REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Hygiène et sécurité industrielle

Spécialité : Hygiène et sécurité industrielle

Optimisation de la Fiabilité des Systèmes de Protection Incendie par l'Approche AMDEC Hybride : Application sur la Pompes et Moteur Diesel du CPF IN AMINAS

Présentée par

HAMIDIA Dounia Amel

BELADZAR Ramzi

Proposé et Dirigé par

Dr. SARRAI Abdelaziz

Promotion 2024-2025

Remerciements

Avant d'entamer le développement de ce travail, il nous paraît essentiel de commencer par exprimer nos remerciements les plus sincères.

Nous remercions tout d'abord Allah, le Tout-Puissant et le Très Miséricordieux, de nous avoir accordé la santé, la patience et le courage nécessaires à l'accomplissement de ce travail. Sans Ses bienfaits, ce projet n'aurait pu voir le jour.

Nos remerciements s'adressent ensuite à toutes les personnes qui ont contribué à notre formation, depuis nos premières années d'études jusqu'à aujourd'hui, ainsi qu'à l'ensemble du corps professoral et administratif d'université YAHIA FARES DE MEDEA pour leur engagement, leur encadrement et leur disponibilité.

Nous adressons nos vifs remerciements à Monsieur SARRAI Abdelaziz, pour la confiance qu'il nous a témoignée, ainsi que pour ses conseils avisés, sa rigueur scientifique et son soutien tout au long de l'élaboration de ce travail.

Nos pensées de gratitude vont également à nos familles respectives, pour leur soutien constant, leurs encouragements inestimables et leur patience à chaque étape de notre parcours académique.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à JVGAZ In Amenas, ainsi qu'à LAHRECHE Zakaria, REZGUI Djamel, BRIHMAT Youcef, Saad Bourenane, fouad Benseghir, BALI Adel, et l'ensemble de ses collaborateurs, pour leur accueil chaleureux, les moyens mis à notre disposition et les conseils précieux qu'ils nous ont prodigués au cours de notre stage.

Nos remerciements s'adressent enfin au Jury pour l'attention portée à notre travail, et à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce projet.

Trouvez dans ces mots l'expression de notre profonde reconnaissance.

.

Dédicace

À vous, êtres chers à mon cœur,

À vous, lumières de mon chemin,

À vous, pour qui chaque battement de mon cœur murmure gratitude et amour…

Je dédie humblement ce travail, reflet de longues années d'efforts, d'espoir et de résilience.

À ma chère maman, mon paradis sur terre, ma force douce et silencieuse, celle qui a su être à la fois abri et flamme, tendresse et courage. Chaque victoire est un écho de ton amour incommensurable.

À mon cher papa, mon pilier, mon modèle d'intégrité et de persévérance, celui qui a façonné mon caractère et a toujours cru en mes rêves, même lorsque moi-même j'en doutais.

À ma petite sœur Meriem, éclat de lumière, précieuse complice, dont la présence, les conseils et la bienveillance ont été des piliers sur lesquels j'ai pu m'appuyer.

À ma grande sœur Roumaïssa, mon alliée : ton amour et ta lumière m'ont guidée vers l'accomplissement. Une part de moi te doit tout.

À mon petite frère Sid Ali, pour son amour silencieux, sa protection discrète et sa présence rassurante qui m'ont toujours enveloppée.

À toute ma grande famille, à mes tantes, mes cousins et mes cousines, pour l'affection partagée et les encouragements qui ont nourri ma persévérance.

À mes chers collègues de la promotion de deuxième année Master Hygiène et Sécurité Industrielle, avec qui j'ai partagé défis, réussites et souvenirs inoubliables.

À vous tous,

Ce diplôme est bien plus qu'un titre : c'est le témoignage vivant de votre amour, de votre foi, de vos prières silencieuses.

Merci du fond du cœur.

Dounia Amel HAMIDIA

Dédicace

Je dédie ce mémoire, fruit de plusieurs années de travail, de persévérance et de sacrifices, à ceux qui ont toujours été le pilier de ma vie et la source de ma force.

À ma chère maman,
Toi qui as porté le poids de nos vies avec une patience infinie et un amour inconditionnel. Tes prières silencieuses, ton regard plein de bienveillance, tes conseils pleins de sagesse et ta foi en moi ont été mon refuge dans les moments d'incertitude. Tu es mon exemple de courage et de dignité. Ce mémoire est autant le tien que le mien.

À la mémoire de mon père,
Que Dieu ait ton âme en Sa miséricorde. Ton absence physique ne m'a jamais privé de ta présence spirituelle. Tes valeurs, ton honnêteté, ta droiture, et tout ce que tu m'as transmis restent à jamais ancrés en moi. J'espère que là où tu es, tu es fier de moi.

À ma sœur adorée,
Ton soutien constant, ton écoute, et ta capacité à croire en moi-même quand je doutais font de toi une personne précieuse et irremplaçable. Merci pour ta tendresse, ta patience et ton amour fraternel.

À mes frères,
Complices de tous les instants, vous avez été des piliers solides, des sources d'encouragement dans les moments de fatigue, et des exemples de persévérance. Chacun de vous, à sa manière, a contribué à l'achèvement de ce travail. Merci pour votre soutien discret mais toujours présent.

À vous, ma famille,
Ce mémoire est un hommage à tout ce que vous représentez pour moi. Rien n'aurait été possible sans vous. Ce travail est le fruit d'un amour familial indéfectible.

Ramzi BELADZAR

ملخص:

تُطبق هذه الدراسة منهجية AMDEC على المكونات الحساسة لنظام مكافحة الحرائق (المضخات والمحركات) في وحدة CPF بعين أميناس (سوناطراك – إيني – إكوينور). وتهدف إلى مقارنة التحليل اليدوي للإخفاقات مع النتائج التي يولدها المساعد في الهندسة الميكانيكية. يُظهر الذكاء الاصطناعي قدرة على تسريع التحليل وتنظيمه، لكنه يحتاج إلى تأكيد من الخبرة البشرية. تشير النتائج إلى إمكانية إدماج تدريجي للذكاء الاصطناعي في تقييم المخاطر الصناعية.

الكلمات المفتاحية: AMDEC، الخطورة، السلامة من الحرائق، الذكاء الاصطناعي، الموثوقية، المخاطر الصناعية، .

Abstract:

This study uses the FMEA method to analyze critical components (pumps and motors) of the fire protection system in the CPF unit at In Amenas (Sonatrach – ENI – Equinor). It compares manual failure analysis with results from Mechanical Engineering Assistant. AI speeds up and structures the analysis but still requires human validation. The work suggests gradual AI integration into industrial risk assessment.

Keywords: FMEA, criticality, fire safety, AI, reliability, industrial risk.

Résumé :

Cette étude applique la méthode AMDEC aux éléments critiques du système de lutte contre l'incendie (pompes et moteurs) de l'unité CPF à In Amenas (Sonatrach – ENI – Equinor). Elle vise à identifier les défaillances critiques manuellement, puis à comparer ces résultats avec ceux générés par Mechanical Engineering Assistant. L'IA permet une analyse rapide et structurée, mais nécessite toujours une validation humaine. Cette approche ouvre la voie à une intégration progressive de l'IA dans la gestion des risques industriels.

Mots clés : AMDEC, criticité, sécurité incendie, IA, fiabilité, risques industriels.

Sommaire

Remerciement…….. i
Dédicace…… ii
Résumé…….. iv
Liste des abréviations…….. vii
Liste des tableaux…… ix
Liste des figures……... x

Introduction générale…….. 1

Chapitre I : Présentation de l'AMDEC et de l'intelligence artificielle (Mechanical Engineering Assistant) vers une optimisation de l'analyse des risques

Introduction……... 4
1. Concepts et Définitions de l'Analyse des Risques…… 4
1.1. Notion de Danger…… 4
1.2. Notion de Risque…… 5
1.3. Facteurs d'Influence du Risque……. 5
1.4. Notion de Criticité et Grille de Criticité……. 6
1.5. Démarche de Gestion des Risques…….. 6
2. Les méthodes d'analyse des risques dédiées aux barrières de sécurité……. 7
2.1. Classification des Méthodes d'Analyse de Risques……... 7
2.2. La méthode AMDEC……. 8
2.2.1. Généralités……... 8
2.2.2. L'AMDEC - Évolution et principes……. 11
2.3. L'Arbre de Défaillance (AdD) ……..…… 15
2.4. L'Arbre d'Événements (AdE) ……..……..…. 17
2.5. La méthode du Nœud Papillon……..…..…..…..…….. 18
2.6. Méthode HAZOP (Hazard and Operability Study) ……... 19
3. L'Intelligence Artificielle et Mechanical Engineering …….. 21
3.1. L'IA, de Turing à Chat-GPT…….. 21
3.1.1. L'IA, essai de définition……..…..…..…..…..…….. 21
3.1.2. Qu'est-ce que ChatGPT ? ……..…..…..…..…….. 21
3.2. L'apport de Mechanical Engineering (version payante) dans l'amélioration de l'AMDEC ……. 24
Conclusion……. 24

