

Principes clés

- Maintenir une pratique fiable
- Exécuter des activités qui contribuent à maintenir et à améliorer les compétences en matière de sécurité des processus.
- Évaluer et partager les résultats.
- Adapter les plans.

II.3.1.4 Élément 4 : participation du personnel

Définition :

Un système permettant la participation active des travailleurs de l'entreprise et du sous-traitant à la conception, au développement, à la mise en œuvre et à l'amélioration continue du système PSM.

Responsables :

- Initiée et conduite par la direction avec la contribution et la participation active du personnel

Résultat attendu :

Un système de PSM qui :

- Définit les rôles et responsabilités de toutes les parties concernées.
- Maintenu en état de verdure permanente grâce à l'attention de la direction et à l'apport continu des travailleurs.
- Fournit aux travailleurs des informations leur permettant de comprendre les risques applicables et de jouer leur rôle dans la mise en œuvre de la PSM.

Principes clés :

- Maintenir une pratique fiable
- Mener des activités de travail
- Contrôler l'efficacité du système.
- Promouvoir activement le programme de participation du personnel.

II.3.1.5 Élément 5 : sensibilisation des parties prenantes

Ce processus consiste à identifier de manière proactive les personnes ou les organisations susceptibles d'être affectées par les activités de l'entreprise afin de s'engager activement auprès d'elles. Il vise à établir et à maintenir des relations collaboratives et durables avec les institutions, les entreprises, les groupes professionnels ainsi que les autorités régulatrices ou fédérales. Enfin, cette démarche permet de diffuser des informations transparentes et rigoureuses concernant les produits, les procédés, les plans de développement, ainsi que les dangers et les risques inhérents à l'établissement.

Responsables :

- Toute personne en mesure de transmettre des informations sur l'entreprise, généralement de la part de la direction.
- Il peut être fait appel au personnel juridique pour garantir la confidentialité de l'entreprise, le cas échéant.

Résultat attendu :

- Communication réussie avec les parties prenantes concernées
- Plans de communication, matériel de formation et dossiers

Principes clés

- Maintenir une pratique fiable
- Identifier les besoins en matière de communication et de sensibilisation
- Mener des activités de communication et de sensibilisation
- Suivi des engagements et des actions.

II.3.2 Comprendre les dangers et les risques

II.3.2.1 Élément 6 : gestion des connaissances sur les processus

Définition :

Des documents tels que des documents techniques écrits, des dessins et des calculs techniques, des spécifications de conception / fabrication / installation d'équipements de processus et d'autres documents écrits, ainsi que les activités de travail associées à la compilation, au catalogage et à la mise à disposition de ces documents.

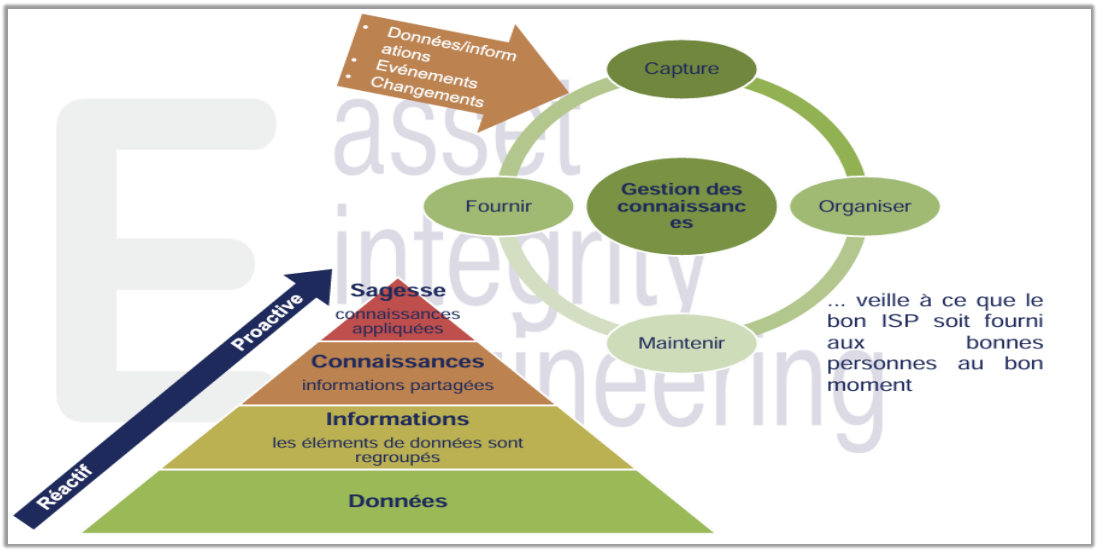


***Figure II-7**: Cycle de gestion des connaissances et évolution de la donnée vers la sagesse*

Les informations sur la sécurité des processus (ISP) sont des "informations physiques, chimiques et toxicologiques relatives aux produits chimiques, au processus et à l'équipement. Elles sont utilisées pour documenter la configuration d'un procédé, ses caractéristiques, ses limites, et comme données pour les analyses des dangers du procédé.

Responsables :

- La connaissance des processus relève principalement du département technique/ingénierie

Résultat attendu :

- Informations précises, complètes et actualisées sur la sécurité des processus
- Un système pour stocker et récupérer ces informations

Principes clés

- Maintenir une pratique fiable
- Cataloguer les connaissances sur les processus de manière à en faciliter la recherche
- Protéger et mettre à jour les connaissances sur les processus
- Utiliser la connaissance des processus

II.3.2.2 Élément 7 : Identification des dangers et évaluation des risques

Définition :

Il englobe toutes les activités liées à l'identification des dangers et à l'évaluation des risques dans les installations, tout au long de leur cycle de vie, afin de s'assurer que les risques pour les employés, le public ou l'environnement sont maîtrisés de manière cohérente, dans le cadre de la tolérance au risque de l'organisation.

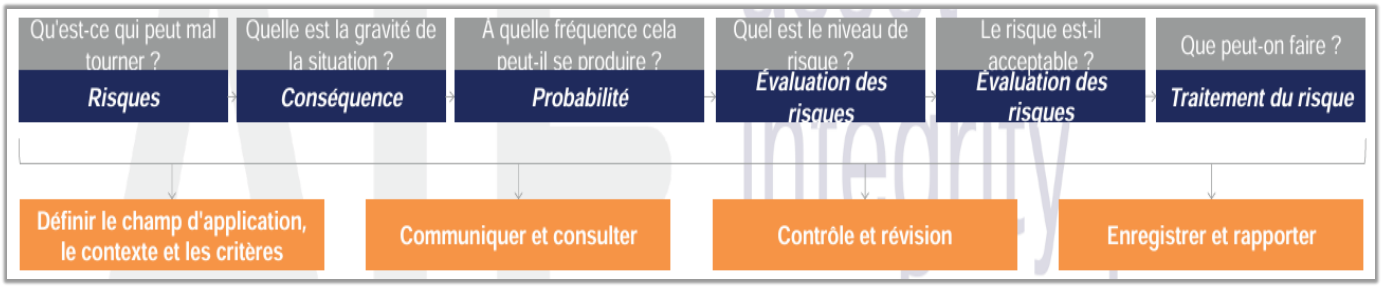


***Figure II-8**: Le processus global d'identification des dangers et d'évaluation des risques (HIRA)*

Responsables :

- Les études HIRA sont généralement menées par une équipe d'experts qualifiés
- Personnel de l'ingénierie, des opérations, de la maintenance et de HSE impliqué

Quel est le produit attendu de son travail ?

- Lignes directrices pour la réalisation d'études HIRA
- Documentation sur les dangers et les risques liés aux actifs

- Documentation sur les critères de tolérance au risque
- Évaluation des risques et documentation de suivi

Principes clés

- Maintenir une pratique fiable
- Identifier les dangers et évaluer les risques
- Évaluer les risques et prendre des décisions fondées sur les risques
- Suivi des résultats de l'évaluation

II.3.3 Gérer des risques (Le cœur opérationnel) :

II.3.3.1 Élément 8 : Procédures opérationnelles

Les instructions écrites, qu'elles soient conservées sous forme électronique ou imprimées à la demande, constituent un guide structuré qui liste de manière séquentielle toutes les étapes d'une tâche donnée et détaille avec précision la méthode d'exécution requise pour chacune d'elles afin de garantir la conformité et la sécurité des opérations.

Exemples de formats de procédures opérationnelles :

La narration n'est pas souhaitée	Paragraphe non préféré	Multi-colonnes	Organigramme	Liste de contrôle
Rédigé en longs paragraphes, difficile à suivre	La numérotation donne une certaine structure	Colonnes d'information multiples pour les guides de dépannage / liens	Représentation graphique avec brèves descriptions	Inclut des spots pour les actions initiales ou de contrôle

***Figure II-9**: format de procédure opérationnelle*

Responsables :

- Opérateurs seniors et ingénieurs de procédé ; personnel qui contrôle directement le procédé
- Les superviseurs et les directeurs sont souvent impliqués dans l'examen et l'approbation.

Des instructions écrites actuelles, précises et utiles qui s'appliquent aux

- Fonctionnement normal
- Opérations non routinières ou peu fréquentes
- Opérations spéciales à haut risque

Principes clés

- Maintenir une pratique fiable
- Identifier les procédures opérationnelles nécessaires

- Élaborer des procédures
- Utiliser des procédures pour améliorer les performances humaines
- Veiller à ce que les procédures soient maintenues

II.3.3.2 Élément 9 : pratiques de travail sécuritaires

Définition :

Un système permettant de maîtriser les dangers et de gérer les risques associés au travail non routinier (toute activité qui n'est pas entièrement décrite dans une procédure opérationnelle - ne fait pas référence à la fréquence à laquelle l'activité se produit).

Exemples d'activités

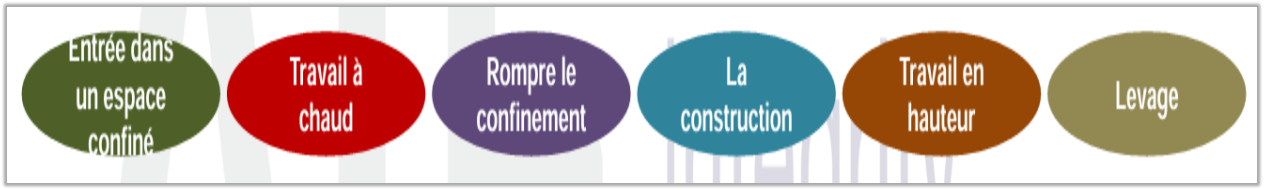


***Figure II-10**: Exemples de travaux critiques nécessitant des permis spécifiques*

Responsables :

- Principalement le groupe de sécurité de la division (par exemple, le département HSE)
- L'utilisation et l'exécution sont une responsabilité partagée entre les opérateurs, le personnel d'entretien et les entrepreneurs.

Résultat attendu :

Système intégré de procédures et de permis permettant de protéger les travailleurs contre les risques et d'empêcher la libération soudaine de matériaux de traitement ou d'énergie au cours d'activités de travail non routinières.

Principes clés

- Maintenir une pratique fiable
- Contrôler efficacement les activités de travail non routinières

II.3.3.3 Élément 10 : intégrité et fiabilité des actifs

Définition :

La mise en œuvre systématique d'activités, telles que les inspections et les essais, nécessaires pour garantir qu'un équipement important sera adapté à l'application prévue tout au long de sa durée de vie.

Responsables :

- Principalement sous l'impulsion des équipes d'inspection et de maintenance
- Implique également le personnel des opérations, de l'ingénierie et de HSE

Résultat attendu :

- Rapports et données des inspections initiales, des tests, etc.
- Résultats des tâches d'inspection, d'essai et de maintenance en cours
- Contrôle des réparations et des ajustements des équipements
- Un système de contrôle des travaux d'entretien, des pièces de rechange et des matériaux d'entretien afin de garantir l'aptitude au service.
- Un programme d'assurance qualité pour prévenir les défaillances de l'équipement

Principes clés

- Maintenir une pratique fiable.
- Identifier les équipements et les systèmes qui relèvent du programme d'intégrité des actifs et leur assigner des tâches d'inspection, d'essai et de maintenance.
- Développer et maintenir les connaissances, les compétences, les procédures et les outils.
- Assurer le maintien de l'aptitude à l'emploi.
- Remédier aux défaillances et aux déficiences de l'équipement
- Analyser les données.

II.3.3.4 Élément 11 : Gestion des contractants

Définition :

Un système de contrôles visant à garantir que les services sous-traités soutiennent à la fois la sécurité des opérations de l'installation et les objectifs de performance de l'entreprise en matière de sécurité des processus et de sécurité des personnes. Cet élément porte sur la sélection, l'acquisition, l'utilisation et la surveillance de ces services sous-traités.

Responsables :

- Principalement sous l'impulsion de la fonction d'approvisionnement
- Implique également différents départements en fonction du propriétaire du contrat (par exemple, opérations, ingénierie, HSE, etc.).

Résultat attendu :

- Une liste de candidats contractuels préqualifiés.
- Sélection d'entrepreneurs ayant des programmes et des dossiers de sécurité solides.
- Préparation des entrepreneurs à fournir leurs services en toute sécurité
- Fourniture en toute sécurité des services contractuels
- Documentation du processus d'examen et de sélection des contractants et des performances en matière de sécurité

Principes clés

- Maintenir une pratique fiable
- Mener des activités de travail sur les éléments.
- Contrôler l'efficacité du système de gestion des contractants.

II.3.3.5 Élément 12 : formation et assurance des performances

Définition :

La formation consiste en un enseignement pratique, dispensé en salle de classe ou directement sur le lieu de travail, visant à doter les employés des compétences nécessaires pour répondre aux exigences de leurs tâches et satisfaire aux standards de performance initiaux minimaux. Ce processus d'apprentissage est intrinsèquement lié à l'assurance des performances, qui constitue l'étape de validation par laquelle les travailleurs démontrent concrètement qu'ils ont bien assimilé les connaissances transmises et qu'ils sont capables de les appliquer de manière efficace et sécuritaire dans des situations opérationnelles réelles.

Responsables :

- Chaque département devrait définir les niveaux de compétence (KSA) requis pour leurs rôles spécifiques.
- Le personnel des HR/de la formation planifie et coordonne les activités de formation, des experts/spécialistes qualifiés dispensent la formation.
- Des pairs, des formateurs, des responsables, des membres du personnel des RH ou des tiers qualifiés peuvent effectuer des tests d'assurance des performances.

Résultat attendu :

- Un ensemble de standards de performance et une liste des besoins de formation initiale et continue pour chaque poste de travail
- Matériel de formation

Principes clés

- Maintenir une pratique fiable
- Identifier les formations nécessaires
- Fournir une formation efficace
- Contrôler les performances des travailleurs

II.3.3.6 Élément 13 : Gestion du changement

Définition :

Procédures opérationnelles Système visant à garantir que les modifications apportées à un processus n'introduisent pas par inadvertance de nouveaux dangers ou n'augmentent pas à leur insu le risque de dangers existants.

Responsables :

- Siège principalement dans les départements d'ingénierie/techniques.
- Peut impliquer des contributions, des examens et des approbations Gates et multidisciplinaires en fonction de l'ampleur du changement.

Résultat attendu :

Les demandes de changement sont examinées, autorisées et documentées de manière appropriée, ce qui permet d'identifier et de garantir la mise en œuvre de contrôles des risques adaptés aux changements proposés.

Principes clés

- Maintenir une pratique fiable
- Identifier les situations de changement potentiel
- Évaluer les impacts possibles
- Décider d'autoriser ou non le changement
- Mener à bien les activités de suivi



***Figure II-11**: procédure de haut niveau*

II.3.3.7 Élément 14 : disponibilité opérationnelle

Définition :

Il s'agit de vérifier que les processus arrêtés sont en état de redémarrer en toute sécurité. Cet élément concerne les démarrages à partir de tous les types de conditions d'arrêt et tient compte de la durée pendant laquelle le processus est resté à l'arrêt.



***Figure II-12**: Séquence de la revue de sécurité de pré-démarrage (PSSR)*

Responsables :

- Les examens simples (startups) peuvent inclure des équipes simples (un seul opérateur, technicien ou ingénieur).
- Les examens complexes impliquent une équipe pluridisciplinaire

Résultat attendu :

- L'affirmation que le processus est prêt à démarrer en toute sécurité et l'autorisation de le faire
- Une liste d'actions à entreprendre pour préparer le processus

Principes clés

Les principes de l'élément sont les suivants :

- Maintenir une pratique fiable
- Procéder, le cas échéant, à des examens appropriés de l'état de préparation
- Prendre des décisions de démarrage sur la base des résultats de l'état de préparation
- Suivi des décisions, des actions et de l'utilisation des résultats de la préparation

II.3.3.8 Élément 15 : conduite des opérations

Définition :

L'incarnation des valeurs et des principes d'une organisation dans des systèmes de gestion qui sont élaborés, mis en œuvre et maintenus pour... :

1. Structurer les tâches opérationnelles en fonction de la tolérance au risque de l'organisation
2. Veiller à ce que chaque tâche soit exécutée délibérément et correctement

3. Minimiser les variations de performance.
4. ……...fortement tributaire des facteurs humains : "la conception de machines, d'opérations et d'environnements de travail en fonction des capacités, des limites et des besoins de l'être humain.

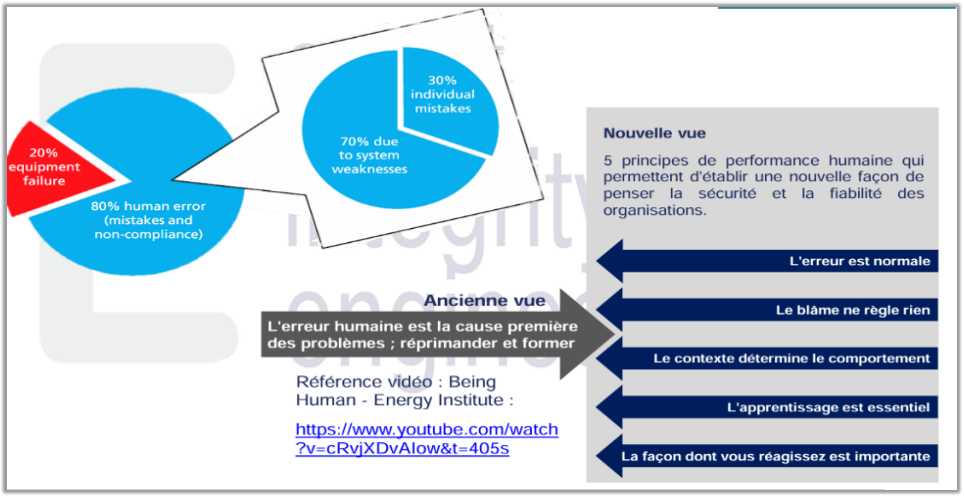


***Figure II-13**: Analyse systémique de l'erreur humaine : Ancienne vision vs Nouvelle vision*

Responsables :

- Les directeurs de département sont responsables de la conduite des opérations au sein de leur département respectif
- La responsabilité globale incombe généralement au gestionnaire d'actifs

Résultat attendu :

- Une politique décrivant les attentes générales de l'organisation en matière de comportement des travailleurs, ainsi que les procédures et objectifs spécifiques pour la mise en œuvre de ces politiques.
- L'exécution des tâches de chaque travailleur, de la salle de conférence à l'atelier, d'une manière disciplinée et cohérente.

Principes clés

- Maintenir une pratique fiable
- Contrôler les activités opérationnelles.
- Contrôler l'état des systèmes et des équipements.
- Développer les compétences/comportements requis.
- Contrôler les performances de l'organisation.

II.3.3.9 Élément 16 : Gestion des urgences

Définition :

Ce système de gestion des urgences englobe la planification rigoureuse des situations critiques potentielles ainsi que la mise à disposition de toutes les ressources nécessaires à l'exécution efficace des mesures de secours. Il s'inscrit dans une démarche dynamique d'amélioration continue par la mise en pratique régulière du plan, tout en intégrant un volet essentiel de formation et de sensibilisation destiné aux employés, aux entrepreneurs, aux populations avoisinantes et aux autorités locales concernant la conduite à tenir, les modes de notification et les procédures de signalement. Enfin, il garantit le déploiement d'une communication structurée et transparente avec l'ensemble des parties prenantes dès la survenue d'un incident.

Responsables :

- Les spécialistes sont responsables de la planification des urgences en consultant le groupe des opérations et l'élément de risque
- Le groupe des opérations est généralement responsable de l'intervention immédiate en cas d'urgence, mais il est rapidement assisté par une équipe spécialisée dans l'intervention en cas d'incident.

Résultat attendu :

- Le produit général de cet élément est :
- Des plans d'intervention d'urgence efficaces et testés,
- Des équipes d'intervention formées et équipées,
- Méthodes efficaces de protection du personnel, de l'environnement et des biens

Principes clés

- Maintenir une pratique fiable
- Se préparer aux situations d'urgence
- Vérifier périodiquement l'adéquation des plans et le niveau de préparation.

II.3.4 Tirer les leçons de l'expérience

II.3.4.1 Élément 17 : enquête sur les incidents

Définition :

Processus de signalement, de suivi et d'enquête sur les incidents. Il comprend : • Une procédure formelle d'enquête sur les incidents comprenant la dotation en personnel, la réalisation, la documentation et le suivi des enquêtes. • L'établissement de tendances à partir des données relatives aux incidents et aux enquêtes sur les incidents afin d'identifier les incidents récurrents.

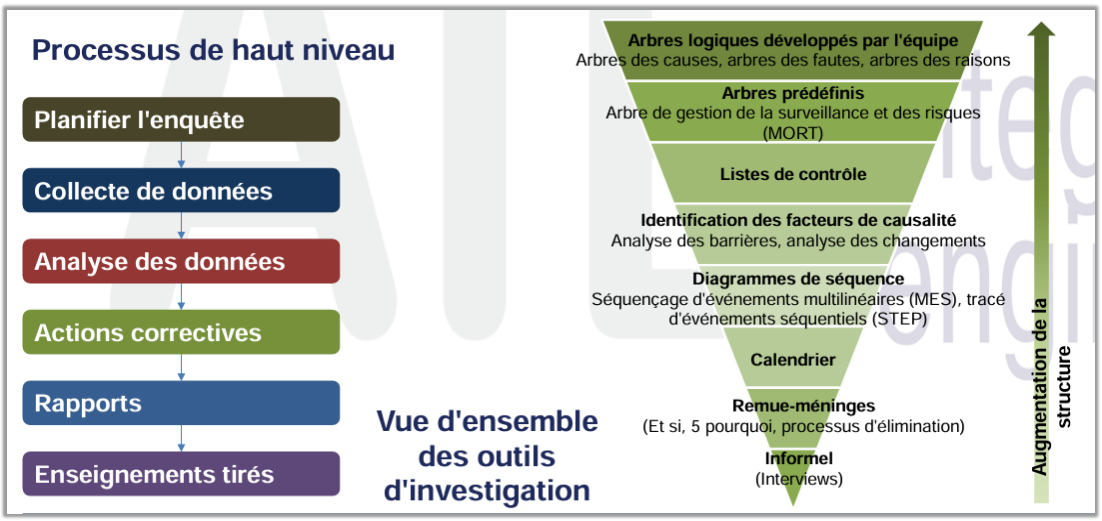


***Figure II-14**: Processus d'enquête sur les incidents et hiérarchisation des outils d'investigation*

L'outil ou les outils appropriés sont sélectionnés en fonction des éléments suivants :

- La culture organisationnelle,
- L'expérience et l'expertise des enquêteurs sur les incidents, et
- Nature et complexité de l'incident.

Responsables :

- L'enquête est menée par un personnel spécialisé et formé
- Les incidents susceptibles d'avoir des conséquences importantes doivent faire l'objet d'une enquête par une équipe pluridisciplinaire, qui peut également nécessiter l'intervention du département juridique en cas d'impact réglementaire.
- Les incidents qui ne risquent pas d'avoir des conséquences importantes peuvent faire l'objet d'une enquête par une équipe de 1 à 2 personnes.

Résultat attendu :

- Données de base pour tous les incidents enregistrés,
- Rapports d'analyse,
- Identification des causes des incidents qui font l'objet d'une enquête
- Mise en œuvre des recommandations (enseignements tirés et mesures à prendre) qui réduiront le risque d'incidents similaires.

Principes clés

- Maintenir une pratique fiable
- Identifier les enquêtes sur les incidents potentiels.
- Utiliser les techniques appropriées pour enquêter sur les incidents.

- Documenter les résultats de l'enquête sur les incidents.
- Assurer le suivi des résultats des enquêtes.
- Les données sur les tendances permettent d'identifier les incidents répétés qui justifient une enquête.

II.3.4.2 Élément 18 : mesures et indicateurs

Définition :

L'établissement d'indicateurs de performance et d'efficacité pour contrôler l'efficacité en temps réel du système de PSM et de ses éléments constitutifs et activités de travail traite des indicateurs à prendre en compte, de la fréquence de la collecte des données et de l'utilisation des informations pour garantir un fonctionnement réactif et efficace du système de PSM.

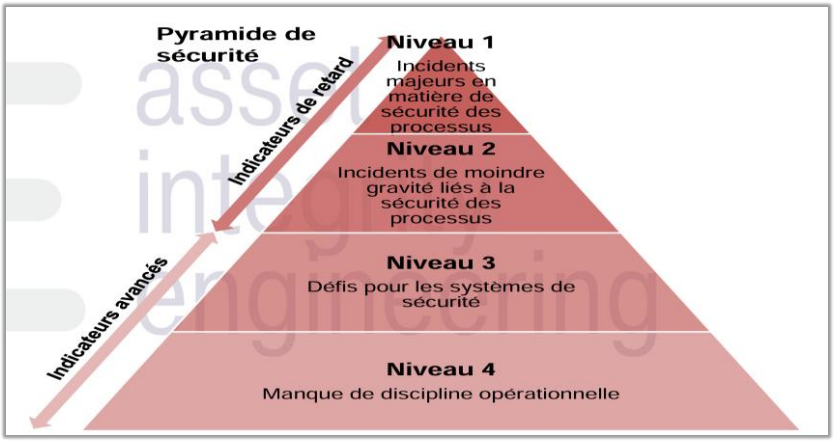


***Figure II-15**: pyramide de sécurité*

Responsables :

- La collecte et la compilation des mesures peuvent être effectuées par toute personne de l'organisation impliquée dans le système de PSM.
- Les propriétaires d'éléments sont généralement chargés de fournir des mesures relatives à leurs éléments.

Résultat attendu :

Un ensemble de mesures pour :

- Contrôler les performances et l'efficacité du système de PSM
- Identifier les faiblesses du système de gestion en évolution
- Apporter des ajustements aux activités de travail de l'élément en conséquence

Principes clés

- Maintenir une pratique fiable
- Procéder à l'acquisition de mesures.

- Utiliser des indicateurs pour prendre des décisions en matière de mesures correctives.

II.3.4.3 Élément 19 : Audit

Définition :

Un système permettant de programmer, de doter en personnel, de réaliser efficacement et de documenter les évaluations périodiques de tous les éléments PSM, ainsi que de fournir des systèmes de gestion de la résolution des constatations et des actions correctives générées par les audits.

Responsables :

- Spécialistes/personnel qualifié en fonction de l'étendue de l'audit
- Généralement menées par des équipes
- Les membres de l'équipe peuvent être des employés de l'établissement faisant l'objet de l'audit, d'autres sites de l'entreprise ou d'une société de conseil.

Résultat attendu :

- Examen de la mise en œuvre des éléments du PSM
- Un rapport d'observations, de constatations et de recommandations pour toute amélioration nécessaire

Principes clés

- Maintenir une pratique fiable
- Mener des activités de travail sur les éléments.
- Utiliser les audits pour renforcer l'efficacité des PSM

II.3.4.4 Élément 20 : examen de la gestion et amélioration continue

Définition :

Il s'agit d'une évaluation de routine visant à déterminer si les systèmes de gestion fonctionnent comme prévu et produisent les résultats souhaités de la manière la plus efficace possible. Il s'agit de l'examen permanent de "diligence raisonnable" effectué par la direction, qui comble le vide entre les activités de travail quotidiennes et les audits formels périodiques.

Responsables :

- Spécialistes/personnel qualifié en fonction de l'étendue de l'audit
- Généralement menées par des équipes
- Les membres de l'équipe peuvent être des employés de l'établissement faisant l'objet de l'audit, d'autres sites de l'entreprise ou d'une société de conseil.

Résultat attendu :

Un mémorandum interne résumant l'examen, les déficiences ou inefficacités constatées et les recommandations d'amélioration ou d'action corrective.

Principes clés

- Maintenir une pratique fiable
- Mener des activités de révision.
- Contrôler les performances de l'organisation.

II.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de disséquer l'architecture d'un Système de Management de la Sécurité des Procédés (PSM), en mettant un accent particulier sur le modèle Risk Based Process Safety (RBPS) du CCPS et ses 20 éléments constitutifs. Nous avons vu que chaque pilier, allant de l'engagement inébranlable de la direction jusqu'à l'apprentissage par l'expérience suite à un incident, agit comme un maillon essentiel de la chaîne de sécurité. Une culture d'entreprise robuste, couplée à une gestion rigoureuse des changements et de l'intégrité des actifs, constitue le rempart ultime contre les défaillances. Forts de cette compréhension théorique et managériale approfondie, nous sommes désormais armés pour analyser l'application concrète de ces concepts sur le terrain, cadre de notre troisième chapitre consacré au complexe industriel AOA.

CHAPITRE III :

Présentation de l'Entreprise AOA

III.1 Introduction

Ce chapitre, ça sera consacré essentiellement de faire une présentation du complexe dont nous avons réalisé notre étude.

Introduction générale :

L'industrie des engrais joue un rôle essentiel dans le développement agricole et économique d'un pays. Elle contribue à l'amélioration de la productivité agricole en fournissant des fertilisants nécessaires à la croissance des cultures. Dans ce contexte, l'Algérie a investi dans plusieurs complexes industriels spécialisés dans la production d'engrais azotés, notamment l'ammoniac et l'urée, afin de répondre aux besoins du marché national et international.

Parmi les principales entreprises opérant dans ce domaine figure El Sharika El Djazairia El Omania Lil Asmida AOA SPA, une société issue d'un partenariat stratégique entre le groupe énergétique Sonatrach et le groupe omanais Suhail Bahwan Group. Cette société a été créée en 2008 dans le but de développer un complexe industriel de production d'ammoniac et d'urée à grande échelle.

Le complexe industriel est implanté dans la zone pétrochimique de Arzew, plus précisément dans la région de Mers El Hadjadj, un pôle industriel stratégique de l'ouest algérien. Cette installation industrielle fait partie des projets majeurs de l'industrie des engrais en Algérie et contribue au renforcement de la chaîne de valorisation du gaz naturel, matière première essentielle pour la production d'ammoniac.

Le complexe AOA possède une capacité de production importante, estimée à plus de 1,35 million de tonnes d'ammoniac par an et environ 2,4 millions de tonnes d'urée granulée, destinées principalement à l'exportation ainsi qu'à la satisfaction des besoins du marché local. Cette production place l'Algérie parmi les acteurs importants du marché international des engrais azotés.

En outre, ce complexe industriel se distingue par l'intégration de technologies modernes et par l'application de normes strictes en matière de sécurité industrielle, de protection de l'environnement et de gestion des procédés. Il constitue ainsi un exemple important de développement industriel et de coopération internationale dans le secteur pétrochimique et des fertilisants.

Dans ce cadre, le stage effectué au sein de ce complexe permet de découvrir le fonctionnement des installations industrielles, les procédés de production de l'ammoniac et de l'urée, ainsi que les pratiques de gestion de la sécurité et des risques dans un environnement industriel à haut niveau de technicité.



***Figure III-1**: Enseigne à l'entrée du complexe AOA*

III.2 Identification de l'établissement

Le complexe industriel d'ammoniac AOA est parmi les plus importantes réalisations industrielles de la chaine de transformation des hydrocarbures, cette usine fait partie d'un partenariat entre l'entreprise OMANIA GROUPE SBGH construction et industries et l'entreprise algérienne SONATRACH établie le 08/04/2008, sous la loi 51/49 exploitée par la société SONATRACH en Algérie. Il a été conçu pour assurer le transport, d'ammoniac sous forme liquide et de l'urée granulée.



***Figure III-2**: Vue générale complexe AOA*

III.3 Situation géographique du complexe

À 45 Km à l'Est d'Oran, il couvre une superficie de 75 hectares et 47 Centiares et se compose notamment Le complexe AOA est situé dans la zone industrielle d'Arzew à MERS el hadjdj l'Est de Bethioua, de plusieurs zones.



***Figure III-3**: Situation géographique du complexe AOA &Vue aérienne*

III.4 Fiche technique du complexe

Localisation : Zone industrielle d'Arzew

Superficie : 75 hectares 47Centiares

Partenaires : SBGH Construction et industrie51% SONATRACH 49%

Date de création : 08 Avril 2008

Date de début de production : Décembre 2012

Alimentation en gaz naturel : RTO (Région Transport Ouest)

Les torches : 5

Capacité de production :

- 02 Unîtes Ammoniac2000T /j chacune
- 02 Unités d'Urée granulée 3500T/J chacune

Température de chargement d'ammoniac : -33 °C

Les installations du Complexe :

Les installations de AOA se composent de :

- Deux unités de production d'ammoniac de capacité de 2 000 tonnes/jour pour chacune.
- Une unité de production de3500 tonnes/jour d'urée en granulés, pour chacune
- Une usine de dessalement d'eau de mer.
- Des installations électriques. 4 GTG
- Un réservoir d'eau d'une capacité de 6000m3,
- Deux bacs de stockage d'ammoniac 35000 M3 chacune
- Un corridor technique comprenant,
- Une conduite d'amenée d'eau de mer,
- Un pipeline de transfert de l'ammoniac,
- Une conduite de retour d'eau de mer,
- Une ligne en fibre optique pour le transport de l'information,
- Des câbles pour le transport de l'énergie électrique.