Chapitre II : Présentation de l'entreprise et du réseau de lutte contre l'incendie

Introduction……... 26
1. Présentation du champ gazier de TIGUENTOURINE « CPF » …..…..…..…..…..…..…... 26
1.1. Historique…….. 26
1.2. Description de la région d'In Amenas…… 27
1.3. Fiche technique……..…..…..…..…..…..…..…..…..…… 28

1.4. Système d'évacuation par canalisation vers TRC…….. 28
1.5. Description de l'exploitation à IA……..…..…..…… 29
1.6. Description générale des installations……..…….. 30
1.7. Organisation de l'entreprise……..…..…..…..…..…….. 31
2. Description Générale d'un réseau anti-incendie……..... 33
2.1. Notions de Base…….. 33
2.1.1. L'Incendie (La combustion) ……..…..…..…..…… 33
2.1.2. Normes et réglementations appliquées……..…..…… 37
2.2. Les composants d'un réseau anti-incendie……..... 41
Conclusion……. 52

Chapitre III : Étude Comparative entre l'AMDEC Classique et IA appliquée à la Pompe et au Moteur Diesel du site CPF – In Amenas

Introduction……... 54
1. Analyse statistique des composants selon la criticité des interventions…… 54
2. Analyse fonctionnelle détaillée du moteur diesel et de la pompe diesel……...…… 58
3. Application de la méthode AMDEC classique……..… 62
3.1. Analyse et commentaires sur les résultats de la pompe et le moteur diesel……..…. 74
3.2. Recommandations spécifiques pour la pompe diesel et le moteur diesel……..… 76
4. Application de l'AMDEC générée par l'intelligence artificielle (Mechanical Engineering de Jose V.F. Vieira) ……... 78
4.1. Présentation de la méthode appliquée via le bot……. 78
4.2. Résultats de l'AMDEC, Analyse Techniques et Recommandations par bot…….. 79
5. Étude comparative entre AMDEC classique et AMDEC IA……..... 94
5.1. Comparaison des résultats obtenus……. 94
5.2. Points forts et limites de chaque approche……..….... 94
5.3. Complémentarité entre l'expertise humaine et l'intelligence artificielle……. 95
Conclusion……. 95

Conclusion générale…….. 97
Références bibliographiques…….. 100
Annexes…… 105

Liste des abréviations

- **ADD : Aide à la Décision par Diagnostic**
- **AdD : Arbre de Défaillance**
- **AdE : Arbre d'Événements**
- **AFFF-AR: Aqueous Film Forming Foam - Alcohol Resistant**
- **AMDEC : Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité**
- **APSAD : Assemblée Plénière des Sociétés d'Assurances Dommages**
- **CCR : Central Control Room (Salle de Contrôle Centrale)**
- **CEN : Comité Européen de Normalisation**
- **CENELEC : Comité Européen de Normalisation Électrotechnique**
- **CEI : Commission Électrotechnique Internationale**
- **CH_4 : Méthane**
- **C_2H_6 : Éthane**
- **C_3H_8 : Propane**
- **C_4H_{10} : Butane**
- **C_7+ : Heptanes et plus**
- **CNPP : Centre National de Prévention et de Protection**
- **CO_2 : Dioxyde de carbone**
- **CPF : Centre de Traitement de Gaz / Centre de Production des Fluides**
- **ENI : Multinationale italienne du secteur de l'énergie**
- **EP : Engineering Production**
- **ERP : Établissements Recevant du Public**
- **ETA : Event Tree Analysis**
- **ETSI : Institut Européen des Normes de Télécommunications**
- **FD : Fire Dos (Système de dosage de mousse)**
- **FMEA : Failure Modes and Effects Analysis**
- **FTA : Fault Tree Analysis**
- **GMAO : Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur**
- **GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié**
- **GPT : Generative Pre-trained Transformer**
- **H_2S : Sulfure d'hydrogène**
- **HAZOP : Hazard and Operability Study**

• Hg : Mercure

• HSE : Hygiène, Sécurité et Environnement

• IA : Intelligence Artificielle

• IAg : Intelligence Artificielle Générative

• IPR : Indice de Priorisation des Risques

• IR : Infrarouge

• ISO : International Organization for Standardization

• LMF : Lance Moniteur Fixe

• NASA : National Aeronautics and Space Administration

• NF EN : Norme Française Européenne

• NFPA : National Fire Protection Association

• NFX : Norme Française expérimentale

• NOx : Oxyde d'Azote

• OHSAS : Occupational Health and Safety Assessment Series

• PI : Poteau d'Incendie

• PRV : Pressure Relief Valve (Soupape de Surpression)

• RIA : Robinet d'Incendie Armé

• SCADA : Supervisory Control And Data Acquisition

• UV : Ultraviolet.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Classification des Méthodes d'Analyse de Risques……..……. 7
Tableau I.2 : Les quatre questions de base de l'AMDEC……..…….. 11
Tableau I.3 : Exemple de Tableau AMDEC pour le réseau de distribution d'eau potable.. 13
Tableau I.4 : Exemple de modes de défaillances et de causes possibles du calculateur…. 13
Tableau I.5 : Exemple de grille d'évaluation de l'IPR……..…….. 14
Tableau I.6 : La symbolique des événements……..……..…….. 17
Tableau I.7 : Exemple de tableau pour l'HAZOP…..……..……..….. 20
Tableau II.1 : Les principales types de combustion et leurs caractéristiques……. 34
Tableau II.2 : Normes applicables aux installations fixes de lutte contre l'incendie…….. 38
Tableau II.3 : Normes NFPA applicables à la protection incendie……..…..….. 39
Tableau II.4 : Principales règles APSAD applicables à la sécurité incendie……... 39
Tableau III.1 : Analyse statistique des composants selon la Criticité CPF (2014–2024)… 55
Tableau III.2 : Analyse Fonctionnelle Détaillée de la Pompe Diesel……..….. 58
Tableau III.3 : Analyse Fonctionnelle Détaillée du Moteur Diesel……..…..…. 61
Tableau III.4 : AMDEC de la pompe diesel……..……..…… 64
Tableau III.5 : AMDEC de moteur diesel……..……..…… 68
Tableau III.6 : AMDEC de la pompe diesel par le bot……..…….. 80
Tableau III.7 : AMDEC de moteur diesel système mécanique……..…….. 83
Tableau III.8 : AMDEC de moteur diesel système : Refroidissement……..….. 84
Tableau III.9 : AMDEC de moteur diesel Lubrification……..…… 85
Tableau III.10 : AMDEC de moteur diesel système - Injection de carburant…….. 86
Tableau III.11 : AMDEC de moteur diesel système - Admission d'air……..….. 87
Tableau III.12 : AMDEC de moteur diesel système - Échappement……..……. 88
Tableau III.13 : AMDEC de moteur diesel système de démarrage……..…..…. 88
Tableau III.14 : Points forts et limites de chaque approche……..…..…..…..…. 94

Liste des figures

Figure I.1 : Grille de criticité en fonction de probabilité et de gravité……. 6
Figure I.2 : Diagramme synthétisant les méthodes de maintenance selon la norme NFX 60000…….. 9
Figure I.3 : Étapes principales de la démarche AMDEC……. 12
Figure I.4 : Exemple d'arbre de défaillances…… 16
Figure I.5 : Structure d'un Arbre d'Événements……... 18
Figure I.6 : Schéma de nœud papillon…….. 19
Figure I.7 : Exemple d'une conversation avec Chat-GPT…… 22
Figure I.8 : Interface d'utilisation du bot d'ingénierie mécanique utilisé pour la génération des tableaux AMDEC……. 23
Figure II.1 : Champ de production de TIGUENTOURINE dans la région d'In Amenas…. 27
Figure II.2 : Système d'admission et d'évacuation par canalisation…… 29
Figure II.3 : Situation des puits et réseau de collecte……...…… 29
Figure II.4 : Organigramme fonctionnel simplifié du CPF d'IA……..…… 31
Figure II.5 : Organisation de l'entreprise du CPF d'IA…… 32
Figure II.6 : Le triangle du feu…….. 34
Figure II.7 : Les moyens d'extinction adaptés au type de feu…….. 35
Figure II.8 : Modes de propagation de l'incendie……..… 37
Figure II.9 : Photo illustrant les composantes du Réseau Anti–Incendie……. 43
Figure II.10 : Poteau d'incendie (PI) ……... 44
Figure II.11 : Armoire d'incendie…….…… 45
Figure II.12 : Lance monitor fixe (LMF) ……..…… 46
Figure II.13 : Robinets d'incendie armés (RIA) ……...…… 46
Figure II.14 : Les diffuseurs (cas des aéros) …… 47
Figure II.15 : Skid de déclenchement de Système déluge…… 47
Figure II.16 : Image qui clarifie les composantes du système rideaux d'eau……..…… 49
Figure II.17 : Rideau d'eau au niveau de stockage GPL……..…… 49
Figure II.18 : Image qui clarifie les composantes du système à mousse…….…… 50
Figure II.19 : Schéma principe du mousse……...…… 51
Figure II.20 : Diffuseurs à mousse au niveau de stockage condensat (bac à toit flottant)... 52
Figure III.1 : Niveau de criticité des composants du réseau anti-incendie CPF (2014–2024) …… 56
Figure III.2 : Schéma synoptique d'une pompe centrifuge……. 60
Figure III.3 : Schéma du moteur diesel……. 62
Figure III.4 : Image illustrant la commande donnée à IA …… 79
Figure III.5 : Image illustrant les résultats par IA …… 79
Figure III.6 : Expertise humaine avec IA……. 95

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

1. Problématique de recherche

La sécurité industrielle constitue un enjeu majeur dans les installations à risques, notamment celles opérant dans les secteurs pétroliers, chimique ou agroalimentaire. Les incidents récents survenus dans de telles installations ont révélé des lacunes importantes en matière de fiabilité et de disponibilité des systèmes de protection incendie, en particulier lorsque des composants critiques tels que les pompes ou les moteurs sont sollicités. La défaillance de ces équipements, censés constituer des barrières techniques essentielles, peut considérablement aggraver les conséquences d'un sinistre.

Dans ce contexte, la gestion proactive des défaillances potentielles des composants du réseau de lutte contre l'incendie devient une priorité. Elle permet de renforcer la résilience des installations industrielles tout en assurant la conformité aux exigences réglementaires et normatives en matière de sécurité. Parmi les outils mobilisés pour répondre à cet objectif, la méthode AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) est largement utilisée pour analyser et hiérarchiser les risques techniques.

L'AMDEC se distingue par sa capacité à fournir une vision systémique des vulnérabilités techniques et organisationnelles d'un système. Appliquée à un réseau de lutte contre l'incendie, elle permet de prévoir les modes de défaillance les plus probables et d'orienter les actions de maintenance vers les composants les plus critiques. Cependant, cette méthode traditionnelle repose fortement sur le jugement des experts, ce qui peut introduire un certain degré de subjectivité. De plus, les démarches manuelles classiques présentent parfois des limites en termes de précision et de mise à jour des données.

Afin d'améliorer l'efficacité de cette approche, la présente étude vise à comparer les résultats issus d'une AMDEC manuelle avec ceux générés par un outil numérique avancé : Mechanical Engineering Assistant (version payante). Cette analyse a été appliquée aux composants du réseau incendie d'une unité industrielle spécifique : le CPF d'In Amenas, site géré en partenariat entre Sonatrach, ENI et Equinor. L'objectif est d'évaluer l'apport de l'intelligence artificielle en termes de fiabilité, de rapidité et de cohérence dans l'analyse des risques, tout en contribuant à l'optimisation de la performance du système de lutte contre l'incendie et des décisions en matière de maintenance préventive et corrective.

2. Objectifs du mémoire

Cette étude poursuit deux objectifs principaux :

Le premier objectif est d'appliquer la méthode AMDEC aux composants critiques (pompes, moteurs, etc.) du réseau de lutte contre l'incendie du site CPF à In Amenas, afin d'identifier les modes de défaillance potentiels, d'en analyser les effets et d'évaluer leur criticité.

Le second objectif est de comparer les résultats obtenus manuellement avec ceux générés par l'outil Mechanical Engineering Assistant (version payante), afin d'évaluer la pertinence de l'intelligence artificielle comme outil complémentaire dans une démarche d'analyse de risques rigoureuse et structurée.

3. Organisation du mémoire

Ce mémoire est structuré comme suit :

- **Chapitre I :** Il présente le cadre théorique relatif à la sécurité incendie, à la méthode AMDEC et à l'intégration de l'intelligence artificielle, avec un focus sur Mechanical Engineering Assistant (version payante).
- **Chapitre II :** Il est consacré à la présentation de l'entreprise (CPF In Amenas) et de son système de lutte contre l'incendie.
- **Chapitre III :** Il expose les résultats de l'application de la méthode AMDEC manuelle, ainsi que ceux générés par Mechanical Engineering Assistant (version payante), suivis d'une analyse comparative.

Enfin, la thèse sera clôturée par une conclusion générale décrivant le travail réalisé Et les perspectives envisagées.

CHAPITRE I : PRESENTATION DE L'AMDEC ET DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE (Mechanical Engineering Assistant) VERS UNE OPTIMISATION DE L'ANALYSE DES RISQUES

Chapitre I : Présentation de l'AMDEC et de l'intelligence artificielle (Mechanical Engineering Assistant) vers une optimisation de l'analyse des risques

Introduction

Actuellement, la gestion des risques est un enjeu fondamental pour assurer la sécurité et la fiabilité des systèmes industriels. Face aux nombreux dangers potentiels, il est primordial d'adopter des stratégies et des outils d'analyse des risques permettant d'identifier, d'évaluer et de maîtriser ces derniers. Parmi ces outils, l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) se distingue par son approche méthodique et préventive dans l'évaluation des défaillances et de leurs impacts.

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord introduire les concepts clés liés à l'évaluation des risques et aux différentes méthodes d'analyse utilisées dans le domaine industriel. Ensuite, nous détaillerons le principe de l'AMDEC, son application et ses avantages dans l'amélioration de la sécurité des systèmes. Nous aborderons également d'autres outils complémentaires permettant une meilleure évaluation des risques. Enfin, nous explorerons le rôle de l'intelligence artificielle (IA) et plus particulièrement de Mechanical Engineering Assistant dans l'optimisation du processus AMDEC, en mettant en évidence la valeur ajoutée des versions avancées et payantes de Mechanical Engineering Assistant dans l'amélioration de l'identification et de la gestion des défaillances.

1 Concepts et Définitions de l'Analyse des Risques

L'analyse des risques repose sur un ensemble de concepts et de définitions issus de normes et de référentiels réglementaires. Cette section met en lumière les notions fondamentales permettant de structurer une démarche efficace d'identification et de maîtrise des risques.

1.1 Notion de Danger

Le concept de danger est défini par la directive 96/82 /CEI **[1]** comme une propriété intrinsèque d'une substance dangereuse ou d'une situation physique susceptible d'engendrer des dommages à la santé humaine et/ou à l'environnement.

Le référentiel OHSAS 18001 **[2]** élargit cette définition en considérant le danger comme une source ou une situation pouvant entraîner des blessures, des atteintes à la santé, des dommages matériels et environnementaux sur le lieu de travail.

1.2 Notion de Risque

Le risque est une notion clé dans l'analyse des dangers. Villemeur [3] le définit comme une mesure du danger, associée à une estimation de l'occurrence d'un événement indésirable et de ses effets ou conséquences.

La norme ISO [ISO, 1999] propose une définition plus détaillée, décrivant le risque comme une combinaison de la probabilité d'occurrence d'un dommage et de sa gravité. Cette approche met en évidence plusieurs paramètres influençant le risque, tels que :

- La fréquence et la durée d'exposition au phénomène dangereux.
- La probabilité d'occurrence d'un événement redouté.
- Les moyens techniques et humains d'atténuation du dommage.
- La nature des éléments exposés (humains, biens, environnement).

Mathématiquement, cette relation est exprimée sous la forme :

Risque (R) = Probabilité (P) × Gravité (G)

Cette relation est souvent représentée graphiquement par une matrice de criticité, permettant de différencier les niveaux de risque acceptables, tolérables et inacceptables **[4].**

1.3 Facteurs d'Influence du Risque

Les facteurs d'influence du risque sont des paramètres qui, bien que ne pouvant être directement prouvés comme causes uniques, jouent un rôle significatif dans la séquence accidentelle **[5]**. Ces facteurs peuvent avoir une influence positive ou négative sur la probabilité d'occurrence d'un événement redouté.

Ils sont généralement liés à des caractéristiques spécifiques des installations étudiées et peuvent être regroupés en plusieurs catégories :

- Organisationnels
- Techniques
- Humains
- Procéduraux
- Administratifs, Systémiques et opérationnels **[6]**.