Les matières premières et les produits finis : Les matières premières nécessaires au complexe des fertilisants de AOA sont :

- Le Gaz Naturel provenant du RTO.
- L'Oxygène et l'Azote (Nitrogène) de l'Air atmosphérique.
- Le Dioxyde de Carbone (CO2) de l'Unité d'extraction du CO2.
- La Vapeur d'Eau générée par la récupération de chaleur et produit aux Niveaux des Chaudières Autonomes.

Les produits finis du Complexe des Fertilisants de AOA sont :

- L'Ammoniac (NH3) stockée à l'état liquide au site et au port.
- L'Urée (CO(NH2)2) granulée stocké eau site et expédiée par camion au port

III.5 Les principales zones du complexe

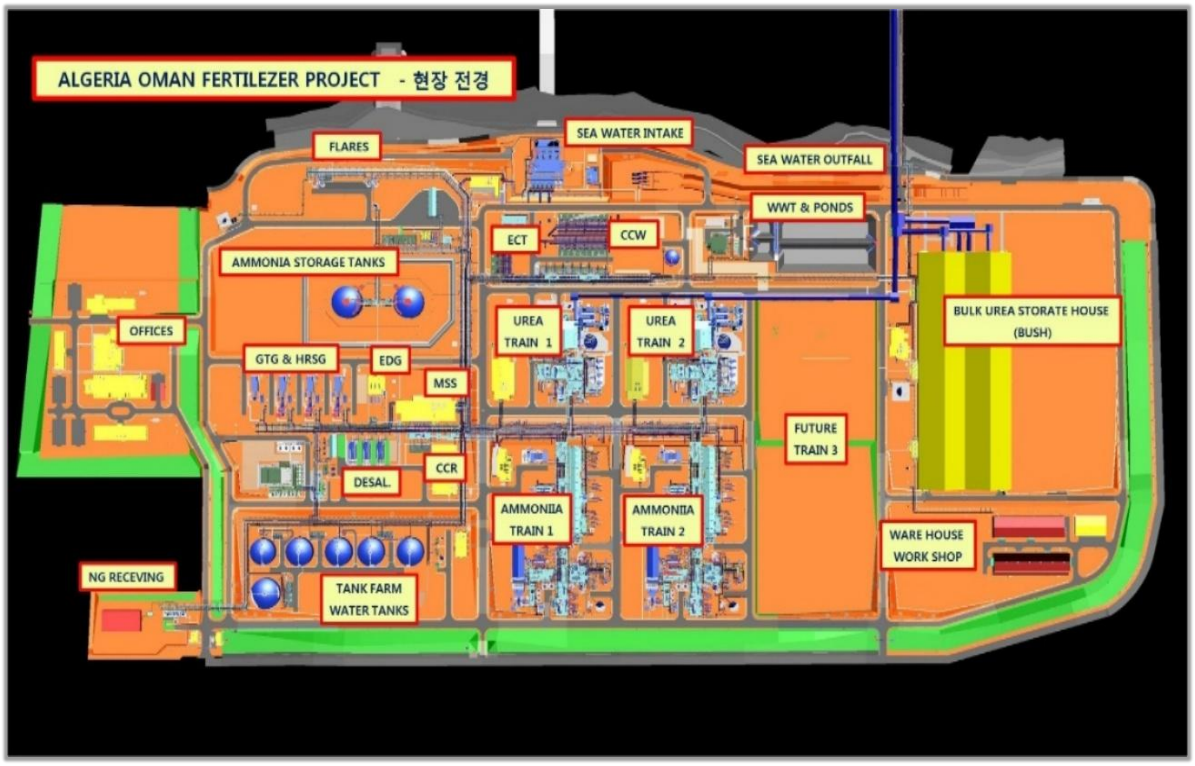


***Figure III-4**: Les Principales zones du complexe*

III.6 Description du processus de fabrication d'ammoniac

III.6.1 Unité d'ammoniac

L'usine AOA a deux unités de production d'ammoniaque liquide avec une capacité égale à 2000 t/j, la production est basée sur le gaz naturel pour obtenir l'hydrogène et l'azote à partir de l'air qui sont les composants principaux, exigés pour la synthèse d'ammoniaque, étant donné que le gaz naturel algérien contient l'hélium, mercure et le soufre, on a ajouté des unités additionnelles pour les extraire. L'hélium aurait eu comme conséquence la production non économique d'ammoniaque et le mercure et soufre ont un effet très corrosif et sa présence affecterait le matériel de la construction. Le gaz naturel est reformé avec la vapeur dans les tubes catalytiques dans le reforming primaire où approximativement 88% d'alimentation de gaz naturel est reformé à l'hydrogène, l'oxyde de carbone, anhydride carbonique selon l'équation générale : CH4+H2O CO+CO2+H2 Un autre reforming aura lieu dans le réacteur secondaire, par l'admission d'air de processus où le CH4 résiduel atteint 0.3% vol et comme source de l'azote. La purification du flux de gaz de processus prend place dans le réacteur de haute température et le réacteur de basse température, la suppression de CO2 se déroule par a MDEA (solution de méthyle Di-éthanol Amine active) après, le CO2 est compressé vers l'unité de production d'urée. Toute trace du CO et CO2 est convertie en méthane dans la section de méthanisation où le gaz de synthèse, soi-disant principalement H2 et N2 est comprimé et refoulé pour

les réacteurs du procédé d'ammoniaque. Le produit de l'ammoniaque est envoyé vers le bac de stockage ou vers la production de l'urée.

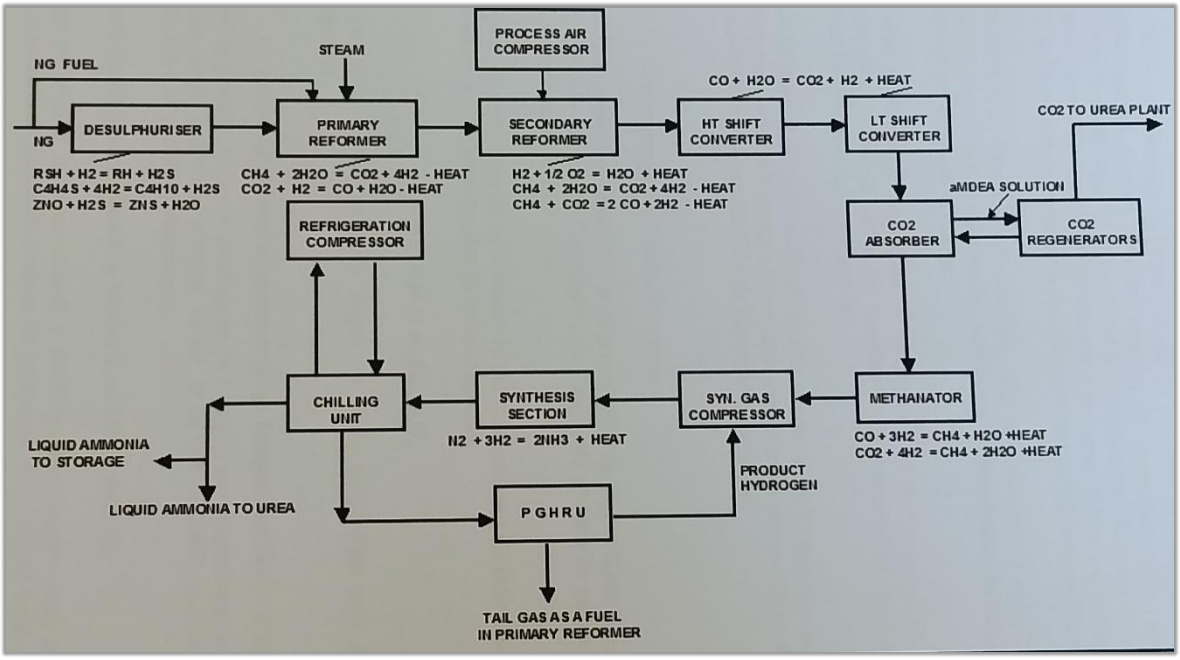


Figure III-5 *: Diagramme bloc procédé d'ammoniac*

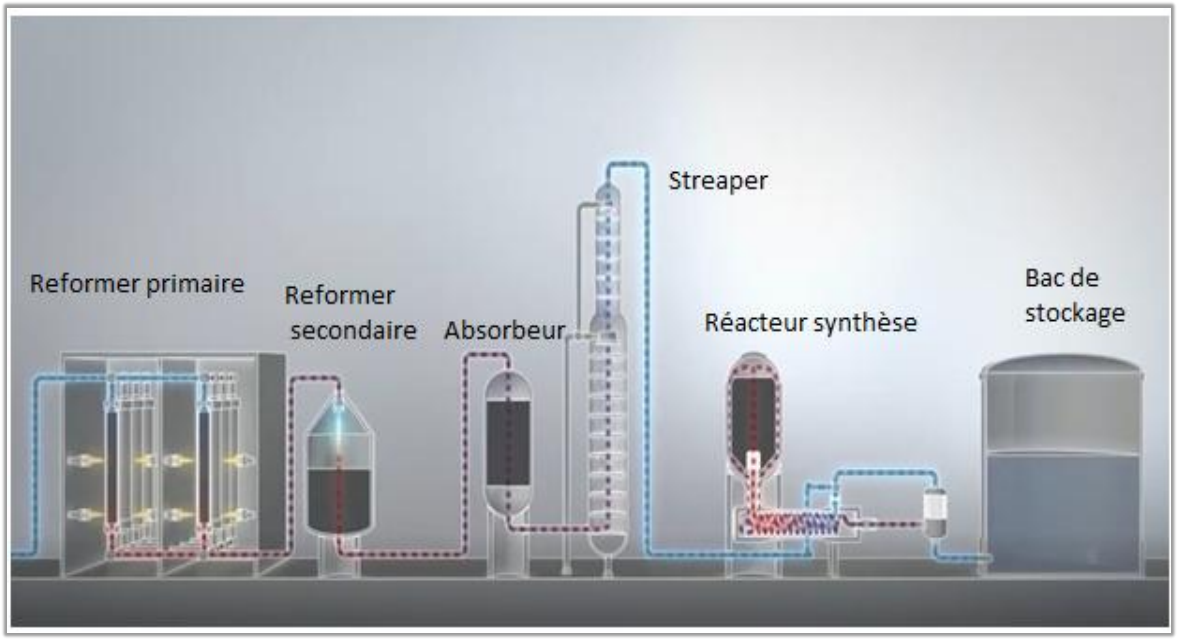


Figure III-6*: Équipements principaux du Process de fabrication d'ammoniac*

III.6.2 Unité d'urée

L'usine AOA comporte deux unités d'urée d'une capacité de production égale à 3500 T /j chacune. Les réactifs (NH3 et CO2), purifiés pour éliminer l'oxyde de carbone (CO) et l'humidité, sont comprimés séparément, puis introduits dans le réacteur, la formation du carbamate y est très rapide,

le réacteur fonctionne adiabatique ment et on doit exercer un contrôle sévère de la température à cause de la corrosion importante par les solutions de carbamate d'ammoniaque au-dessus de 200°C.

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

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

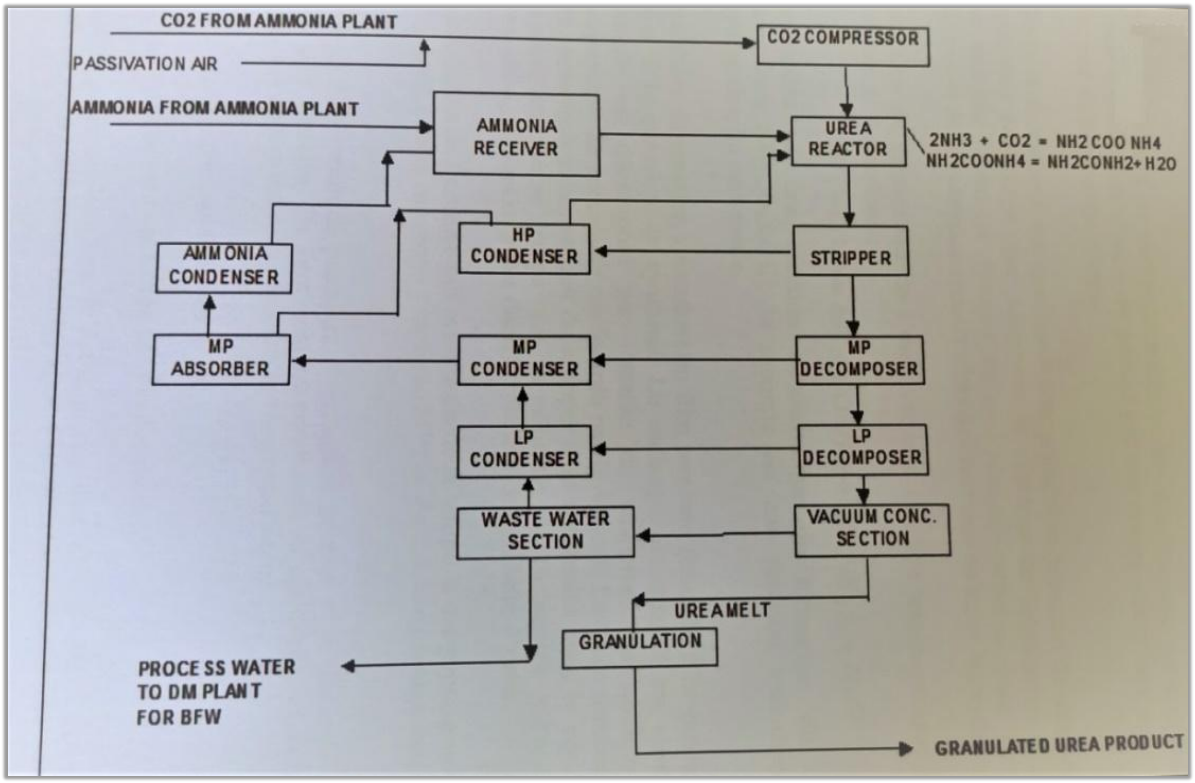


***Figure III-7** : Diagramme bloc procédé d'urée*

III.6.3 Utilités

La production d'ammoniac et d'urée nécessite la présence des utilités pour assurer l'alimentation en produits nécessaires tels que le gaz naturel, la vapeur d'eau, les eaux traités, l'air instrument & service, l'azote et eau de refroidissement. Les utilités se composent des unités suivantes :

III.6.3.1 Une pompe d'eau de mer

L'eau de mer est utilisée dans le complexe pour le refroidissement et le dessalement, Une prise d'eau de mer située à 420 m du rivage avec quatre filtres rotatifs et Cinq pompes verticales d'un débit égale

à 30100 m^3 /h chacune. L'eau de mer et traité en continue par de l'hypochlorite de sodium généré par une unité de chloration.

III.6.3.2 Une section d'eau de refroidissement

L'usine AOA dispose de deux systèmes de refroidissement dont l'un est constitué d'échangeurs à plaques normal et l'autre d'échangeurs de chaleur à plaques essentiel. L'échangeur de chaleur à plaques essentiel est raccordé au système de tour de refroidissement de secours.

III.6.3.3 Une section de production de l'eau dessalée

Les unités de dessalement produisent de l'eau dessalée à partir de l'eau de mer au moyen de la vapeur MP et de la vapeur BP avec les procédés de type MED (Multi-Effet Distillation) et TCD (Thermocompression Distillation). L'eau dessalée produite est stockée dans le réservoir de l'eau dessalée T-101

- Nombre d'unités de dessalement : 03 (14-Z-101 A/B/C) ;
- Capacité de production : 150 Tonnes /h d'eau dessalée ;
- Constructeur : Entropie
- Conductivité eau dessalée < 12 micros.
- Capacité de stockage d'eau dessalée est égale à 12220 m3 ;

III.6.3.4 Une section d'eau déminéralisée et de traitement des condensats

L'unité d'eau déminéralisée produit de l'eau dessalée et des condensats divers.

L'eau dessalée produite et les condensats de procès récupères et les condensats d'air de procès provenant de l'unité d'ammoniaque et de l'unité d'urée à travers le filtre de condensat de procès F-001 A/B, sont stockés dans le réservoir de stockage d'eau dessalée 14-T101.

L'eau dessalée est envoyée à l'échangeur de cation F1A/B/C/D, et à l'échangeur d'anion F2 A/B/C/D par la pompe à eau dessalée et l'eau est traitée pour être déminéralisée.

L'eau déminéralisée et les condensats de turbine et les condensats de vapeur provenant à travers le filtre F-002 A/B sont stockées dans les réservoirs d'eau déminéralisée 15-T-001A/B

L'eau déminéralisée est envoyée à l'affineur à lit mixte, F-3 A/B/C/D/E pour être affinée puis stockée dans les réservoirs de stockage afin d'être utilisée pour l'alimentation des chaudières.