1.4 Notion de Criticité et Grille de Criticité

La notion de criticité résulte de l'agrégation de deux dimensions :

- La gravité des conséquences
- La probabilité d'occurrence

L'ensemble des niveaux de risque sont ajustés et classés selon leur importance dans une matrice de criticité (Figure I.1). Cette grille permet d'évaluer si un risque est acceptable, tolérable ou inacceptable, facilitant ainsi la prise de décision quant aux mesures de réduction nécessaires.

		Échelle de gravité				
		A-Négligeable	B-Significative	C-Majeure	D-Grave	E-Catastrophique
Échelle de fréquence	1-Improbable					
	2-Rare					
	3-Occasionnelle					
	4-Fréquente					
	5-Très Fréquente					

Criticité (C1)	Correspond à un risque acceptable
Criticité (C2)	Correspond à un risque tolérable
Criticité (C3)	Correspond à un risque inacceptable

Figure I.1 : Grille de criticité en fonction de probabilité et de gravité [24].

1.5 Démarche de Gestion des Risques

La gestion des risques constitue un enjeu fondamental pour toute activité industrielle. Selon le guide ISO/CEI 51 et 73 **[1],** elle est définie comme l'ensemble des activités coordonnées visant à réduire le risque à un niveau tolérable ou acceptable dans un contexte donné.

La norme ISO 27005 **[7]** propose une démarche itérative de gestion des risques comprenant plusieurs étapes essentielles :

- Identification des risques
- Estimation des risques

- Analyse des risques
- Évaluation des risques
- Traitement et surveillance des risques.

2 Les méthodes d'analyse des risques dédiées aux barrières de sécurité

2.1 Classification des Méthodes d'Analyse de Risques

L'analyse des risques repose sur diverses méthodologies classées selon leur nature et leur approche. Le tableau ci-dessous présente ces méthodes en les catégorisant en analyses qualitatives, semi-quantitatives et quantitatives, tout en indiquant leur approche (inductive, déductive ou mixte). Cette classification permet de mieux comprendre leur application dans l'évaluation et la gestion des risques.

Tableau I.1 : classification des Méthodes d'Analyse de Risques.

Méthodes	Quantitative / Qualitative / Semi-Quantitative	Approche (Inductive / Déductive / Mixte)
APR (Analyse Préliminaire des Risques)	Qualitative	Inductive
HAZID (Hazard Identification)	Qualitative	Inductive
HAZOP	Qualitative	Inductive
What-if	Qualitative	Inductive
AMDE / FMEA	Qualitative	Inductive
Arbre des défaillances (Fault Tree)	Qualitative	Déductive
Arbre des événements (Event Tree)	Qualitative	Inductive
Nœud papillon (Bow Tie)	Qualitative	Mixte (Inductive & Déductive)
HAZOP (C) - HAZID (C) - AMDEC - SIL	Semi-Quantitative	Inductive
Arbres (dans l'analyse semi-quantitative)	Semi-Quantitative	Déductive
Méthode UFIP	Semi-Quantitative	Inductive
Étude des conséquences	Quantitative	Inductive
QRA (Quantitative Risk Assessment)	Quantitative	Inductive

2.2 La méthode AMDEC

2.1.1 Généralités

Avant d'approfondir la méthode AMDEC, il est essentiel de se familiariser avec certains concepts clés.

Maintenance

Selon la norme NF EN 13306, la maintenance est définie comme l'ensemble des actions techniques, administratives et de gestion effectuées durant le cycle de vie d'un équipement, dans le but de le maintenir ou de le restaurer dans un état où il peut accomplir sa fonction requise.

Les Types de Maintenance :

On distingue plusieurs types de maintenance, chacune adaptée à des besoins spécifiques :

- **Maintenance corrective :** réalisée après la survenue d'une défaillance pour rétablir l'équipement dans un état fonctionnel. Elle se divise en :
  - **Maintenance corrective différée :** intervention planifiée après la détection d'une panne
  - **Maintenance corrective d'urgence :** intervention immédiate après la détection d'une panne afin d'éviter des conséquences critiques **[8].**
- **Maintenance préventive :** vise à réduire la probabilité de défaillance et à prolonger la durée de vie des équipements. Elle se décline en :
  - **Maintenance préventive systématique :** réalisée à des intervalles de temps prédéfinis, indépendamment de l'état réel de l'équipement.
  - **Maintenance préventive conditionnelle :** basée sur la surveillance des paramètres de fonctionnement et l'analyse des indicateurs de performance pour anticiper les interventions **[8].**

- **Maintenance améliorative :** consiste à apporter des modifications ou des améliorations aux équipements afin d'augmenter leur fiabilité, leur efficacité et leur conformité **[8].**

Le diagramme suivant synthétise selon la norme NF EN 13306 les méthodes de Maintenance.

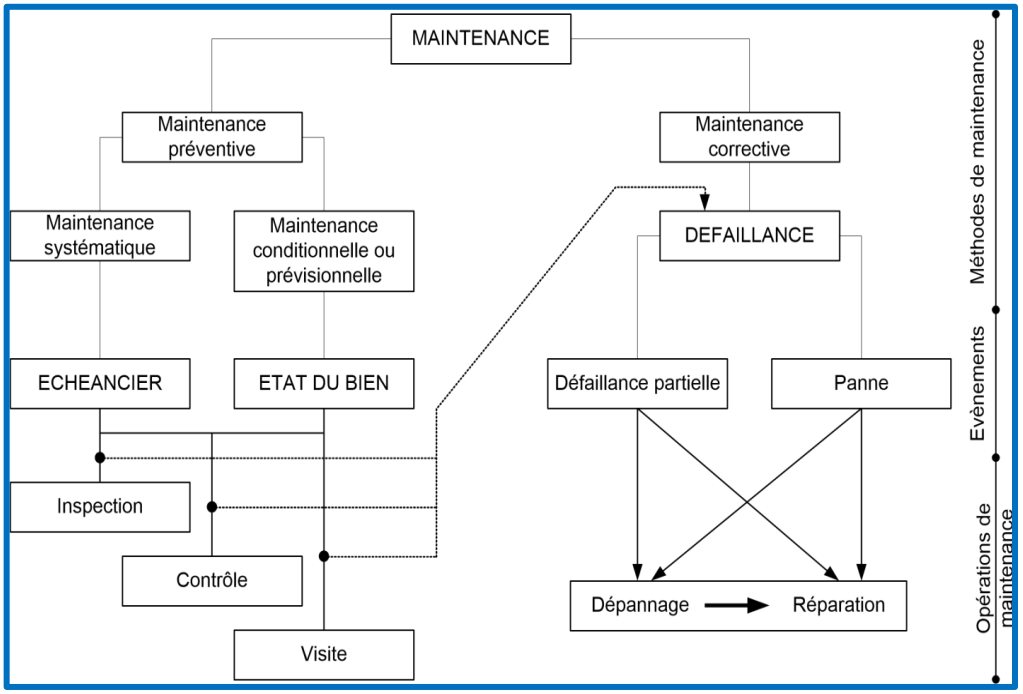


Figure I.2 : Un diagramme qui synthétise les méthodes de maintenance selon la norme NFX 60-000 [25].

Les Avantages de Maintenance

- Réduction des pannes et des interruptions de production.
- Allongement de la durée de vie des équipements.
- Optimisation des coûts en réduisant les réparations d'urgence.
- Sécurité améliorée pour les travailleurs et les infrastructures.
- Qualité et productivité accrues grâce à des équipements fiables.
- Impact environnemental réduit en évitant la surconsommation d'énergie et les déchets.
- Coût initial élevé pour mettre en place un bon programme de maintenance.

Les Limites de Maintenance

- Complexité de gestion nécessitant une planification et des compétences techniques.
- Coût initial élevé pour mettre en place un bon programme de maintenance
- Dépendance aux technologies avancées (GMAO, capteurs, IA).
- Imprévisibilité de certaines pannes malgré les analyses prédictives.

La Défaillance

La défaillance est définie comme l'altération ou la perte de l'aptitude d'un bien à accomplir sa fonction requise. Selon la norme NF EN 13306, on distingue :

- **Défaillance partielle :** l'équipement fonctionne encore mais avec une perte de performance.
- **Défaillance complète :** l'équipement est totalement hors service et nécessite une intervention corrective [8]

Modes de défaillance :

D'après BISCON.I, un mode de défaillance est la manière dont un système ne parvient plus à remplir sa fonction. Il est défini à partir de l'analyse fonctionnelle, qui identifie les écarts au fonctionnement prévu [9].

Selon KELADA J., un mode de défaillance correspond à la manifestation d'une anomalie dans un produit, un composant, un processus ou une organisation, entraînant un écart par rapport aux spécifications [10].

Causes d'une défaillance :

Une cause de défaillance correspond à l'événement initial susceptible d'entraîner une anomalie dans un système. Un même mode de défaillance peut avoir plusieurs causes, et une même cause peut être à l'origine de plusieurs modes de défaillance [11].

Effets d'une défaillance

L'effet d'une défaillance est la conséquence perçue par l'utilisateur ou l'environnement du système. Il est associé à un mode et une cause de défaillance donnés [11].

2.2.2 L'AMDEC - Évolution et principes

L'AMDEC est une amélioration de l'AMDE intégrant la notion de criticité. Elle permet d'identifier, hiérarchiser et traiter préventivement les risques critiques d'un système [12].

Historique et domaines d'application :

Développée aux États-Unis dans les années 1960 par McDonnell Douglas et la NASA (sous le nom de FMEA), l'AMDEC a été adoptée dans des secteurs variés comme l'aéronautique, l'automobile et l'électronique [10]. Aujourd'hui, elle est largement utilisée en mécanique, chimie, informatique et services.

Principe de la méthode :

L'AMDEC repose sur l'analyse des quatre éléments suivants (Tableau I.4.1) :

Tableau I.2: Les quatre questions de base de l'AMDEC.

Modes de défaillance	Effets possibles	Causes possibles	Plans de surveillance
Qu'est-ce qui pourrait aller mal ?	Quels pourraient être les effets ?	Quelles pourraient être les causes ?	Comment les détecter ?

Types d'AMDEC :

- **AMDEC organisationnelle :** appliquée aux processus de gestion
- **AMDEC produit :** intégrée dans la conception des produits
- **AMDEC composants :** dédiée à l'analyse des éléments techniques
- **AMDEC sécurité :** garantissant la protection des opérateurs
- **AMDEC moyen :** appliquée aux équipements et systèmes

- **AMDEC service :** optimisant les prestations aux clients
- **AMDEC processus :** analysant les chaînes de production [13].

La démarche AMDEC

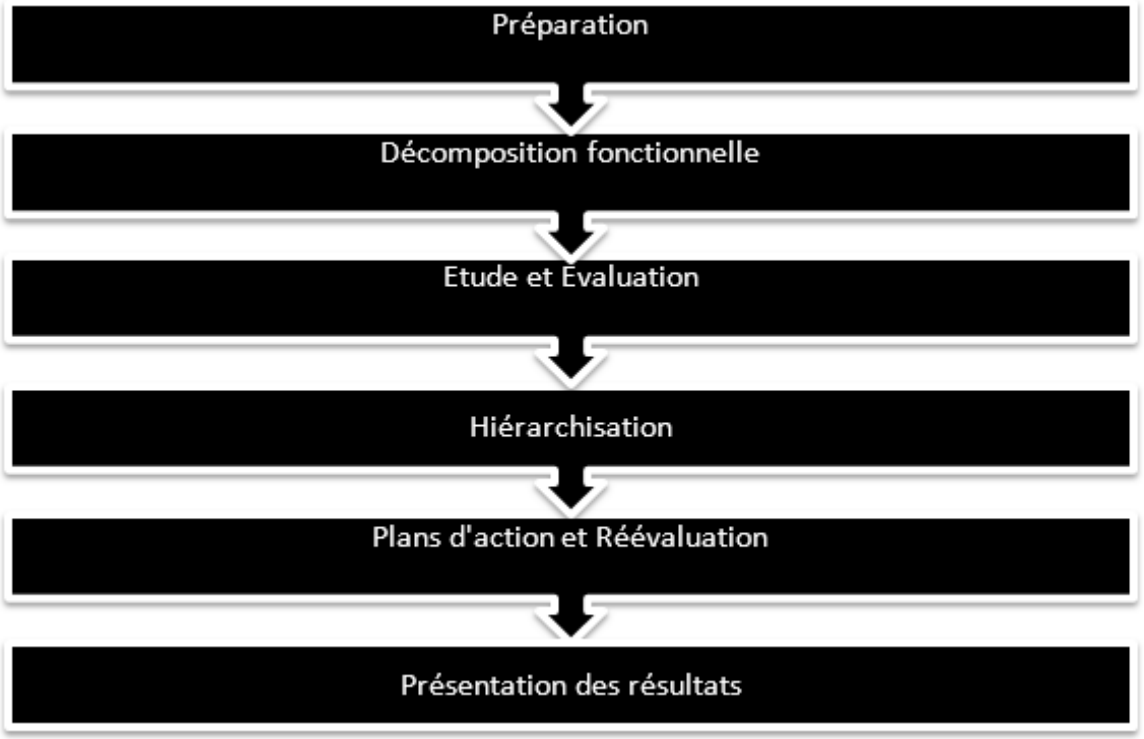


Figure I.3: Etapes principales de la démarche AMDEC.

- **Phase de préparation**

- **Constitution de l'équipe :** regroupe des experts du domaine étudié, sous la supervision d'un animateur [13].

- **Élaboration du tableau AMDEC :** inclut l'identification des composants, modes de défaillance, causes, effets et plans d'action.

- **Décomposition fonctionnelle**

- Identification des fonctions principales, contraintes et élémentaires
- Analyse fonctionnelle du système étudié.

Tableau I.3: Exemple de Tableau AMDEC pour le réseau de distribution d'eau potable

Élément	Fonction	Modes des défaillances	Les causes	Les effets	Modes de détection	O	G	N	C	Action correctif
Filtre d'entrée	Retenir les impuretés dans le collecteur d'aspiration	Obstrué / Fuite	Dépôt de sédiments / Usure	Réduction du débit d'eau	Inspection visuelle	2	3	3	18	Nettoyage / Remplacement
Vanne de régulation	Contrôler le débit d'eau	Bloquée (ouverte/fermée)	Accumulation de calcaire	Dysfonctionnement du réseau	Inspection visuelle	3	3	2	18	Détartrage / Lubrification
Tuyau de refoulement	Transporter l'eau sous pression	Fuite / Fissure	Corrosion / Pression excessive	Perte de pression	Manomètre	3	3	3	27	Réparation immédiate
Réservoir d'eau	Stocker l'eau pour distribution	Contamination	Mauvaise étanchéité du couvercle	Risque sanitaire	Analyse de l'eau	4	4	3	48	Désinfection et réparation

- **Étude et évaluation**

- **Étude qualitative**

L'équipe AMDEC commence par identifier les défaillances associées à chaque élément du système afin de déterminer les différents modes de défaillance. Ensuite, les effets probables liés à chaque mode ainsi que les causes les plus fréquentes sont analysés.

La décomposition fonctionnelle permet d'établir une relation entre les causes en amont et les effets en aval.

Dans le cas d'un calculateur arithmétique, il est possible d'identifier plusieurs modes de défaillance grâce à une analyse fonctionnelle :

Tableau I.4: Exemple de modes de défaillances et de causes possibles du calculateur

Modes de défaillance	Causes possibles
Absence de réception des données	Dysfonctionnement des boutons, problème interne difficilement détectable
Incapacité à effectuer des calculs	Présence de poussière dans l'unité de calcul
Calculs erronés	Défaut au sein de l'unité, impossible à détecter
Absence d'affichage	Afficheur endommagé ou défectueux, alimentation insuffisante

L'analyse qualitative permet une description détaillée des défaillances rencontrées, mais une approche fondée sur des valeurs chiffrées est nécessaire pour obtenir une évaluation plus fiable et robuste. L'étude quantitative est donc essentielle.

❖ Étude quantitative

L'évaluation de la criticité, aussi appelée Indice de Priorisation des Risques (IPR), repose sur une estimation basée sur plusieurs critères. Une défaillance présentant une criticité élevée se caractérise par :

- Des conséquences significatives.
- Une fréquence d'apparition importante.
- Une difficulté accrue à la détecter.

Les paramètres utilisés sont :

- **G :** Gravité des effets sur l'utilisateur ou le client.
- **F (ou O) :** Fréquence d'apparition de la défaillance.
- **D :** Probabilité de non-détection, traduisant le risque qu'une anomalie passe inaperçue.
- **C (ou IPR) :** Produit des trois paramètres : **C=G×F×D**.

❖ Évaluation de la criticité

Différentes grilles d'évaluation existent selon les domaines d'application de l'AMDEC. Généralement, les paramètres sont notés de 1 à 10, une valeur élevée indiquant un niveau plus critique.

D'autres critères peuvent être intégrés, en fonction du contexte spécifique analysé par l'équipe de travail.

Tableau I.5 : Exemple de grille d'évaluation de l'IPR

Paramètre	1	5	10
Fréquence F	Très rare	Fréquent	Permanent
Gravité G	Mineure	Majeure	Catastrophique
Non-détection	Facilement détectable	Détection nécessitant un dispositif	Indétectable

.

- **Plan d'actions structuré**

L'objectif central de l'AMDEC est d'identifier les défaillances critiques puis de proposer un plan d'actions structuré.