- Nombre d'échangeurs 2B2T (anionique et cationique) : 04 (15-F-001 A/B/C/D + 15-F-002 A/B/C/D)
- Débit de traitement de chaque train 2B2T (2-bed, 2-tower) = 325 m^3/h
- Nombre d'échangeurs mixte (anionique + cationique) : 05 (15-F-003 A/B/C/D/E)
- Débit de traitement de chaque train MBP (mixed bed polisher) = 480 m^3/h
- Capacité de stockage Eau Déminéralisée : 2 x 14290 m^3

- Capacité de stockage Eau Affinée (Polie) : 2 x 14290 m^3

III.6.3.5 Section de production de la vapeur HP et MP

La production de la vapeur joue un rôle très important, en tant que source d'énergie pour le fonctionnement de divers équipements :

- Les turbines des compresseurs : compression de gaz
- Les réchauffeurs de Gaz
- Les turbines des pompes

La vapeur moyenne pression MP et produite par 03 trois chaudières à cogénération capables de produire 75 tonnes/heure de vapeur MP chacune, avec une température de l'ordre de 380°C degrés et une pression de 42 kg/Cm^2(g).

La vapeur haute pression et produite par :

- 02 deux chaudières auxiliaires d'une capacité égale à 150 tonnes/h avec une pression de 115 kg/Cm2 g & 510°C.
- 02 deux chaudières de récupération de chaleur du fluide de procédé en sortie du reforming secondaire (RG Boiler – Waste Heat Boiler) d'une capacité égale à 410 tonnes/h avec une pression de 115 kg/Cm2 g & 510°C.

III.6.3.6 Système d'eau de lutte contre l'incendie

Deux cuves pour l'eau de lutte contre l'incendie (conformément à la réglementation algérienne) et d'eau dessalée (chacune d'une capacité de 50 % du besoin total) sont envisagées pour le projet. La cuve de réserve d'eau de lutte contre l'incendie aura une capacité d'environ 15 000 m3, conformément aux exigences des autorités concernées. L'eau dessalée servira d'eau d'extinction d'incendie.

La capacité des cuves combinées devra correspondre à la somme des utilisations suivantes :

- 12 heures de stockage d'eau de lutte contre l'incendie (sur la base d'un besoin en eau de 1 200 m3/h soit environ 15 000 m3), conformément à la réglementation algérienne en matière d'incendie et de sécurité, qui sert de référentiel réglementaire.
- 24 heures de stockage d'eau dessalée, sur la base d'une consommation en eau de 125 % de la consommation normale.

Deux pompes Jockey d'une capacité de 50 m3/h chacune servira à maintenir la pression dans le collecteur d'eau de lutte contre l'incendie. Les moteurs des pompes à eau d'extinction et une pompe Jockey seront connectés à l'approvisionnement énergétique d'urgence des générateurs de secours (EDG).

Le complexe également deux pompes à eau de mer spécifiques, d'une capacité de 600 m3/h chacune, en complément du système d'extinction d'incendie décrit ci-dessus, en cas de coupure de courant due à l'incendie

III.6.3.7 Unité d'alimentation et de distribution de gaz Naturel

L'usine a besoin de différents gaz pour assurer le fonctionnement des unités d'ammoniac et d'urée :

- De l'air industriel,
- Des gaz inertes,
- De l'azote.

L'air industriel, pour les instruments et le fonctionnement des installations, sera généré par un système centralisé sur le site. Il sera également possible d'alimenter le site en air industriel à partir du compresseur à air de l'unité d'ammoniac. Le stockage d'air industriel correspondra à une réserve de 30 minutes.

Les gaz inertes nécessaires au projet seront fournis par externalisation, car l'azote liquide est disponible en grande quantité dans la zone industrielle d'Arzew.

Par ailleurs, deux cuves de stockage d'azote liquide, de capacité unitaire de 100 m3, fourniront l'azote nécessaire au fonctionnement et aux interruptions de production. La pureté de l'azote stocké sera de plus de 99,99 % et permettra la préservation des catalyseurs. Un vaporiseur sera associé aux deux cuves de stockage d'azote liquide.

III.6.3.8 Section d'alimentation et de prétraitement de Gaz naturel

L'usine d'AOA et alimentée en gaz naturel a travers une conduite de gaz à partir du terminal départ RTO-SONATRACH jusqu'au terminal d'arrivée ou il sera traité dans l'absorbeur afin d'éliminé les traces de mercure.

- Capacité d'alimentation plus de 200 000 Nm3 /h
- Teneur en Mercure inférieur à 0,01 Micro gr/Nm3
- Pression > 42 Kg/Cm2 g

III.6.3.9 Section de traitement des eaux usées

Le system de traitement des eaux usées sont constituées de :

- Un Système de séparation d'huile
- Un système de collecte et traitement des eaux d'assainissement
- Un système d'égalisation et neutralisation des eaux chimiques
- Un système de stripping pour les eaux ammoniacal
- Un système de traitement biologie

III.6.3.10 Section de production d'électricité

L'usine d'AOA dispose de quatre générateurs à turbine à gaz GTG's et de trois générateurs diesel de secours (EDG).

Chaque GTG produit une énergie électrique de 23,28 MW et de 11,0 Kilovolt dans les conditions :

- Air : température égale à 45°C et Humidité HR égale à 76%,
- PCI combustible égale à 8323 Kcal/Nm3.

Chaque GTG produit une énergie électrique de 29,07 MW et de 11,0 Kilovolt dans les conditions :

- Air : température égale à 15°C et Humidité HR égale à 60%,
- PCI combustible égale à 8898 Kcal/Nm3.

Chaque EDG produit une énergie électrique de 03 MVA et de 5,5 Kilovolt dans les conditions :

- Air : température égale à 45°C et Humidité HR égale à 100%,

III.7 Direction HSE

La **Direction HSE** au sein d'AOA joue un rôle pivot en assurant la protection constante du personnel et l'intégrité des installations du complexe de production d'engrais. Sa mission repose sur une stratégie proactive de prévention des risques industriels, mise en œuvre via des inspections régulières, des programmes de sensibilisation rigoureux et une signalétique de sécurité omniprésente. En situation d'urgence, cette direction mobilise une équipe spécialisée équipée de moyens de pointe, incluant des systèmes anti-incendie et des services médicaux dédiés. Elle garantit ainsi la prise en charge des premiers soins vitaux sur site avant toute évacuation. Enfin, elle consolide ses actions par une coordination étroite et continue avec l'administration de la zone industrielle d'Arzew pour maintenir un environnement de travail sécurisé et conforme aux normes en vigueur.



***Figure III-8**: Direction HSE*

III.8 Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons pu examiner les principales caractéristiques et activités de l'entreprise. Nous avons mis en évidence sa structure organisationnelle, ses valeurs fondamentales ainsi que ses objectifs en matière de santé, sécurité et environnement. L'entreprise démontre un engagement clair envers la protection de la santé et de la sécurité de ses employés, ainsi que la préservation de l'environnement. Elle met en place des politiques et des procédures rigoureuses pour garantir le respect des normes et réglementations en vigueur, tout en favorisant une culture de la sécurité au sein de l'organisation.

CHAPITRE IV :

Méthodologie d'implantation du système PSM au sein du complexe AOA

IV.1 Introduction

La transition d'une théorie robuste vers une pratique efficace sur le terrain requiert une stratégie méthodique, faute de quoi les meilleures procédures restent inopérantes. Ce chapitre détaille la stratégie d'exécution et la méthodologie adoptées pour le déploiement opérationnel du Système de Management de la Sécurité des Procédés (PSM) au sein d'un complexe industriel. Nous y développerons une approche structurée et évolutive en cinq phases distinctes : l'évaluation et le diagnostic de l'existant, la préparation organisationnelle, le développement des processus documentaires, le déploiement concret sur site, et enfin, l'audit pour l'amélioration continue. Cette feuille de route est la clé de voûte pour garantir l'adhésion du personnel et l'intégration du PSM dans l'ADN opérationnel de l'entreprise.

Méthodologie / Stratégie d'exécution

- Phase 1 : Évaluation et Diagnostic (Phase 1 : Assessment & Diagnosis)
- Phase 2 : Préparation et Élaboration (Phase 2 : Preparation & Elaboration)
- Formation au système PSM (PSM System Training)
- Formation spécifique (Specific Training)
- Phase 3 : Développement (Phase 3 : Development)
- Phase 4 : Déploiement du système (Phase 4 : System Deployment)
- Phase 5 : Audit et Amélioration (Phase 5 : Audit and Improvement)

IV.2 Phase 1 : Évaluation et Diagnostic *[Assessment & Diagnosis]*

IV.2.1 Définition de l'évaluation :

Développement d'un outil de diagnostic basé sur les 20 éléments du RBPS du CCPS et adapté aux opérations d'AOA

- Outil de diagnostic approuvé

IV.2.2 Analyse des écarts :

Identification des écarts et des opportunités d'amélioration à l'aide de l'outil de diagnostic convenu, en effectuant des revues documentaires et des entretiens avec le personnel clé

- Rapport de diagnostic incluant une feuille de route préliminaire d'amélioration

IV.2 Phase 2 : Préparation et Élaboration *[Preparation & Elaboration]*

Une phase continue qui se concentrera sur la communication et l'engagement à l'échelle de l'organisation dans toutes les phases du PSM, en prenant en considération les conclusions et les

recommandations de la Phase 1. Pour mener à bien cette phase, un plan d'action sera élaboré et convenu avec AOA ; il comprendra :

- L'élaboration d'un plan d'exécution pour la phase de développement et la définition des rôles et des responsabilités ;
- L'illustration de l'importance du PSM et de sa valeur ajoutée pour une organisation ;
- Des campagnes sur la culture de la sécurité des procédés — l'une au début du projet et l'autre vers la fin — qui seront diffusées via diverses méthodes telles que des bulletins d'information (newsletters), des sessions de formation-déjeuner (lunch and learn), des présentations, des minutes sécurité (safety moments) lors des réunions officielles, et des communiqués ;
- Des indicateurs de performance seront élaborés et convenus avec AOA afin de mesurer l'évolution de la culture de la sécurité des procédés au cours des différentes étapes du projet ;
- La formation au PSM et les formations spécifiques requises pour la mise en œuvre du système de gestion de la sécurité des procédés au sein d'AOA.

***Tableau IV-1** : Les formations*

Formation générale au système PSM
Structure et éléments du système PSM - 3 jours (2 groupes)
Mise en œuvre du système PSM - 3 jours (2 groupes)
Identification des indicateurs clés de performance (KPI) du PSM - 1 jour (2 groupes)
Formation spécifique
Analyse des risques liés aux procédés (HAZOP) - 1 jour (3 groupes)
Système de gestion de l'intégrité des actifs - 1 jour (2 groupes)
Classification des incidents de sécurité des procédés - 1 jour (2 groupes)
Enquête sur les incidents de sécurité des procédés - 1 jour (2 groupes)
Formation sur l'outil d'audit PSM - 1 jour (2 groupes)
Formation à la certification des auditeurs internes PSM - 1 jour (2 groupes)

IV.3 Phase 3 : Développement *[Development]*

Définir le système PSM d'AOA conformément au plan d'exécution convenu lors de la phase de Préparation et d'Élaboration. Cela comprendra :

- Le développement d'un système PSM global pour les opérations d'AOA, sa structure, ses éléments ainsi que leurs objectifs, exigences, interactions, rôles et responsabilités ;
- La définition des processus / flux de travail de niveau 1 (Tier 1) ainsi que des rôles et responsabilités, et le développement des procédures de support, de la documentation et des indicateurs clés de performance (Tier 1) associés. La documentation de (Tier 2) ne fait pas partie de ce périmètre ;
- L'estimation de la charge de travail et des ressources requises pour la mise en œuvre du PSM, ainsi que l'élaboration d'un calendrier détaillé de mise en œuvre.

***Tableau IV-2** : Répartition des procédures du système PSM par niveau [Tier 1 et Tier 2]*

Tier 1	Tier 2
1. Procédure d'analyse des risques de processus 2. Organigramme avec définition des rôles et responsabilités 3. Procédure de gestion des risques 4. Procédure de gestion du changement 5. Procédure d'intervention d'urgence 6. Procédure d'investigation sur les incidents 7. Procédure d'évaluation des risques opérationnels 8. Procédure d'opérations extraordinaires	1. Procédure de gestion de la maintenance 2. Procédure de gestion des inspections 3. Procédure de gestion des opérations 4. Procédure de formation du personnel 5. Procédure d'audit 6. Procédure de gestion des sous-traitants 7. Procédure de contrôle des travaux 8. Procédure de gestion de l'isolement 9. Procédure de gestion des inhibitions/dérogations

IV.4 Phase 4 : Déploiement du système *[System Deployment]*

L'objectif de cette phase est de mettre en œuvre les processus développés lors des phases 2 et 3, conformément au calendrier détaillé de mise en œuvre convenu. Des sessions de formation et des campagnes de déploiement des nouveaux processus seront menées auprès de l'ensemble du personnel concerné.

Cette phase comprendra les éléments suivants :

- Une équipe d'assistance AIE ;
- L'élaboration de plans de projet intégrés et détaillés pour chaque périmètre d'amélioration convenu ;
- Le développement de la structure organisationnelle et son déploiement ;
- L'accompagnement (*coaching*) et la formation des cadres dirigeants à la gestion de la sécurité et des risques ;
- La formation du personnel opérationnel à la gestion de la sécurité et des risques ;
- Production régulière de rapports d'avancement ;
- Le soutien à AOA dans la résorption des écarts (*gap closure*), y compris la vérification des actions clôturées et leur validation finale (*sign-off*) ;
- D'autres activités convenues avec AOA pour la durée de la Phase 4.

IV.5 Phase 5 : Audit et Amélioration *[Audit and Improvement]*

Réaliser un audit sur le nouveau système PSM d'AOA. AIE sera chargée de mener un audit PSM qui donnera lieu à un rapport d'audit PSM. Cette phase sera réalisée par une équipe n'ayant pas participé aux phases de développement et de mise en œuvre.

Pour réaliser cet audit, l'outil de diagnostic utilisé lors de la Phase 1 (Évaluation et Diagnostic) servira de base. Cela garantit une approche cohérente à la fois pour l'analyse des écarts et pour la phase d'amélioration continue.

***Tableau IV-3** : Planning du projet*

Nom de la tâche
➢ Mise en œuvre du système de gestion de la sécurité des procédés (PSM) AOA Spa ➢ Réunion de lancement ❖ **Phase 1 : Évaluation et diagnostic** ➢ Registre des demandes de données initiales ➢ POINT D'ATTENTE : Fourniture des données

- Examen des données
- Développement de l'outil de diagnostic d'évaluation des écarts
- POINT D'ATTENTE : Examen de l'outil de diagnostic d'évaluation des écarts
- Mise à jour et publication du développement final de l'outil de diagnostic d'évaluation des écarts
- Registre des demandes de données d'évaluation des écarts
- POINT D'ATTENTE : Collecte des données d'évaluation des écarts
- Examen documentaire
- POINT D'ATTENTE : Entretiens
- Projet de rapport de diagnostic détaillé et feuille de route
- POINT D'ATTENTE : Atelier client
- POINT D'ATTENTE : Examen et commentaires du client
- Élaboration et publication du rapport de diagnostic final détaillé

❖ **Phase 2 : Préparation et élaboration**

- Formation au système PSM
- Structure et éléments du système PSM - 3 jours (2 groupes)
- Mise en œuvre du système PSM - 3 jours (2 groupes)
- Identification des indicateurs clés de performance (KPI) du PSM - 1 jour (2 groupes)
- Élaboration du plan d'engagement du personnel
- POINT D'ARRÊT : Examen du plan d'engagement du personnel
- Mise à jour et publication du plan d'engagement du personnel final
- Élaboration du matériel pour le plan d'engagement
- POINT D'ARRÊT : Examen du matériel du plan d'engagement
- Mise à jour et publication du matériel du plan d'engagement
- POINT D'ARRÊT : Exécution du plan d'engagement
- Élaboration du plan et du matériel de la campagne de culture de la sécurité des procédés (campagne d'information - bulletins d'information, lettres d'information, présentations, intégration de la sécurité dans les réunions formelles, bulletins)
- POINT D'ARRÊT : Examen du plan et du matériel de la campagne de culture de la sécurité des procédés
- Mise à jour et publication du plan et du matériel de la campagne de culture de la sécurité des procédés
- POINT D'ARRÊT : Lancement de la première campagne de culture de sécurité des procédés (Partie 1 sur 2)
- Plan d'exécution pour la phase de développement
- POINT D'ARRÊT : Révision du plan d'exécution pour la phase de développement
- Mise à jour et publication du plan d'exécution final pour la phase de développement
- Développement du modèle de rapport des indicateurs clés de performance (KPI) de gestion de la sécurité des procédés
- POINT D'ARRÊT : Révision du modèle de rapport des KPI de gestion de la sécurité des procédés
- Mise à jour et publication du modèle de rapport des KPI de gestion de la sécurité des procédés - Formation spécifique
- Analyse des risques liés aux procédés (HAZOP) - 1 jour (3 groupes)
- Système de gestion de l'intégrité des actifs - 1 jour (2 groupes)
- Classification des incidents liés à la sécurité des procédés - 1 jour (2 groupes)
- Enquête sur les incidents liés à la sécurité des procédés - 1 jour (2 groupes)
- Formation sur l'outil d'audit PSM - 1 jour (2 groupes)

- Formation à la certification des auditeurs internes PSM - 1 jour (2 groupes)