Trois types d'actions sont définis :

- **Préventives :** intervention en amont pour empêcher la survenue d'une défaillance, ce qui requiert une planification [12].
- **Correctives :** résolution rapide du problème lorsque la situation n'est pas critique.
- **Amélioratrices :** modifications techniques ou procédurales visant l'élimination définitive du problème (investissement significatif).

L'efficacité des actions repose sur un suivi rigoureux : plan d'action détaillé, attribution des responsabilités, définition des délais et budgets, ainsi qu'une réévaluation après mise en œuvre des solutions.

- **Présentation des résultats**

Après l'évaluation finale, un bilan est établi, rassemblant l'ensemble des informations recueillies sous la forme d'un tableau AMDEC. Un tableau de synthèse est également élaboré, intégrant diverses données essentielles, notamment les actions correctives et préventives associées à chaque mode de défaillance identifié, ainsi que la désignation des responsables en charge de leur mise en œuvre.

2.3 L'Arbre de Défaillance (AdD)

L'Arbre de Défaillance, ou Fault Tree Analysis (FTA), est une méthode probabiliste et déductive développée par H.A. Watson et M.A. Mearns en 1961. Initialement employée dans le secteur des armes aériennes américaines, elle s'est ensuite généralisée à divers domaines industriels [14].

Cette approche repose sur l'identification systématique des causes pouvant conduire à un événement indésirable. Elle utilise une représentation arborescente symbolisée permettant de décomposer un problème jusqu'à atteindre un niveau fondamental de causes élémentaires [15].

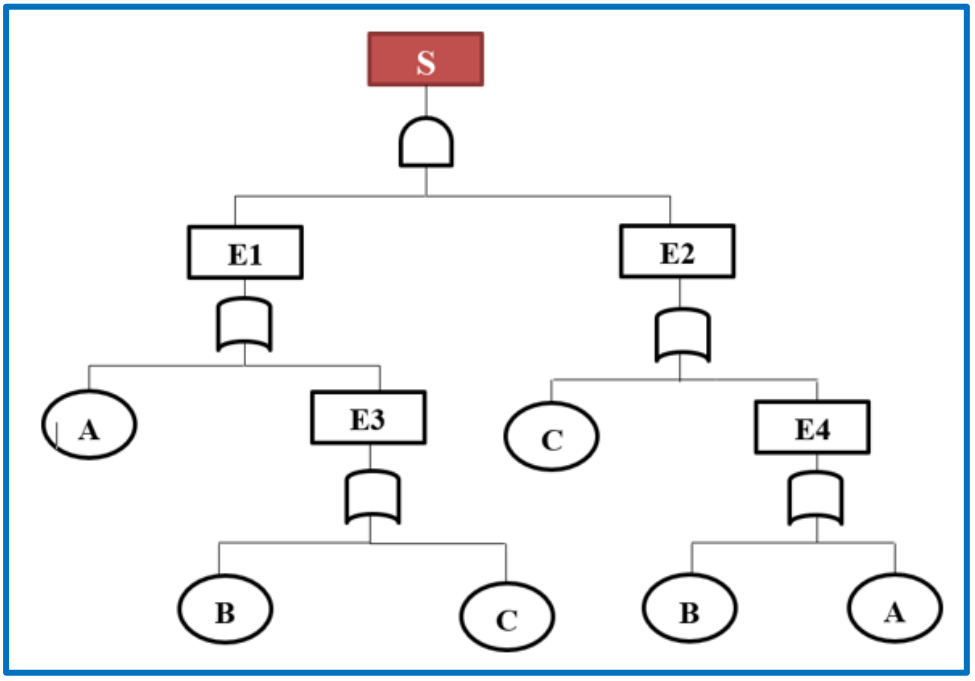


Figure I.4 : Exemple d'arbre de défaillances [26].

L'AdD est structuré autour de plusieurs composants :

- **Porte ET :** Représente une combinaison d'événements nécessaires pour provoquer une défaillance.
- **Porte OU :** Indique qu'un seul des événements en entrée peut entraîner l'événement en sortie.
- **Événement de base :** Un facteur fondamental, non décomposable.
- **Événement intermédiaire :** Résulte de plusieurs événements de base combinés.
- **Événement non développé :** Non détaillé dans l'analyse mais pris en compte.

- **Transfert In/Out :** Permet de simplifier la lecture des grands arbres en reliant plusieurs sections.

Tableau I.6: La symbolique des événements [26].

Symbole	Nom	Signification
	Rectangle	**Evénement redouté ou événement intermédiaire**
	Cercle	**Evénement intermédiaire**
	Losange	**Evénement élémentaire non développé**
	Double losange	**Evénement élémentaire dont le développement est à faire ultérieurement**
	**Maison**	**Evénement de base survenant normalement pour le fonctionnement du système**

2.4 L'Arbre d'Événements (AdE)

L'Arbre d'Événements, ou Event Tree Analysis (ETA), est une méthode inductive également connue sous le nom d'Arbre des Conséquences [16;15]. Développée dans les années 1970 pour les centrales nucléaires aux États-Unis, elle permet d'évaluer les conséquences de divers scénarios liés à un événement initial.

Le processus d'analyse repose sur quatre étapes fondamentales :

- **Définition de l'événement initiateur :** Identification de la défaillance initiale à analyser.
- **Identification des fonctions de sécurité :** Détermination des barrières mises en place pour limiter les conséquences.
- **Construction de l'arbre :** Schématisation des différentes séquences d'événements.
- **Exploitation des conséquences :** Évaluation des résultats possibles, en termes de succès ou d'échec.

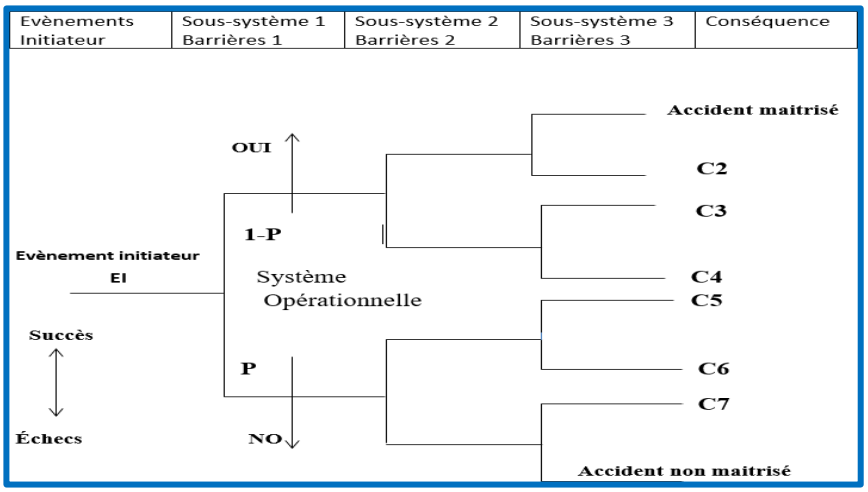


Figure I.5: Structure d'un Arbre d'événement [26].

L'ADE est particulièrement efficace pour visualiser les chemins possibles qu'un système peut emprunter suite à une anomalie, tout en tenant compte des mécanismes de protection existants.

.

2.5 La méthode du Nœud Papillon

Développée par Nielsen en 1971 et améliorée dans les années 1990 [17;18], la méthode du Nœud Papillon (ou Bowtie Method) est une approche combinant l'AdD et l'AdE autour d'un même événement redouté.

Elle analyse les risques en intégrant trois éléments clés :

- **Les causes :** Éléments déclencheurs identifiés à l'aide d'un Arbre de Défaillance.
- **Les conséquences :** Résultats possibles modélisés à travers un Arbre d'Événements.
- **Les barrières de sécurité :** Dispositifs de prévention (avant l'événement) et de réduction des conséquences (après l'événement).