❖ **Phase 3 : Développement**

- Norme de gestion de la sécurité des procédés AOA
- POINT D'ARRÊT : Examen de la norme de gestion de la sécurité des procédés AOA
- Mise à jour et publication de la version finale de la norme de gestion de la sécurité des procédés AOA
- Élaboration d'un calendrier de mise en œuvre détaillé pour la phase 4 avec chevauchement de la phase 3
- POINT D'ARRÊT : Examen par le client du calendrier de mise en œuvre détaillé pour la phase 4 avec chevauchement de la phase 3
- Mise à jour et publication du calendrier de mise en œuvre détaillé final pour la phase 4 avec chevauchement de la phase 3
- Développement de la documentation de support de niveau 1 pour la gestion de la sécurité des procédés AOA
- POINT D'ARRÊT : Examen de la documentation de support de niveau 1 pour la gestion de la sécurité des procédés AOA
- Mise à jour et publication de la documentation de support finale de niveau 1 pour la gestion de la sécurité des procédés AOA

❖ **Phase 4 : Déploiement du système**

- POINT D'ARRÊT : Déploiement du système PSM (formations pour le déploiement sur les processus et procédures modifiés)
- POINT D'ARRÊT : Rapports sur les indicateurs clés de performance (KPI) de la gestion de la sécurité des procédés
- Rapports d'avancement du déploiement de la gestion de la sécurité des procédés
- POINT D'ARRÊT : Mener la deuxième campagne de sensibilisation à la culture de la sécurité des procédés (Partie 02 sur 02)

❖ **Phase 5 : Audit et développement**

- Développement de l'outil d'audit de gestion de la sécurité des procédés
- POINT D'ATTENTE : Examen de l'outil d'audit de gestion de la sécurité des procédés
- Mise à jour et publication de l'outil d'audit final de gestion de la sécurité des procédés
- Registre des demandes de documents
- POINT D'ATTENTE : Collecte de données
- Examen documentaire
- POINT D'ATTENTE : Entretiens
- Élaboration du rapport d'audit de gestion de la sécurité des procédés
- POINT D'ATTENTE : Examen du rapport d'audit de gestion de la sécurité des procédés
- Mise à jour et publication du rapport d'audit final de gestion de la sécurité des procédés

IV.6 Conclusion

Pour conclure, la mise en œuvre d'un projet de l'envergure du PSM ne s'improvise pas. La démarche en cinq phases présentée dans ce chapitre assure non seulement l'identification précise des écarts par rapport aux standards internationaux, mais garantit également l'implication active des équipes opérationnelles à chaque étape de la transition. Un système PSM bien déployé est un processus vivant qui s'adapte et requiert des audits réguliers pour ne pas devenir obsolète. Les conséquences directes d'une lacune dans cette phase de développement et de déploiement des procédures peuvent s'avérer désastreuses. C'est précisément ce que nous illustrerons dans le chapitre final, à travers l'investigation du cas pratique de la fuite d'ammoniac sur la pompe P-601.

CHAPITRE V : Application du PSM- Cas pratique – investigation d'accident de fuite D'ammoniac pompe P-601

CHAPITRE V : Application du PSM - Cas pratique - Enquête sur un incident de fuite D'ammoniac pompe P-601

V.1 Introduction

V.1.1 Préambule

Dans ce cas pratique, nous avons choisi de nous appuyer sur un scénario d'incident majeur réel survenu au sein du complexe AOA Spa. Nous mettrons ensuite en œuvre l'élément n° 17 « Investigation d'incident » afin d'évaluer les barrières de prévention et d'atténuation de l'installation (mitigation). Ce cas met en évidence l'interdépendance entre plusieurs éléments du système de gestion de la sécurité des procédés (Process Safety Management – PSM) selon le modèle du CCPS (Center for Chemical Process Safety), à savoir :

1. Compliance with Standards (Conformité aux normes)
2. Workforce Involvement (Implication du personnel)
3. Operating Procedures (Procédures opératoires)
4. Asset Integrity and Reliability (Intégrité et fiabilité des actifs)
5. Training and Performance Assurance (Formation et assurance de la performance)
6. Operational Readiness (Préparation opérationnelle)
7. Emergency Management (Gestion des urgences)
8. Auditing (Audit))

L'objectif est d'illustrer concrètement les enjeux de notre thématique : si le cadre théorique du PSM a pour vocation d'ériger des lignes de défense robustes, l'analyse de notre cas pratique révèle à quel point des défaillances lors de la phase de déploiement peuvent neutraliser ces défenses en cascade, transformant une intervention technique ordinaire en un scénario critique de perte de confinement primaire (LOPC). Pour illustrer ce propos, nous avons retenu un équipement névralgique de transfert d'ammoniac liquide : la pompe P-601.

V.1.2 Le pilier « Apprendre de l'expérience » (Learning from Experience)

Le pilier « Apprendre de l'expérience » constitue le quatrième pilier du modèle Risk Based Process Safety (RBPS) élaboré par le CCPS. Ce pilier vise à exploiter les informations issues des incidents, des audits et des revues de performance pour améliorer en continu la gestion des risques. Il est soutenu par quatre éléments clés :

- L'investigation d'incidents
- Les mesures et indicateurs (metrics)
- L'audit

- La revue de direction

V.1.3 L'élément n° 17 – « Investigation d'incidents »

(Référence : Guidelines for Implementing Process Safety Management)

L'investigation d'incidents est un processus formel permettant de signaler, de suivre et d'analyser les événements liés à la sécurité des procédés. Son objectif n'est pas de blâmer le personnel, mais d'identifier les causes systémiques et de formuler des recommandations pour éviter la répétition d'événements similaires.

V.1.4 Niveaux d'analyse

La profondeur de l'investigation est déterminée par la gravité réelle ou potentielle de l'incident :

1. **Analyse des causes racines (Root Cause Analysis – RCA)** : analyse approfondie réservée aux accidents graves ou à fort potentiel de gravité, visant les causes fondamentales (système de gestion, culture organisationnelle).
2. **Analyse des causes apparentes (Apparent Cause Analysis – ACA)** : analyse moins formelle pour les incidents aux conséquences moindres.
3. **Analyse des tendances (Trend Only)** : pour les incidents fréquents mais peu sévères ; les données sont collectées afin d'identifier des schémas récurrents sans investigation individuelle systématique.

V.1.5 Principes clés de l'investigation

1. Pratique fiable et cohérente : procédures écrites et personnel formé.
2. Identification des incidents et des « quasi-accidents » (near misses) : encourager le signalement des événements à faible coût d'apprentissage.
3. Rigueur technique : collecte de preuves et utilisation de méthodes structurées.
4. Suivi des résultats : mise en place d'une base de données des recommandations jusqu'à leur clôture.
5. Analyse des tendances : détection des problèmes chroniques.

L'efficacité de cet élément dépend très fortement de la culture de sécurité de l'organisation.

V.2 Contexte Opérationnel

La section de réfrigération où notre étude a été réalisée est la dernière section du processus de fabrication d'ammoniac liquide à -33 °C avant le stockage d'ammoniac. Nous l'avons choisie en raison

des risques majeurs de dispersion nuage toxique. Voici une brève description de cette section avant d'aborder l'incident sur la pompe P601.

Circuit de réfrigération

Le circuit de réfrigération a pour fonction principale d'assurer les diverses tâches de refroidissement nécessaires au sein de la boucle de synthèse d'ammoniac. Sa mission première est de condenser l'ammoniac produit dans le convertisseur (01-R-501). Il assure également le refroidissement du gaz d'appoint (make-up gas), du gaz de purge et des gaz inertes.

Note : Référence description processus : document numéro 6423MB070-01-1010000_Rev00_01*.AOA.

Équipements principaux

Le système repose sur une configuration matérielle spécifique comprenant :

- **Six refroidisseurs (chillers) :** dont deux unités intégrées à l'unité de granulation d'urée, fonctionnant à deux niveaux de pression distincts.
- **Le compresseur d'ammoniac :** assurant la circulation du fluide frigorigène.
- **Le condenseur d'ammoniac (01-E-601 A/B) :** pour la liquéfaction du fluide après compression.
- **L'accumulateur d'ammoniac (01-V-603) :** servant de réservoir tampon pour le système.
- **Ballons séparateurs (K.O. drums) :** deux ballons (01-V-442/443) protègent le compresseur contre l'entraînement de gouttelettes de liquide.

Niveaux de fonctionnement

Le circuit opère selon deux paliers de température pour optimiser l'échange thermique :

- **Niveau supérieur :** le premier refroidisseur d'ammoniac (01-E-506) fonctionne à une température de 6 °C, ce qui correspond à une pression de 4,4 kg/cm² (g).
- **Niveau inférieur :** le deuxième refroidisseur (01-E-507), ainsi que les refroidisseurs de gaz de purge (01-E-508) et de mise à l'évent des inertes (01-E-602), fonctionnent à une température de saturation de -4,0 °C, correspondant à une pression d'environ 2,74 kg/cm² (g).

L'ammoniac liquide produit est finalement dirigé vers un ballon de détente (*flash vessel* 01-V-602) avant d'être envoyé vers le stockage ou l'unité d'urée via les pompes de produit (01-P-601 A/B/C)

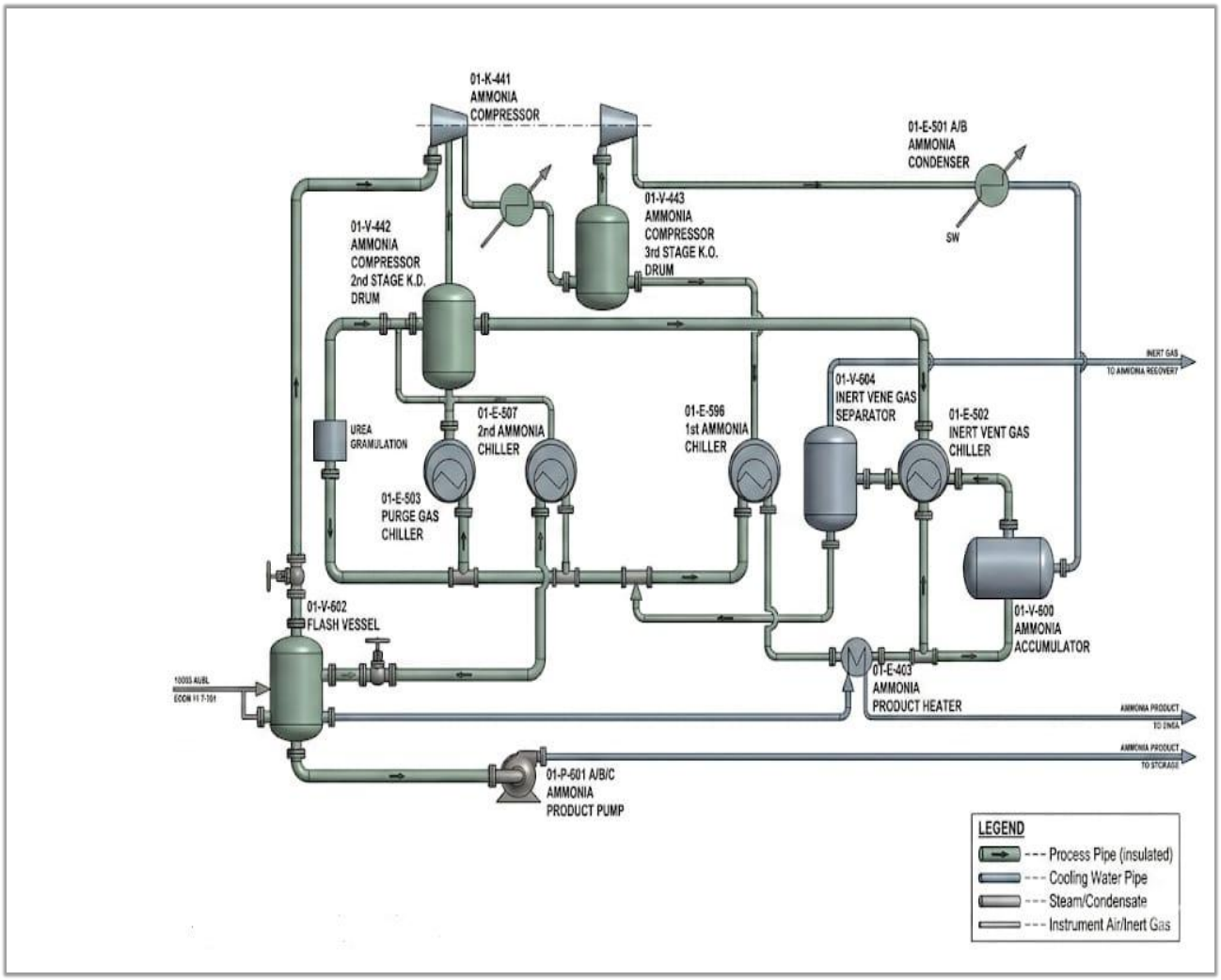


***Figure V-1**: la section de réfrigération NH3*

V.2.1 Description de l'équipement étudié P-601 A/B/C

L'unité ammoniac utilise trois pompes centrifuges **Ebara** (modèles 100X80UCWM 25N) référencées **P-601 A/B/C**. Ces pompes assurent le transfert de l'ammoniac liquide (NH_3) du ballon de réception V-602 vers le stockage principal.

- **Conditions de service** : température **−33°C**, pression de refoulement élevée.
- **Configuration** : deux pompes en service, une en « stand-by »



***Figure V-2**: Les pompes A/B/C*

Tableau V-1 *: Fiche technique simplifiée (Ebara)*

Paramètre	Valeur
Débit nominal	83,4 m³/h
Hauteur manométrique	75 m
Pression aspiration	0,6 kg/cm²G
Pression refoulement	5,7 kg/cm²G
Température de pompage	−33 °C
Densité NH_3 liquide	0,681
Étanchéité	API 682 3ème éd., Catégorie 2

V.2.2 Système d'Étanchéité Double (Plan API 53A & 62)

Pour assurer le confinement total de l'ammoniac liquide NH3, fluide caractérisé par sa haute toxicité et sa basse température d'ébullition (-33°C), la pompe **P-601** utilise une configuration d'étanchéité de haute sécurité conforme aux normes **API 682** (norme relative aux systèmes d'étanchéité pour pompes centrifuges).

V.2.2.1 Configuration de la Garniture (Double Seal)

Le système est de type **Double Garniture Mécanique**, configurée pour éliminer tout risque de fuite de produit vers l'atmosphère.

- **Garniture Interne (Côté Process) :** Assure l'étanchéité entre le corps de la pompe et la chambre de barrage.
- **Garniture Externe (Côté Atmosphère) :** Assure l'étanchéité entre la chambre de barrage et l'extérieur. Cette disposition crée une barrière de sécurité redondante. En fonctionnement normal, les faces de frottement sont lubrifiées par un fluide intermédiaire (le glycol), évitant ainsi la vaporisation brutale de l'ammoniac entre les faces.

V.2.2.2 Plan API 53A : Système de Fluide de Barrage Pressurisé

Le maintien de l'intégrité de l'étanchéité repose sur l'application du **Plan API 53A**.

- **Fonctionnement :** Un réservoir externe contient un fluide de barrage (mélange eau-glycol). Ce réservoir est pressurisé par une source d'azote externe N2.

- **Différentiel de Pression :** Selon les procédures opérationnelles de l'unité, la pression du glycol est maintenue à environ **0,2 kg/cm² au-dessus** de la pression de refoulement de la pompe.
- **Sécurité :** Ce différentiel positif garantit que si une défaillance survient sur la garniture interne, le glycol migre vers le process (liquide inerte) au lieu que l'ammoniac ne s'échappe vers la chambre de barrage.

V.2.2.3 Plan API 62 : Système de Quench (Rinçage externe)

En complément du Plan 53A, un **Plan API 62** est installé côté atmosphérique.

- **Utilité Thermique :** Étant donné que l'ammoniac est pompé à **-33°C**, tout contact de l'humidité ambiante avec les parties froides de la garniture provoquerait la formation de givre.
- **Application :** Une injection d'azote sec (Quench) à une température régulée (env. 18°C) est maintenue en continu. Ce balayage gazeux prévient la congélation des faces de la garniture externe et l'endommagement des composants élastomères.

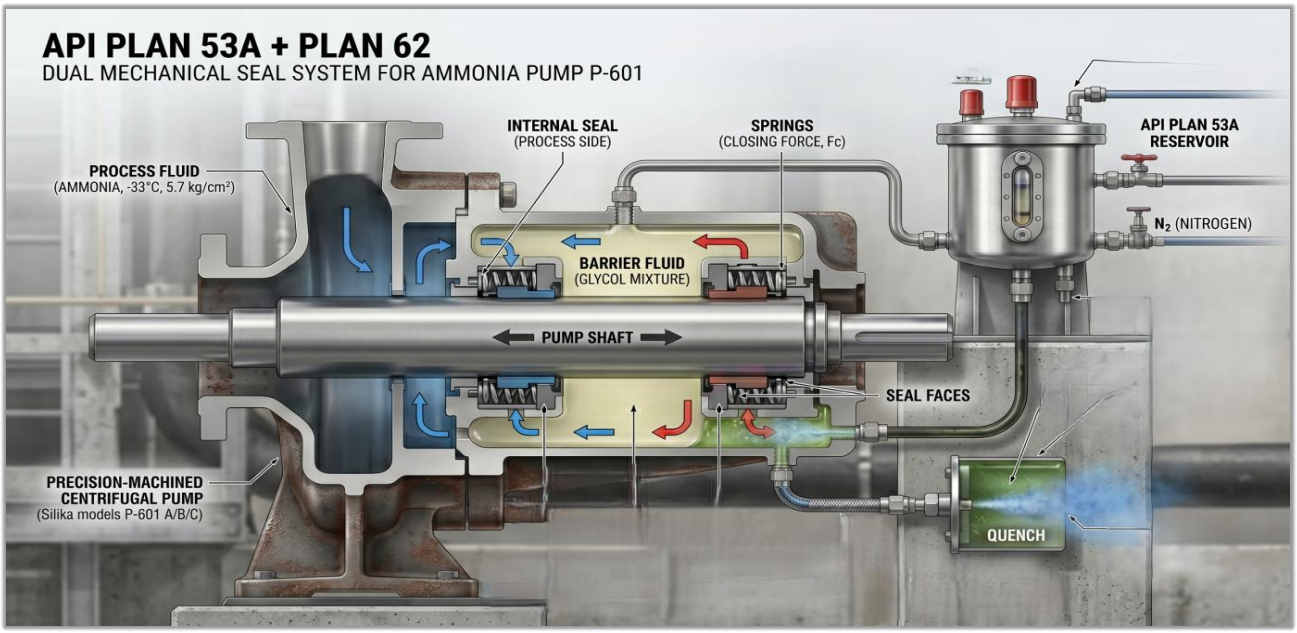


***Figure V-3** : Schéma de principe de l'étanchéité de la pompe P-601 : Circuit du fluide de barrage (API 53A) et système de rinçage Quench (API 62).*

V.3 Scénario d'incident : Perte de confinement d'ammoniac LOPC post-maintenance

V.3.1 Description du Scénario

La pompe P-601A a été mise à l'arrêt préventif suite à la détection d'une défaillance de son système d'étanchéité mécanique. Un opérateur de section a identifié cette anomalie grâce à deux indicateurs clés : l'apparition de bulles dans le niveau de glycol (LG) et une augmentation de la pression supérieure à 0,2 kg/cm². Ces observations ont conduit à l'orientation de la pompe vers les ateliers de maintenance pour le remplacement de la garniture mécanique.

Après le remplacement de la garniture mécanique, la pompe P-601A a été remise en service. Bien que la procédure opératoire standard (SOP) en vigueur ait été scrupuleusement suivie, celle-ci présentait une lacune systémique critique : l'absence d'un test d'étanchéité à l'azote (leak test) avant l'introduction de l'ammoniac dans le circuit. Cette omission a directement et fatalement contribué à la survenue de l'incident de fuite d'ammoniac.

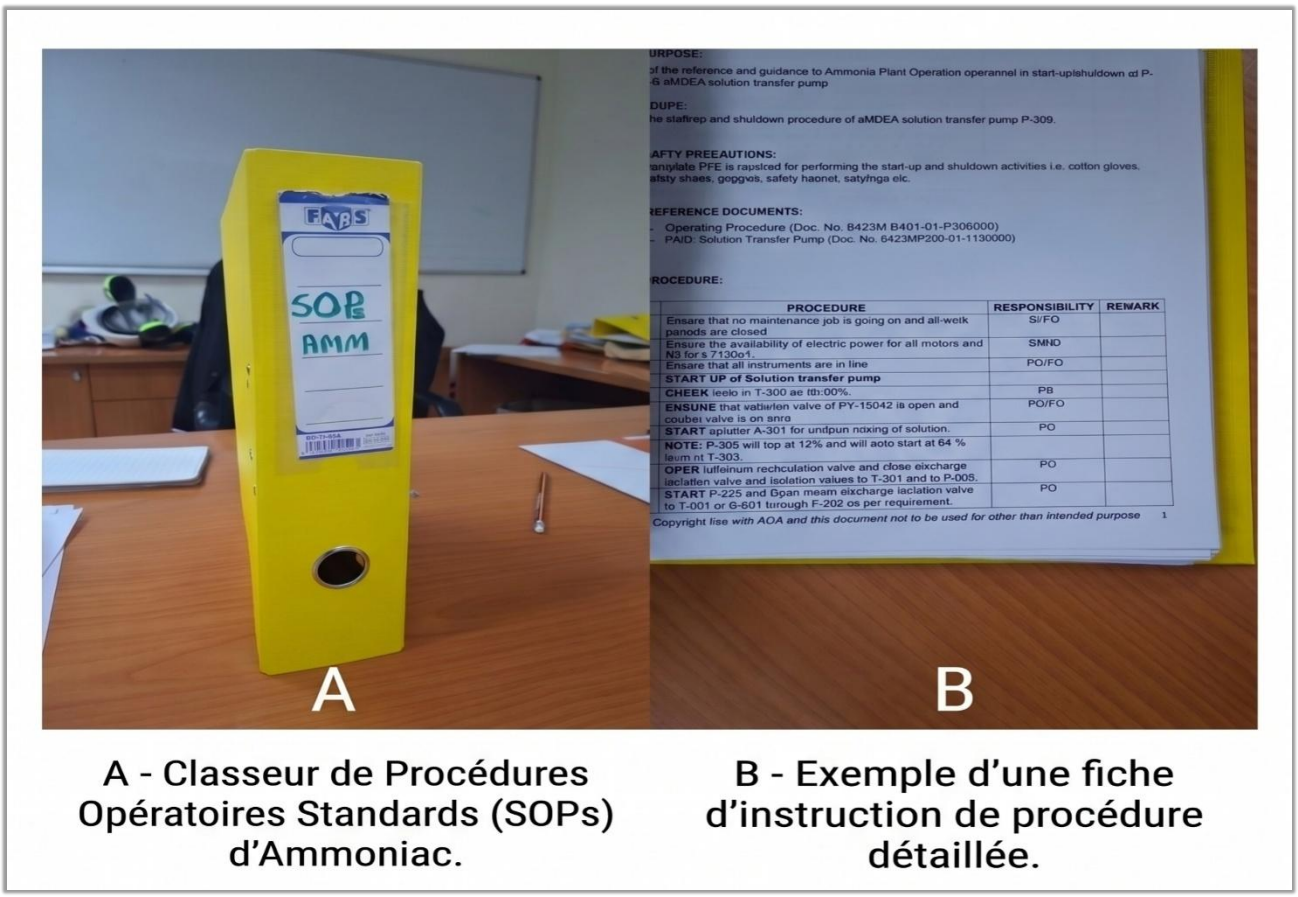


Figure V-4 : *Documentation des Procédures Opératoires Standards (SOP) de l'unité Ammoniac et exemple d'une fiche d'instruction (AOA).*

V.3.2 Quantité d'ammoniac libérée

Pour estimer théoriquement la quantité d'ammoniac libérée lors de l'incident de la pompe **P-601A**, nous nous basons sur les conditions de service fournies et les principes de la mécanique des fluides. L'estimation du débit de fuite initial peut être réalisée en modélisant la brèche au niveau de la garniture mécanique comme un écoulement à travers un orifice.

V.3.4 Paramètres de Calcul

Selon votre fiche technique et le scénario d'incident, les données suivantes sont utilisées pour l'application numérique :

- **Pression de refoulement (P amont)** : 5,7 kg/cm2 G (soit environ 558979 Pa).
- **Pression atmosphérique (P aval)** : 0 kg/cm2G.
- **Masse volumique de l'ammoniac liquide** : 681kg/m3.
- **Coefficient de décharge** : Estimé à 0,62 pour une brèche type orifice.
- **Section de la brèche** : Estimée à 5 × 10-⁴ m2 (correspondant à une section annulaire au niveau de la garniture).

$$Q_m = C_d \cdot A \cdot \sqrt{(2 \cdot p \cdot \Delta P)}$$

L'application numérique conduit à une estimation du débit massique initial comprise entre **8 et 12kg/s** D'ammoniac liquide. En sortie de brèche, l'ammoniac se détend brutalement, s'évaporant partiellement de façon adiabatique (phénomène de flash), générant ainsi un nuage de gaz toxique et inflammable.

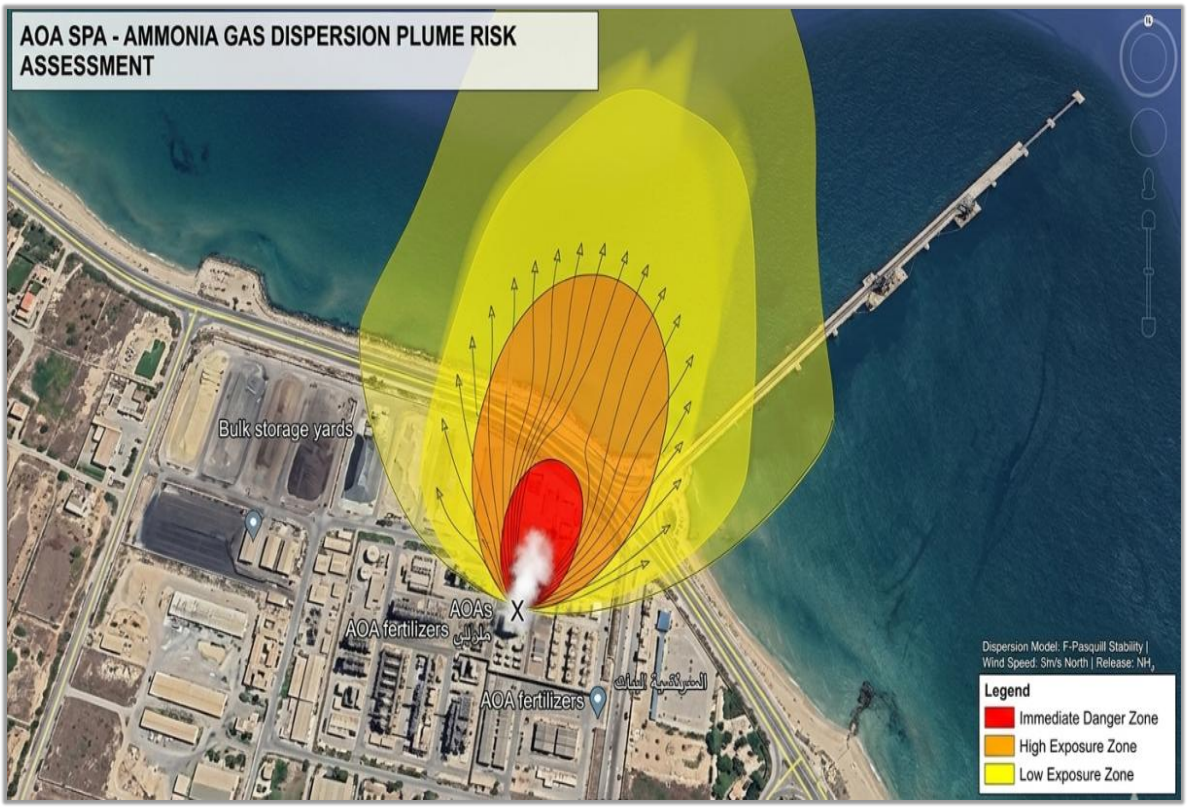


***Figure V-5** : **Photo.** Figurant la direction du nuage toxique vers le Nord selon le vent dominant*

V.3.5 Classification de l'incident selon API RP 754

Sur la base de scénario de fuite massive sur les pompes de transfert P 601A, voici la classification de l'incident selon les standards API RP 754 :

L'incident est classé comme un Tier 1 - Loss of Primary Containment (LOPC) : Une « fuite massive » survenant quelques minutes après le démarrage, qualifiée d'événement majeur de perte de confinement.

- **Seuil de rejet (Ammoniac)** : L'ammoniac (NH3) est classé comme un matériau TIH (Toxic Inhalation Hazard) Zone C. Pour cette catégorie (TRC 3), le seuil pour un événement Tier 1 est une libération ≥ 100 kg en extérieur sur une période d'une heure.
- **Impact opérationnel :** L'incident a nécessité le déplacement de l'opérateur pour l'activation du système de déluge et a été limité par l'absence d'équipements de protection tenue chimique scaphandre de niveau 3 au niveau de salle de contrôle protection tenue chimique scaphandre de niveau 3 au niveau de salle de contrôle confirmant une situation d'urgence dépassant le cadre d'un incident mineur.

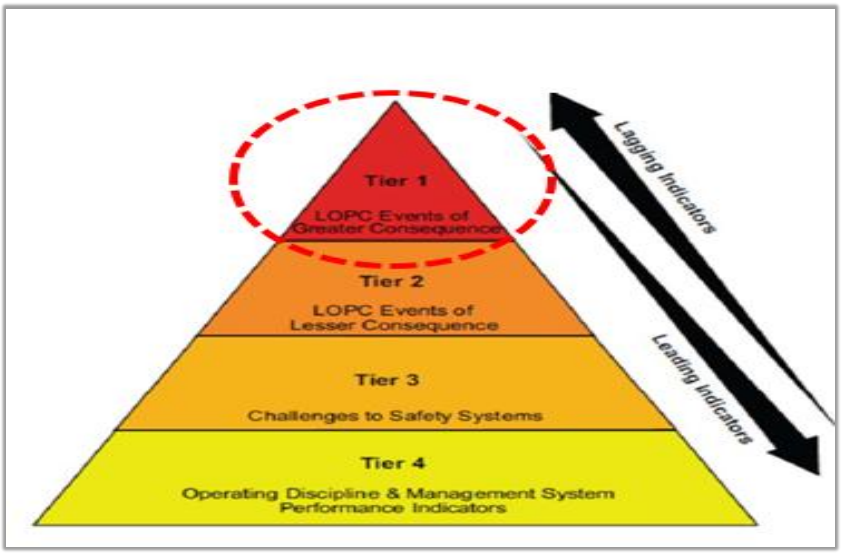


***Figure V-6** : Pyramide de classification*

- **Type d'Analyse requis** : En raison de sa classification Tier 1 et de son caractère "événement majeur", une Root Cause Analysis (RCA) est impérative pour identifier les causes racines.

V.3.6 Déroulement et limites des barrières de mitigation

L'analyse des barrières de mitigation existante montre des faiblesses :

1. Détection : les détecteurs fixes d'ammoniac ont bien fonctionné (alarme transmise au CCR et au poste d'intervention).
2. Système d'extinction fixe : présent, mais uniquement à déclenchement manuel → retard d'activation → aggravation de la dispersion du nuage toxique.
3. Équipements de protection individuelle (EPI) : absence de tenues de niveau 3 (scaphandres étanches) au niveau du CCR (salle de contrôle) → impossibilité d'intervenir au cœur de la zone pour actionner manuellement les vannes d'isolement.
4. Formation : manque de formation spécifique à l'attaque et à la progression dans un nuage toxique.
5. Appareils de protection respiratoire : absence de masque à cartouches individuel pour chaque opérateur.
6. Masques à cartouche : absence de boîtes contenant des masques à cartouches sur site, disponibles immédiatement en cas de fuite.