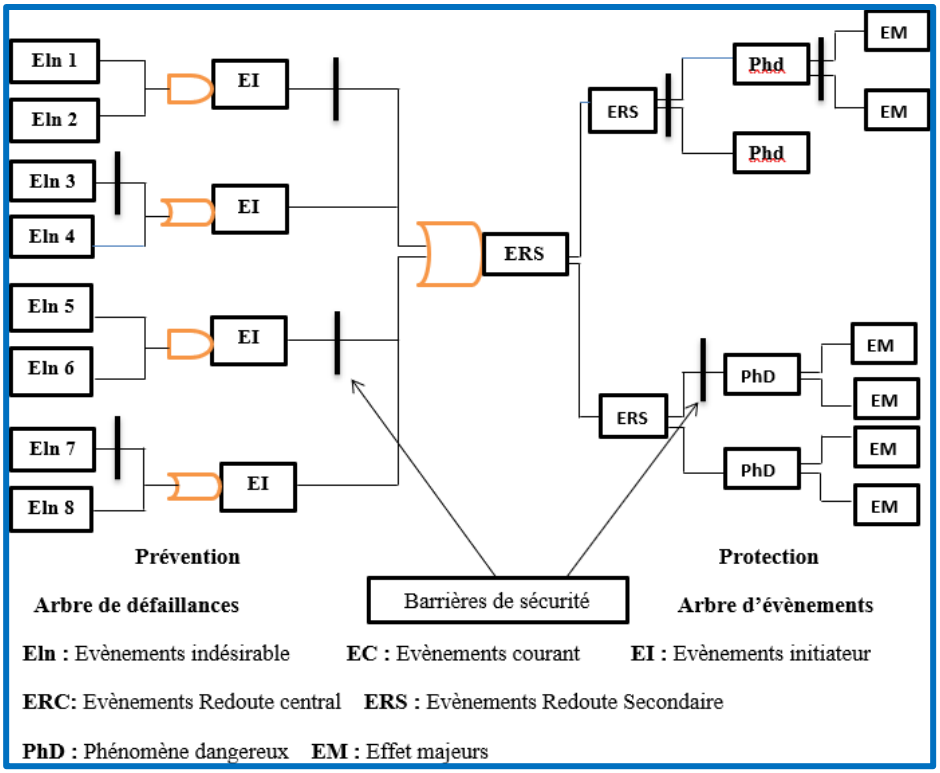


Figure I.6 : Schéma de nœud papillon [26]

Grâce à cette approche graphique et systémique, la méthode du Nœud Papillon permet une meilleure visibilité des mesures de gestion des risques, facilitant ainsi la prise de décision en matière de sécurité [19].

2.6 Méthode HAZOP (Hazard and Operability Study)

La méthode HAZOP est un outil d'analyse qualitatif, largement utilisé dans l'industrie pétrochimique pour identifier les problèmes potentiels pouvant entraîner des dérives par rapport à la conception et au fonctionnement normal d'un système industriel. Elle vise ainsi à analyser les causes et les conséquences de ces dérives afin d'améliorer la sécurité des installations [20].

Objectifs et champ d'application

La méthode HAZOP est généralement mise en œuvre à la fin de la phase de conception et en phase d'exploitation, plus précisément au début de la réalisation des systèmes industriels. Son analyse repose sur l'étude des plans de circulation des fluides et des schémas détaillés PID (Piping and Instrumentation Diagram) du système étudié [21;22].

Déroulement de l'analyse

L'approche HAZOP repose sur la décomposition du système en plusieurs sous-parties (comme les lignes de circulation des fluides). Ensuite, tous les paramètres essentiels au fonctionnement du système doivent être identifiés. En général, ces paramètres incluent [23] : La température, La pression, Le débit et Le temps de fonctionnement.

Ces paramètres peuvent subir des variations anormales, qu'elles soient d'origine intrinsèque (problèmes internes) ou extrinsèque (facteurs externes). Parmi les dérives potentielles les plus courantes, on peut citer :

- Une augmentation ou une diminution du débit,
- Une élévation ou une diminution de la température ou de la pression,
- Un dépassement du temps de fonctionnement prévu.

Identification des risques et des barrières de sécurité

Chaque dérive potentielle peut engendrer des conséquences négatives sur le fonctionnement du système, voire sur la sécurité des installations et du personnel. Pour anticiper ces risques, la méthode HAZOP identifie :

- Les moyens de détection des anomalies,
- Les barrières de sécurité mises en place pour limiter l'occurrence et les conséquences des accidents liés à ces dérives.

Dans le cadre de notre étude de cas, cette méthode sera appliquée afin d'identifier les différents scénarios d'accidents, permettant ainsi une meilleure maîtrise des risques et une optimisation des mesures de prévention.

Tableau I.7 : Exemple de tableau pour l'HAZOP [26]

Date : Ligne ou équipement :								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
N°	Mot- clé	Paramètre	Causes	Conséquences	Détection	Sécurités existantes	Propositions d'amélioration	Observations

3 L'IA et Chat-GPT

3.1 L'IA, de Turing à Chat-GPT

3.1.1 L'IA, essai de définition

- **L'IA dans l'éducation : une évolution récente**

L'intégration de l'intelligence artificielle générative (IAg) dans l'enseignement universitaire est un phénomène récent. Son impact doit être analysé sous un angle praxéologique, car elle modifie les pratiques pédagogiques. En effet, l'IAg permet d'accomplir des tâches complexes autrefois réservées aux humains, comme la rétroaction et l'adaptation du matériel didactique selon le niveau des élèves [27].

- **Une omniprésence dans la vie quotidienne et l'enseignement**

L'IAg est désormais présente dans de nombreux aspects de notre quotidien, des assistants virtuels aux algorithmes de recommandation. Cependant, c'est dans l'enseignement supérieur que son utilisation s'est le plus développée. Elle offre des opportunités considérables dans la résolution de problèmes, la génération de contenus et l'exécution de diverses tâches [27].

- **L'essor de l'IA générative avec ChatGPT**

L'année 2022 a marqué une avancée majeure avec le lancement de ChatGPT, un agent conversationnel basé sur l'IA générative. Toutefois, d'autres outils similaires, bien que moins performants, étaient déjà utilisés par les étudiants pour la formulation d'idées et la rédaction des documents [28]. Ces technologies facilitent ainsi le travail académique et professionnel [29].

3.1.2 Qu'est-ce que ChatGPT ?

Chat-GPT est un agent conversationnel basé sur l'intelligence artificielle, développé par Open-AI. Son nom est composé de « chat » (discussion en ligne) et « GPT » (Generative Pre-trained Transformer). Il est conçu pour analyser des requêtes textuelles et générer des réponses pertinentes grâce à des algorithmes avancés d'apprentissage automatique.

Toutefois, son utilisation, suscite des débats sur ses implications éthiques et la fiabilité des informations fournies [30]. Bien qu'il offre de nombreux avantages, il peut produire des réponses inexactes ou biaisées, nécessitant une vérification critique. De plus, certaines études signalent que ses ressources éducatives reflètent principalement des cadres culturels européens, risquant ainsi d'exclure certains apprenants [31]. Ces limites appellent à une utilisation encadrée et réfléchie de cette technologie.

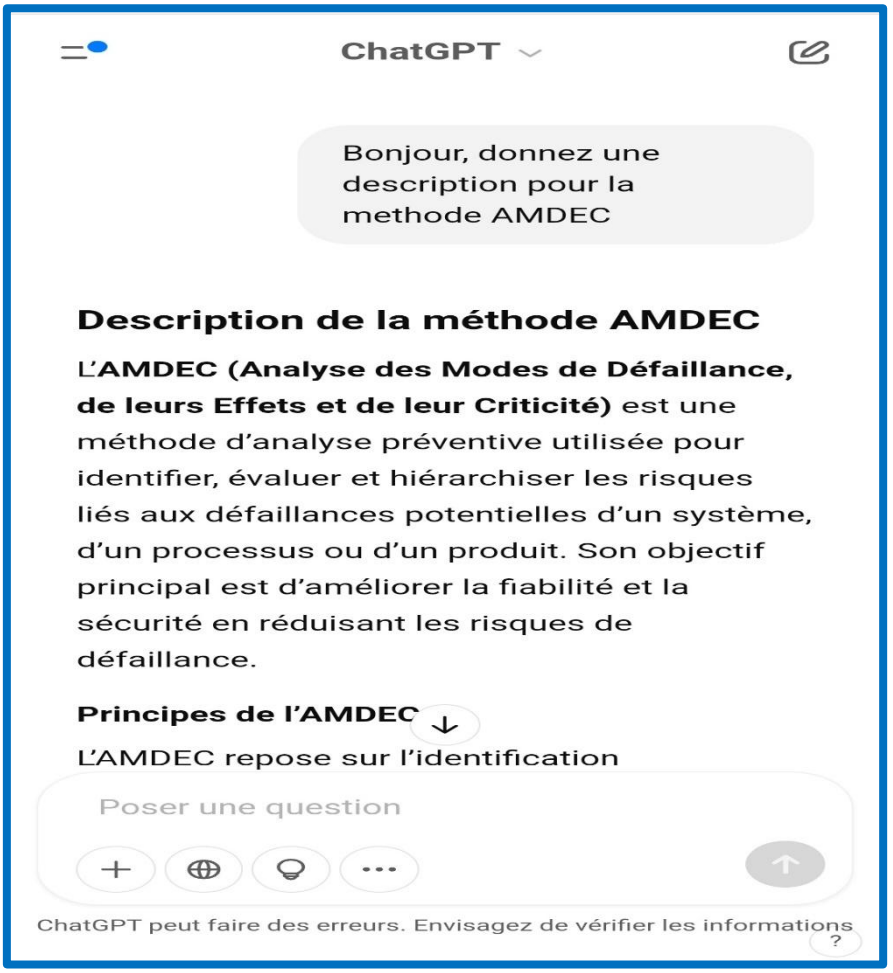


Figure I.7 : Exemple d'une conversation avec Chat-GPT.