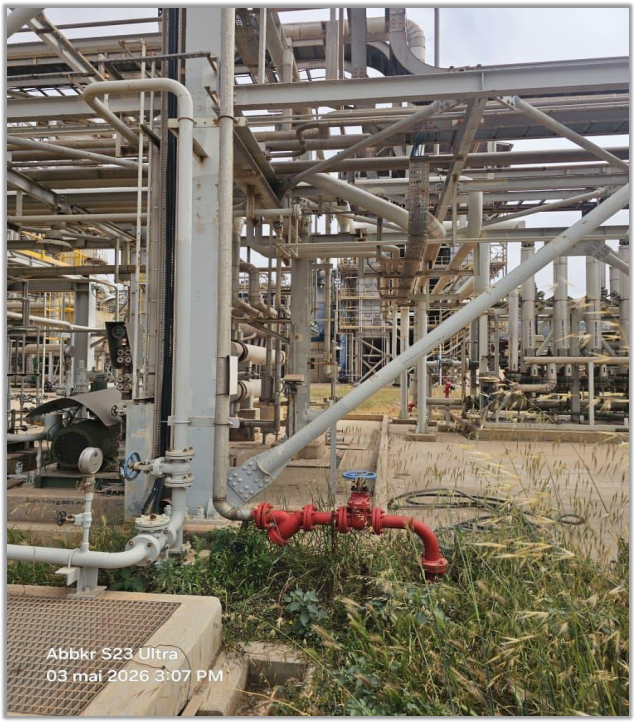


Figure V-7: *Activation manuelle de système de déluge*



Figure V-8 *: Détecteur fixe d'ammoniac*

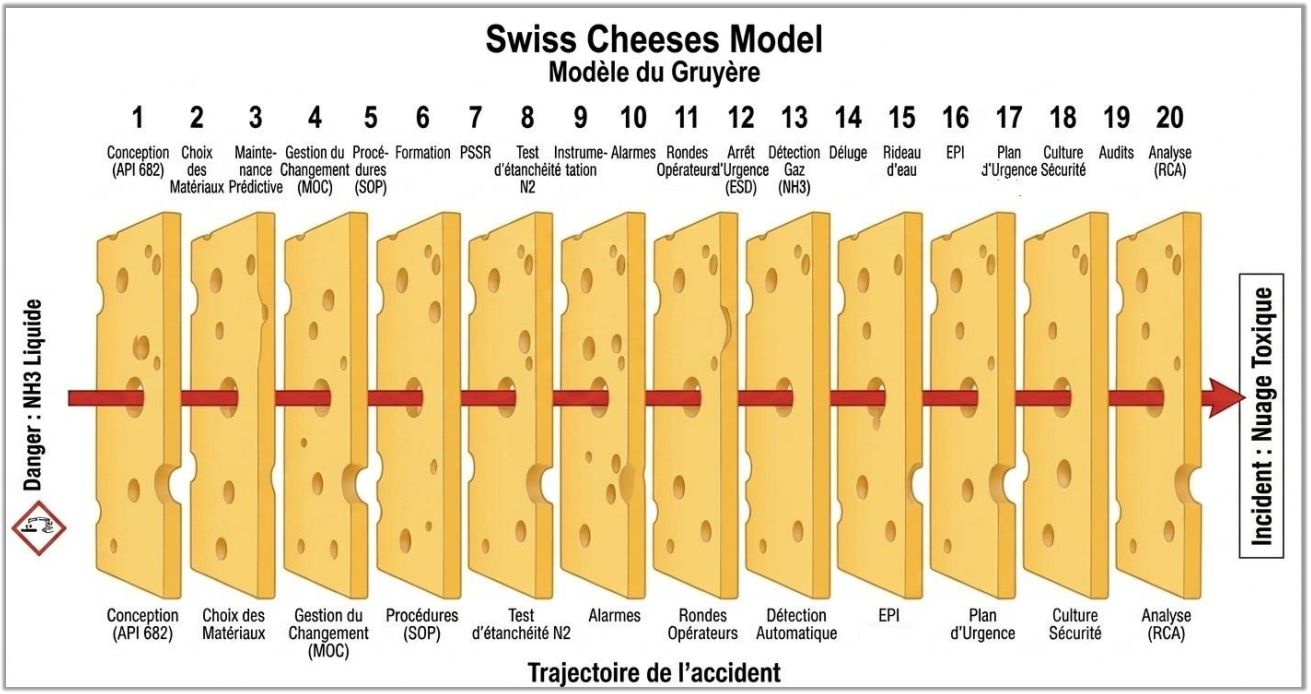


Figure V-9 *: Swiss cheeses model*

V.3.7 Analyse du système de gestion de la sécurité des procédés PSM : selon les 20 éléments CCPS appliquée à l'incident

La lacune procédurale et les conséquences de cet incident trouvent leur origine dans une série de défaillances au sein de plusieurs éléments clés du système de gestion de la sécurité des procédés (PSM), que nous avons détaillées sur le tableau suivant :

***Tableau V-2** : les éléments CCPS appliquée à l'incident*

N° Élément PSM (CCPS)	Désignation de l'élément	Défaillances identifiées et conséquences
02	**Compliance with Standards** (Conformité aux normes)	Non-respect des exigences de l'API 682 (norme pour garnitures mécaniques) qui impose un test d'étanchéité après maintenance.
04	**Workforce Involvement** (Implication du personnel)	Les opérateurs de terrain n'ont pas été impliqués dans la révision de la SOP. Aucun retour d'expérience des équipes n'a été sollicité.
08	**Operating Procedures** (Procédures opératoires)	La SOP de remise en service ne mentionnait pas le *leak test* à l'azote. Procédure incomplète et non validée par une revue PSM.
10	**Asset Integrity and Reliability** (Intégrité et fiabilité des actifs)	La garniture mécanique a été remplacée mais l'intégrité de l'étanchéité n'a pas été vérifiée. Le programme de maintenance préventive n'inclut pas de test post-réparation. Les inspections sont réalisées uniquement sur le volet vibrations. Classifié équipement Catégorie C
12	**Training and Performance Assurance** (Formation et assurance de la performance)	Les évaluations ne sont pas soumises à une revue à froid « toute type de formation ». Ainsi, les opérateurs ont appris une SOP erronée, ce qui a

		ancré la lacune, sans qu'aucune mesure de la performance réelle ne soit effectuée
14	**Operational Readiness** (Préparation opérationnelle)	Le redémarrage a été autorisé sans que tous les prérequis de sécurité ne soient vérifiés (absence de liste de points critiques – *readiness checklist*). Pas de revue de pré-démarrage. PSSR
16	**Emergency Management** (Gestion des urgences)	La Tenue chimique de niveau 3 avec scaphandre inexistante au niveau CCR « salle de contrôle », empêchant les intervenants rapides d'agir en zone contaminée. Déclenchement uniquement manuel, entraînant une perte de temps précieux en cas de fuite massive. Formation « spécifique » insuffisante des équipes d'intervention sur la lutte contre les nuages toxiques (incident chimique) Manque Formation plan interne d'intervention (conduite à tenir en cas d'urgence)
19	**Auditing** (Audit)	Les audits PSM internes ou externes n'ont pas détecté l'absence du test d'étanchéité dans les procédures. Ce critère d'audit n'était pas couvert.

V.3.8 Analyse de la Fiabilité par la Méthode AMDEC

L'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) est une méthode rigoureuse de sûreté de fonctionnement. Avant d'entamer notre analyse spécifique, il est important de noter qu'il existe plusieurs types d'AMDEC selon l'objectif visé :

1. AMDEC Produit (ou Conception) : Appliquée lors de la phase de design pour valider la fiabilité des composants.
2. AMDEC Moyen de Production (ou Machine) : Utilisée pour optimiser la disponibilité des équipements de production.

3. AMDEC Processus (ou Opérationnelle) : C'est celle que nous avons retenue pour cette étude. Elle se concentre sur les défaillances liées aux méthodes de travail, aux procédures opératoires et à l'interaction humaine avec l'équipement.

Dans le cadre de cette enquête sur la pompe P-601, l'AMDEC Processus est l'outil le plus pertinent. Elle nous permet d'identifier comment des lacunes dans les procédures de maintenance et de remise en service (éléments clés du PSM) ont pu conduire à une perte de confinement majeure

NB : Les actions de préventions sont déclenchées si la gravité est égale à 4 ou si l'IPR est supérieur ou égal à 16 (IPR = 12 actions non systématiques)

IPR : Indice de Priorisation de Risque

Détection	
Note	Critère
1	Détection automatisée (100%)
2	Détection humaine
3	Détection aléatoire
4	Aucun moyen de détection
Gravité	
Note	Critère
1	Fuite mineure confinée Aucune atteinte à la santé. Impact financier négligeable.
2	Fuite détectable nécessitant une intervention de maintenance simple. Irritation légère sans arrêt de travail.
3	Fuite importante nécessitant l'activation du plan d'urgence interne. Blessures réversibles ou hospitalisation. Arrêt d'unité
4	Rejet massif (>100kg) de produit toxique (TIH Zone C). Mise en danger de mort (asphyxie). Nuage toxique hors site.
Fréquence	
Note	Critère
1	De une à deux fois par an
2	Au moins une fois par mois
3	Au moins une fois par semaine
4	Au moins une fois par jour

Critères	1	2	3	4
1	1	2	3	4
2	2	4	6	8
3	3	6	9	12
4	4	8	12	16

1	4	9	16
2	8	18	32
3	12	27	48
4	16	36	64

Les actions de préventions sont déclenchées si la gravité est égale à 4 ou si l'IPR est supérieur ou égal à 16 (IPR = 12 actions non systématiques)

***Figure V-10** : Les critères d'évaluation [20]*

V.3.9 Analyse et synthèse des résultats

Ce travail a pour objectif d'aborder les différents aspects de l'évaluation de la criticité afin de hiérarchiser les risques relatifs aux modes de défaillance de la pompe de transfert (P-601).

Sur cette base, nous avons élaboré un plan d'actions correctives et préventives structuré selon la méthodologie SMART (Spécifique, Mesurable, Atteignable, Réaliste, Temporel). Les résultats de cette analyse des risques sont synthétisés dans le tableau suivant :

Tableau V-3 *: Méthode AMDEC.*

N°	Activités du processus	Sous-activités du processus	Modes de défaillance	Causes	Effets	Moyens de détection	Détection	Gravité	Fréquence	IPR	Actions de prévention _Mitigation	Détection 2	Gravité 2	Fréquence 2	IPR 2
1	Pompage ammoniac liquide	Garniture mécanique double	Usure de la garniture du au Marche à sec (Dry Running) ; Le joint torique peut être durci	Absence de liquide entre les faces	Perte de confinement NH3	Augmentation de pression supérieur à 0.2 kg cm² Apparition des bulles dans le réservoir de Glycol	1	4	1	4	Respect la durée de vie des Garnitures mécanique des pompes (nombre heures travaillé) Obligation du test d'étanchéité à l'azote post-maintenance (API 682 Automatisé Le système de déluge Installation d'une alarme de niveau très bas (LSLL) avec asservissement à l'arrêt de la pompe (Interlock).	1	1	1	1

2	Pompage ammoniac liquide	Système de Glycol	Fissure, corrosion perforante. Baisse du niveau dans le réservoir	Garniture mécanique endommagée (secondary sealing)	Perte de confinement NH3	Level Switch Low (LSL) (Level Gauge	1	3	1	3	Installation d'un transmetteur de pression (PT) avec alarme en salle de contrôle (CCR) et vérification du débitmètre d'azote lors des rondes.				0
3	Pompage ammoniac liquide	Système de Quench (Azote)	Rupture en alimentation de N2	Givrage du rotor	Endommagement de la pompe voire Perte de confinement NH4	Visuelle PG	2	4	1	8					0
4	Pompage ammoniac liquide	Corps de pompe (Casing)	Fissure thermique / Fragilisation	Choc thermique ou au froid extrême.	Perte de confinement NH3	Odeur NH3	2	2	1	4					0
5	Pompage ammoniac liquide	Système de Déluge	Vanne bloquante	Manque de graissage	Non contrôle du nuage toxique lors d'une fuite NH3	Tests de performance périodiques et alarmes du système de contrôle central	2	3	1	6	Automatisation complète du système de déluge couplée à la détection de gaz et programme de test fonctionnel mensuel des vannes.				0

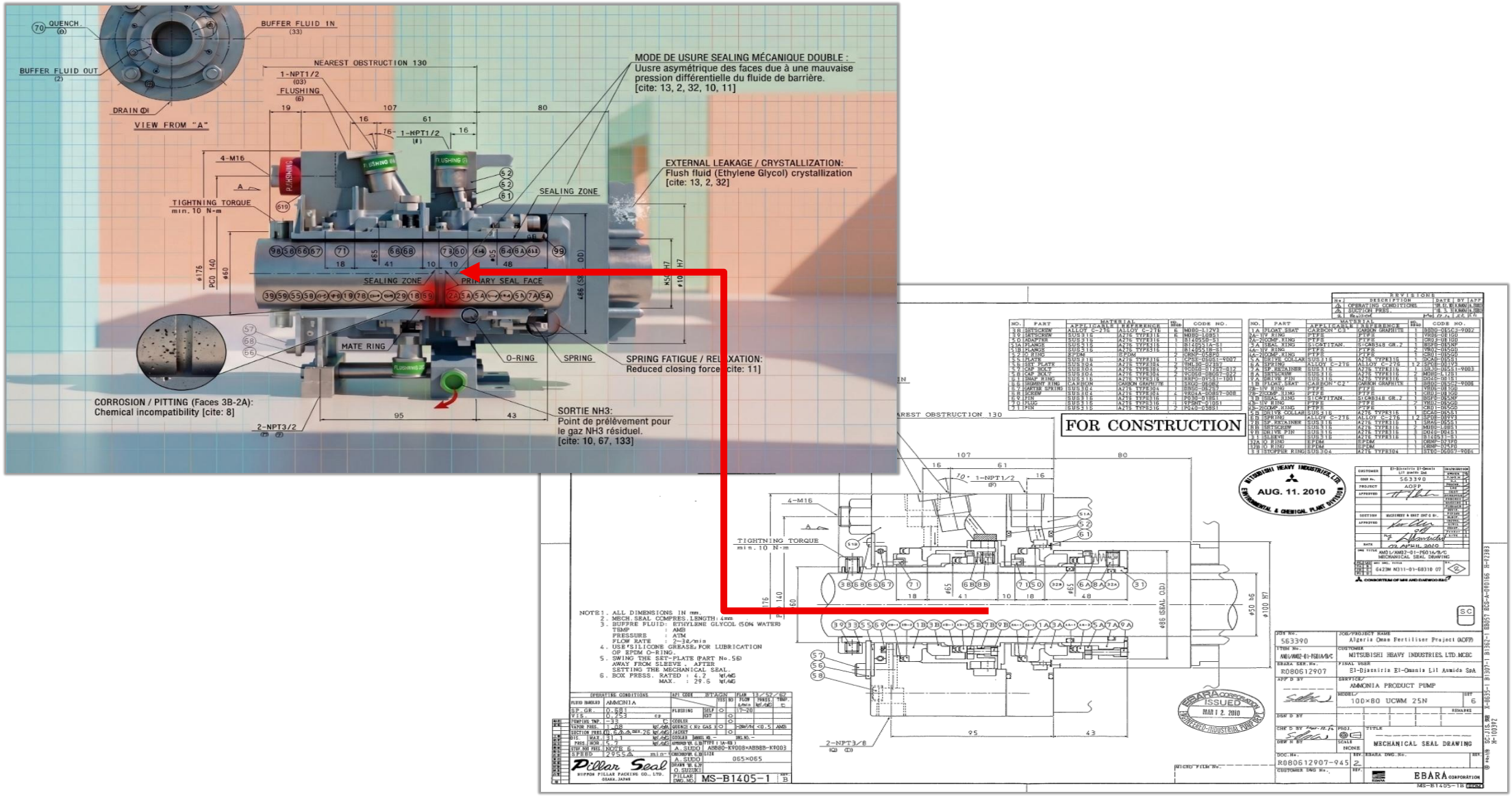


Figure V-11 *: Les Modes de défaillance sur la pompe selon mechanical seal6423MM311-01-6031007_Rev02_01*

V.3.10 Plan de Mise en Conformité PSM et Actions de Mitigation issues de l'AMDEC

Tableau V-4 *: Mise en Conformité PSM et Actions de Mitigation issues de l'AMDEC*

N°	Action	Responsable	Délais	Indicateur de suivi KPI
1	Automatisation du Déluge : Asservir le système de rideau d'eau aux détecteurs de gaz fixes (NH3) autour des pompes.	Instrumentation / HSE	3 mois	Temps de réponse < 30 sec après détection.
2	Test d'Étanchéité à l'Azote (Leak Test) : Rendre obligatoire un test à 5 bars d'azote post-maintenance avant toute introduction de NH3.	Exploitation Ammonia / Maintenance	Immédiat	Taux de conformité des PSSR (100%).
3	Instrumentation du Plan 53A : Installer des transmetteurs de pression/niveau (PIT/LIT) sur le réservoir de glycol avec alarmes au CCR (Magnetrol LSL).	Exploitation Ammonia / Instrumentation	6 mois	Réduction des pannes de garniture non détectées.
4	Révision de la SOP : Intégrer une procédure de "mise en froid" (cool-down) graduelle pour éviter les chocs thermiques sur les joints.	Exploitation Ammonia	1 mois	SOP signée et diffusée à l'équipe.

	Inserer l'opération d'Étanchéité à l'Azote comme exigence			
5	Implication du Personnel : Organiser des ateliers de revue de sécurité avec les opérateurs pour valider les nouvelles procédures.	Exploitation Ammonia/HSE	2 mois	Taux de participation des opérateurs.
6	Installer des coffrets de masque à cartouche sur site et assurer des tenues scaphandres et ARI à la salle de contrôle (hors zone).	Exploitation Ammonia	1 mois	Inventaire et état des équipements certifié.
7	Formation spécifique : Former les mécaniciens aux spécificités des garnitures API 682 / V-rings en service basse température (-33°C).	Formation/Maintenance	4 mois	Certificat de formation pour chaque intervenant.
8	Audit de Préparation Opérationnelle (PSSR) : Créer une check-list digitale bloquante empêchant le démarrage si les étapes clés ne sont pas validées.	Exploitation Ammonia/Comité PSSR	5 mois	Zéro démarrage sans PSSR validé.
9	Campagne de sensibilisation (REX) : Diffuser une "Alerte Sécurité" sur	Exploitation Ammonia	15 jours	Preuve de diffusion (E-mail/Affichage).

	l'incident P-601 à l'ensemble du complexe pour éviter la récurrence.			
10	Monitoring de l'Azote de Quench (Plan 62) : Installer un débitmètre/manomètre avec alarme basse pression pour éviter le givrage des faces.	Instrumentation	4 mois	Disponibilité continue du Quench N2 (100%).

V.3.11 Nœud de papillon : Les Barrières de Prévention et de Protection pour l'Intégrité Mécanique de la Pompe P-601

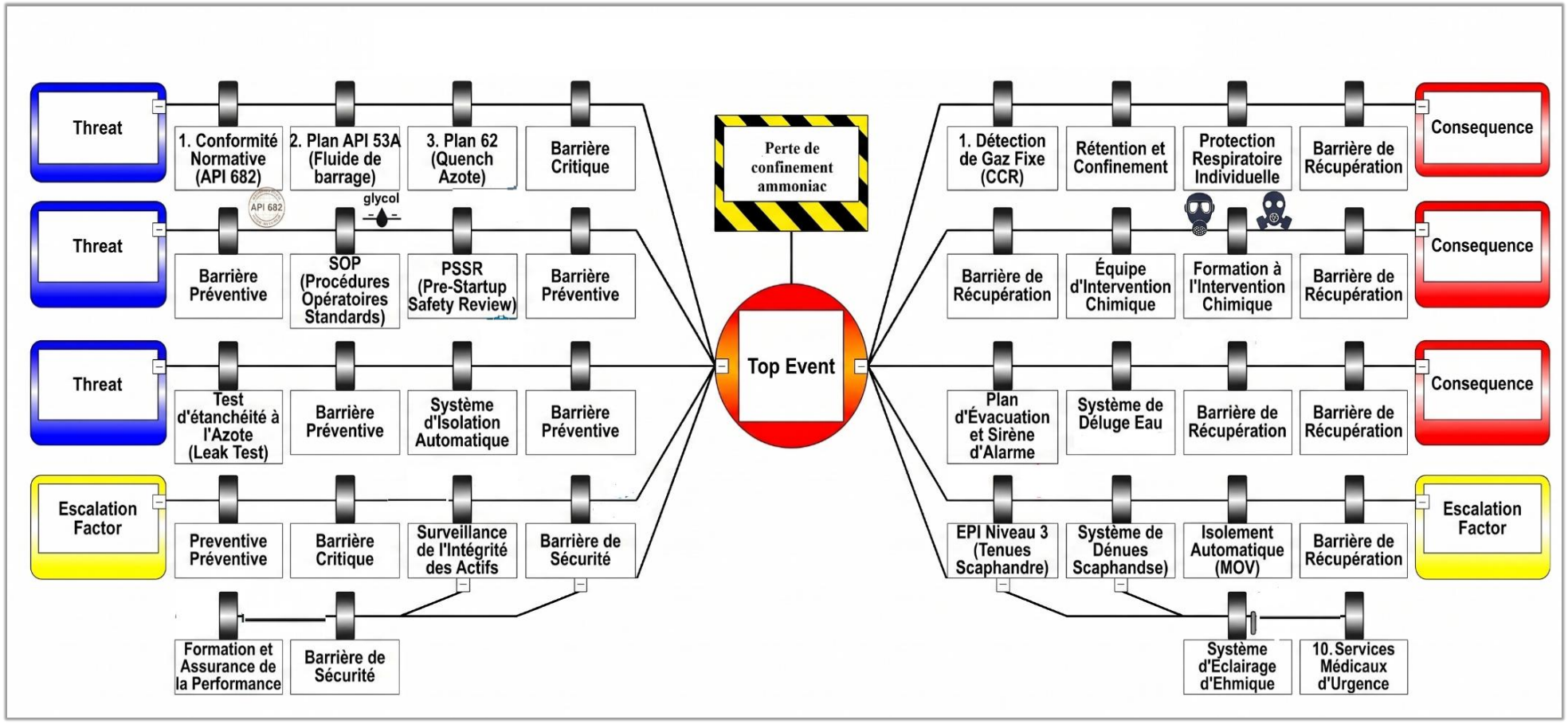


Figure V.10 : Nœud de papillon

V.4 Synthèse : De la théorie à la réalité opérationnelle – L'implémentation du PSM face au cas de la pompe P-601

V.4.1 Le contexte de l'étude : Une transition proactive vers le PSM au sein d'AOA

L'industrie pétrochimique ne laisse aucune place à l'improvisation. Notre stage s'est déroulé au sein du complexe AOA dans un contexte particulièrement propice : l'entreprise est actuellement en pleine démarche d'implémentation d'un Système de Management de la Sécurité des Procédés (PSM) de classe mondiale. Selon le dernier rapport d'avancement (avril 2026), le projet global de déploiement du PSM a atteint un taux de réalisation de **68 %**. Les phases de diagnostic et de préparation sont totalement achevées (100 %), tandis que l'entreprise déploie actuellement ses efforts sur la Phase 3 de développement documentaire (68 % d'avancement) et la Phase 4 de déploiement sur le terrain (58 % d'avancement). De nombreuses procédures vitales (Gestion des risques, Intégrité des actifs, Gestion du changement) sont en cours d'approbation ou de déploiement auprès du personnel.

V.4.2 Le cas d'étude (Pompe P-601) : La manifestation physique d'un déficit systémique

Bien que la théorie du PSM (les 20 éléments du CCPS) soit claire, il est parfois difficile d'en saisir la criticité sans une application concrète. C'est ici que notre cas pratique prend tout son sens. L'incident de la fuite majeure d'ammoniac sur la pompe centrifuge P-601A (un événement LOPC de Tier 1) n'est pas simplement une "panne mécanique". Cet incident, survenu post-maintenance, a été déclenché par l'omission d'un test d'étanchéité à l'azote (leak test) avant la réintroduction de l'ammoniac à -33°C.

V.4.3 L'articulation entre le cas pratique et l'implémentation du PSM

Le lien entre l'incident de la pompe et notre thème de recherche est fondamental : **le cas pratique est le diagnostic (le "Pourquoi") justifiant l'urgence du projet d'implémentation du PSM (le "Comment") actuellement en cours à 68 % chez AOA.**

L'analyse approfondie de cet incident met en lumière l'effondrement de plusieurs barrières de sécurité, qui correspondent directement aux éléments du référentiel PSM que l'entreprise est en train d'implanter :

- **Élément 8 (Procédures opératoires) & Élément 10 (Intégrité des actifs) :** La fuite a eu lieu car la procédure de remise en service (SOP) était incomplète ;

elle n'exigeait pas le test d'étanchéité. L'implémentation actuelle du PSM chez AOA vise justement à réviser l'ensemble de ces documentations critiques.

- **Élément 14 (Préparation opérationnelle / PSSR) :** La pompe a été redémarrée sans qu'une revue de sécurité de pré-démarrage (PSSR) ne vienne vérifier et bloquer l'opération suite à l'absence du test. Le déploiement de la "Procédure de disponibilité opérationnelle" (en cours chez AOA) viendra combler cette lacune.
- **Élément 12 (Formation) :** Les opérateurs avaient été formés sur une procédure défaillante, ancrant ainsi l'erreur dans la pratique quotidienne.
- **Élément 16 (Gestion des urgences) :** Lors de la dispersion du nuage toxique, l'absence d'équipements de protection adéquats en salle de contrôle (scaphandres de niveau 3) et un système de déluge strictement manuel ont considérablement retardé la maîtrise de l'incident.

V.4.4. Conclusion de la synthèse

En définitive, la fuite sur la pompe P-601 illustre parfaitement ce qui se produit lorsque les éléments d'un système PSM ne sont pas encore matures ou pleinement interconnectés. Les recommandations issues de notre analyse AMDEC et Nœud Papillon (automatisation du déluge, intégration de PSSR bloquants) ne sont pas de simples suggestions théoriques ; elles constituent le cœur même des actions que la direction d'AOA est en train d'exécuter dans sa Phase 4 de déploiement. Ce cas pratique valide ainsi de manière irréfutable la nécessité et la pertinence du vaste chantier d'implémentation du PSM actuellement mené par le complexe.

V.5 Conclusion

L'investigation de l'incident majeur de perte de confinement (LOPC) survenu sur la pompe d'ammoniac liquide P-601A illustre de manière éloquente la complexité des accidents industriels. Comme le démontre notre cas pratique, cet événement de niveau "Tier1" selon la norme API RP 754 n'est pas le fruit d'une simple défaillance technique isolée de la garniture mécanique. Il résulte d'une conjonction de failles systémiques et organisationnelles ancrées dans le système de gestion de la sécurité des procédés (PSM).

Notre analyse, structurée autour des éléments du CCPS, a mis en lumière des lacunes critiques : des procédures opératoires incomplètes (omission du test d'étanchéité à l'azote post-maintenance), un manque d'implication du personnel dans la révision documentaire, et une préparation aux situations d'urgence inadaptée (déclenchement manuel du système de déluge, absence d'EPI de niveau 3 en salle de contrôle). **Ces constats valident le postulat de notre recherche : l'architecture sécuritaire pensée par le PSM ne suffit pas si son intégration sur le terrain vacille, permettant au danger de s'infiltrer à travers les brèches systémiques jusqu'à provoquer une fuite massive d'ammoniac toxique**.

Face à ces constats, l'application de la méthode AMDEC Processus nous a permis de hiérarchiser les risques et de cibler les modes de défaillance les plus critiques.

Les actions de prévention et de mitigation que nous avons définies — telles que l'automatisation du système de déluge couplée à la détection de gaz, l'instauration stricte de tests d'étanchéité documentés avant tout redémarrage, ou encore la mise à disposition immédiate d'équipements de protection respiratoire adéquats — visent à restaurer et à consolider les barrières de sécurité.

Finalement, la modélisation en Nœud de Papillon (Bow-Tie) confirme que la maîtrise des risques majeurs sur des installations complexes comme celles du complexe AOA Spa repose sur la redondance et la fiabilité des barrières, tant préventives que réactives. La mise en œuvre de ce plan de conformité garantira non seulement l'intégrité de l'équipement P-601, mais renforcera globalement la culture de sécurité et la résilience de l'ensemble de la section de réfrigération.

Conclusion générale

L'industrie pétrochimique, en raison de la nature extrêmement volatile et toxique des substances qu'elle transforme – à l'image de l'ammoniac produit au sein du complexe AOA – exige une maîtrise absolue des risques. Ce projet de fin d'études a eu pour vocation de répondre à une problématique centrale : évaluer l'efficacité de l'implantation structurée du Process Safety Management (PSM) au sein d'AOA et identifier, à travers un cas pratique réel, les points critiques nécessitant des améliorations immédiates.

Pour mener à bien cette réflexion, notre démarche s'est articulée de manière progressive. Le **Chapitre I** nous a permis de consolider les fondements de la sécurité des procédés, en démontrant à travers l'étude des catastrophes historiques que la sécurité classique au travail demeure insuffisante pour prévenir les accidents majeurs. Dans le **Chapitre II**, nous avons décortiqué l'architecture du système PSM, en nous appuyant spécifiquement sur les 20 éléments du modèle Risk Based Process Safety (RBPS) du CCPS, qui constituent les piliers d'une culture de sécurité pérenne.

Cette assise théorique nous a conduits, dans le **Chapitre III**, à explorer le complexe industriel AOA, son environnement à haut risque et ses procédés de fabrication d'engrais. C'est sur ce terrain que le **Chapitre IV** a pris tout son sens, en détaillant la méthodologie de déploiement opérationnel du PSM en cinq phases (Évaluation, Préparation, Développement, Déploiement et Audit). Cette démarche a mis en évidence l'importance d'une approche par étapes pour transformer les exigences normatives en pratiques quotidiennes.

Enfin, le **Chapitre V** a constitué la clé de voûte de notre étude en confrontant la théorie à la réalité opérationnelle. À travers l'investigation d'un incident majeur (Tier 1) de perte de confinement sur la pompe P-601, **nous avons mis en exergue la véritable dynamique du PSM : si ce système a pour vocation de bâtir un rempart infranchissable, l'analyse de cet événement prouve que des défaillances dans son implémentation de terrain fragilisent chaque ligne de défense, transformant fatalement une opération de maintenance de routine en une crise majeure**. L'absence d'un test d'étanchéité formalisé et des lacunes dans la préparation aux urgences ont illustré l'effondrement successif des barrières de prévention.

En termes de contributions, ce travail a permis de formuler un diagnostic précis et de proposer un plan d'actions correctives SMART, appuyé par des outils d'analyse rigoureux tels que l'AMDEC Processus et la modélisation en Nœud Papillon (Bow-Tie). Nous avons notamment recommandé l'automatisation du système de déluge asservi à la détection de gaz, et l'instauration stricte de tests d'étanchéité documentés avant tout redémarrage.

En guise de perspectives pour les futurs travaux, il serait pertinent d'étendre cette recherche vers la digitalisation intégrale des éléments du PSM, tels que les permis de travail informatisés et les revues de pré-démarrage (PSSR) automatisées à l'aide de check-lists numériques bloquantes. Par ailleurs, l'intégration de l'Intelligence Artificielle et de l'analyse vibratoire avancée pour la maintenance prédictive des équipements critiques, comme les garnitures mécaniques, constituerait un prolongement naturel de ce travail. Ces innovations technologiques viendraient parachever le système de gestion, garantissant ainsi que l'intégrité des opérations et la protection des collaborateurs au sein de nos industries demeurent une priorité absolue et inébranlable.

Bibliographie

[1] A. Laurent, Sécurité des procédés chimiques : Connaissances et méthodes d'analyse des risques,Tec & doc, 2011, Disponible sur : Sécurité des procédés chimiques: Connaissances et méthodes d'analyse des risques - André Laurent - Google Livres

[2] A. L. S. and S. Division, Process Safety Management of Highly Hazardous Chemicals : Occupational Safety and Health Standards, The Division, 1992, Disponible sur : Process Safety Management of Highly Hazardous Chemicals: Occupational Safety ... - Alaska. Labor Standards and Safety Division - Google Livres

[3] CCPS (Center for Chemical Process Safety), Guidelines For Risk Based Process Safety, Scribd , 2007 Disponible sur: 1.1-Guidelines For Risk Based Process Safety | PDF | La seguridad

[4] HSE (Health and Safety Executive), Process Safety Performance Indicators Guide, Scribd, 2006 Disponible sur : Process Safety Performance Indicators Guide | PDF | Risk Management | Safety

[5] J. Oofffiicciieell, Correspondant au 22 août 2021, journal officiel Disponible sur : Journal officiel n° 64 - 22 août 2021 | PDF | Obligation (Finance) | Environnement naturel

[6] H. W. Heinrich, Industrial Accident Prevention : A Scientific Approach, McGraw-Hill book Company, Incorporated , 1931 Disponible sur: Industrial Accident Prevention: A Scientific Approach - Herbert William Heinrich - Google Livres

[7] Paolo Mocarelli, Seveso - A Teaching Story, Chemosphere, Scribd, 2001 Disponible sur : Seveso - A Teaching Story | PDF | Polychlorinated Dibenzodioxins | Medical Specialties

[8] Akshit Arora & Yash Bhayani, Seveso Dioxin Disaster Overview, Scribd, 2010 Disponible sur : Seveso Dioxin Disaster Overview | PDF | Chemistry

[9] T. Kletz et P. R. Amyotte, What Went Wrong?: Case Histories of Process Plant Disasters and How They Could Have Been Avoided, Butterworth-Heinemann, 2019 Disponible sur : What Went Wrong?: Case Histories of Process Plant Disasters and How They ... - Trevor Kletz, Paul R. Amyotte - Google Livres

[10] W. D. Cullen, The Public Inquiry into the Piper Alpha Disaster,H.M. Stationery Office , 1990 Disponible sur : The Public Inquiry into the Piper Alpha Disaster - HSE

[11] F. Lees, Lees' Loss Prevention in the Process Industries : Hazard Identification, Assessment and Control,Butterworth-Heinemann, 2012 Disponible sur : Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification ... - Frank Lees - Google Livres

[12] Ahmad, A., BP Texas City Refinery Explosion Analysis, Scribd , 2000, Disponible sur : BP Texas City Refinery Explosion Analysis | PDF | Bp | Safety

[13] Pillai Sreejith, BP Texas City Refinery Explosion Overview, Scribd, 2008 Disponible sur : BP Texas City Refinery Explosion Overview | PDF | Bp | Oil Refinery

[14] Rob Brennan, Swiss Chess Tournament Scoring Systems,Scribd, Disponible sur: Swiss Chess Tournament Scoring Systems | PDF | Tournament | Sports

[15] WorkSafe Western Australia, Health & Safety Performance Indicators Guide,Scribd, 2024 Disponible sur : Health & Safety Performance Indicators Guide | PDF | Performance Indicator | Occupational Safety And Health

[16] WorkSafe Western Australia, Health and safety leading and lagging performance indicators: guide, Scribd , 2024, Disponible sur : Health and safety leading and lagging performance indicators: guide

[17] American Petroleum Institute, API Recommended Practice 754, 3rd Edition, American Petroleum Institute, 2021 (Date de parution de la 3ème édition) , Disponible sur : American Petroleum Institute | API | API Recommended Practice 754, 3rd Edition

[18] NEBOSH & HSE (Année de publication du PDF). *NEBOSH Process Safety Management Guide*. Disponible sur : NEBOSH Process Safety Management Guide | PDF

[19] Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail (CCHST / CCOHS), Process Safety Management (PSM) – Fiches d'orientation et ressources sur la, Ressources consultables en continu (mises à jour régulièrement) Disponible sur : Canadian Centre for Occupational Health and Safety

[20] La matrice de criticité utilisée pour cette analyse est extraite des archives documentaires de la société AOA.