Dans le cadre de ce travail de fin d'études, l'un des apports les plus significatifs et novateurs réside dans l'intégration ciblée d'un bot intelligent spécialisé en ingénierie mécanique, conçu à partir des fondements théoriques et pratiques présentés dans l'ouvrage Mechanical Engineering de **Jose V.F. Vieira**. Ce bot, conçu comme un assistant virtuel pour l'ingénieur, mobilise les dernières avancées de l'intelligence artificielle générative appliquées au domaine industriel, et plus particulièrement au diagnostic des systèmes techniques complexes.

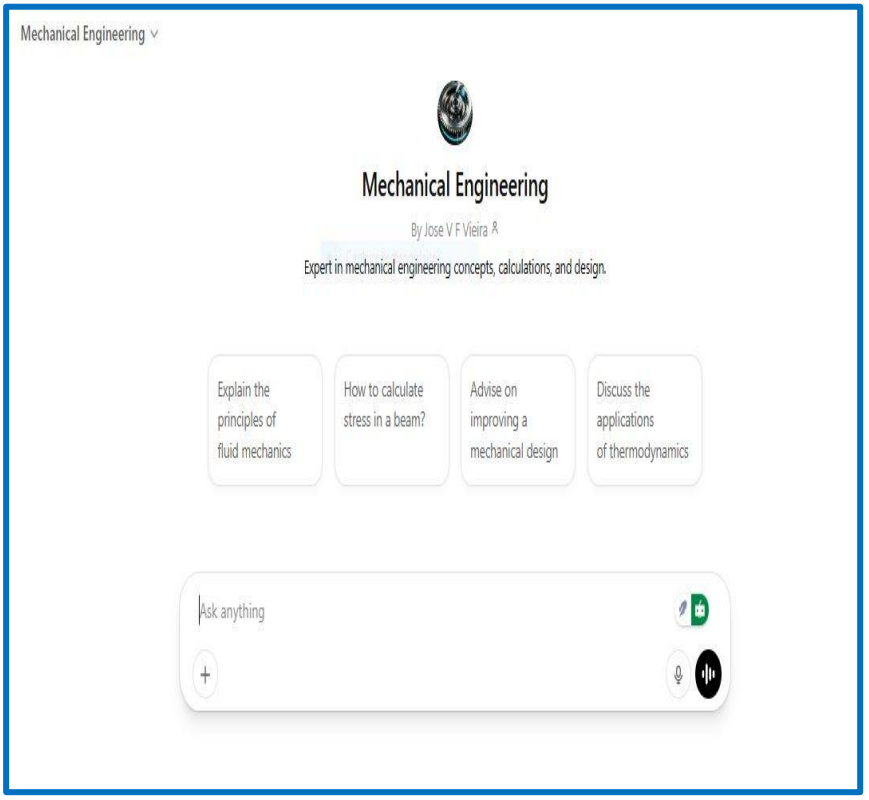


Figure I.8 : Interface d'utilisation du bot d'ingénierie mécanique utilisé pour la génération des tableaux AMDEC par intelligence artificielle.

- **Les avantages de Mechanical Engineering (version payante)**

  - Meilleure compréhension et génération de texte
  - Accès à des connaissances plus récentes
  - Temps de réponse plus rapide
  - Capacité avancée d'analyse et de résolution de problèmes
  - Gestion de conversations longues et complexes
  - Intégration avec d'autres outils

- **Les limites de Mechanical Engineering (version payante)**

  - Limité en pensée critique et raisonnement complexe
  - Risque de biais dans certaines réponses
  - Incapacité à vérifier les informations en temps réel
  - Coût d'abonnement élevé
  - Absence d'innovation ou de créativité véritable
  - Difficulté à interpréter certains contextes culturels complexes.

3.2 L'apport de Mechanical Engineering (version payante) dans l'amélioration de l'AMDEC

L'utilisation de Mechanical Engineering (version payante) dans l'AMDEC permet une analyse plus rapide, plus précise et plus efficace des modes de défaillance. Grâce à ses capacités en traitement des données, en génération de recommandations et en automatisation des processus, Mechanical Engineering devient un atout majeur pour améliorer la fiabilité des systèmes et optimiser la gestion des risques industriels.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts fondamentaux de l'évaluation des risques ainsi que les outils d'analyse permettant de mieux anticiper et prévenir les défaillances dans les systèmes industriels. Nous avons accordé une attention particulière à l'AMDEC en expliquant son fonctionnement, son application et les bénéfices qu'elle apporte en matière de sécurité et de fiabilité. De plus, nous avons évoqué d'autres méthodes d'analyse complémentaires afin d'offrir une vision plus globale de la gestion des risques.

Enfin, nous avons exploré l'apport de l'intelligence artificielle et de Mechanical Engineering dans l'optimisation du processus AMDEC. L'utilisation des versions avancées de Chat-GPT permet non seulement une meilleure structuration des données, mais aussi une identification plus efficace des points critiques et des recommandations adaptées. Cette synergie entre l'AMDEC et l'IA ouvre ainsi de nouvelles perspectives pour l'amélioration continue des processus industriels, tout en posant des défis liés à l'intégration et à la fiabilité des analyses automatisées.

CHAPITRE II : PRESENTATION DE L'ENTREPRISE ET DU RESEAU DE LUTTE CONTRE L'INCENDIE

Chapitre II : Présentation de l'entreprise et du réseau de lutte contre l'incendie

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté l'outil AMDEC ainsi que l'apport de l'intelligence artificielle, notamment l'utilisation de Chat-GPT en version avancée, dans l'optimisation et le développement de cette méthode d'analyse. Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur la présentation de l'entreprise étudiée ainsi que sur la description détaillée de son réseau de protection contre l'incendie.

Nous mettons en lumière les principes de base liés au phénomène de l'incendie, avant d'aborder les principaux référentiels normatifs tels que la norme NF EN, les standards de la NFPA ainsi que les exigences du référentiel APSAD. En complément, le cadre législatif algérien en matière de sécurité incendie est également présenté afin de mieux situer les obligations réglementaires applicables à l'entreprise.

Cette approche nous permet de comprendre l'architecture du système de sécurité incendie de l'entreprise, tout en évaluant sa conformité aux normes en vigueur et son efficacité dans la prévention des risques liés au feu.

1 Présentation du champ gazier de TIGUENTOURINE « CPF »

1.1 Historique

Elle Exploité conjointement depuis 2006 par BP, EQUINOR et SONATRACH, le gisement de TIGUENTOURINE résulte d'un partenariat stratégique dédié à l'exploration, au développement et à l'exploitation du gaz naturel. Le gaz extrait est acheminé vers le Centre de Traitement de Gaz d'In Amenas via un réseau de collecteurs d'une capacité de 30 millions de m³ standard par jour, puis intégré au réseau de distribution de Sonatrach par l'intermédiaire de trois pipelines dédiés. L'acquisition par ENI de l'activité de BP en Algérie, réalisée en septembre 2022, constitue un tournant majeur dans le secteur énergétique, ENI apportant son expertise et ses technologies pour renforcer la croissance et la durabilité dans la région [32].

- **SONATRACH**

Entreprise publique algérienne, SONATRACH assure la recherche, la production, le transport, la transformation et la commercialisation des hydrocarbures. Acteur incontournable de l'économie nationale, le groupe intervient également dans la pétrochimie, la production d'électricité, les énergies renouvelables, le dessalement et l'exploitation minière [32].

- **ENI**

Société énergétique italienne présente sur l'ensemble de la chaîne de valeur, ENI intervient dans l'exploration, le développement et l'extraction de pétrole et de gaz naturel, ainsi que dans la production d'électricité issue de la cogénération et des énergies renouvelables. ENI développe également des initiatives de capture et de stockage du CO_2 [32].

- **EQUINOR**

Anciennement STATOIL, EQUINOR est une compagnie norvégienne spécialisée dans l'énergie pétrolière et éolienne, dont la majorité des actions (70,26 %) est détenue par l'État norvégien [32].

1.2 Description de la région d'In Amenas

In Amenas représente la principale zone d'exploitation de gaz humide en Algérie. Située dans le bassin d'Illizi à l'est du pays, la région se trouve à environ 1 300 km d'Alger. La ville d'In Amenas est implantée à 250 km au nord d'Illizi et à environ 500 km au sud de Hassi Messaoud [33].



Figure II.1 : illustre le champ de production de TIGUENTOURINE dans cette région.

1.3 Fiche technique

Le Centre de Traitement de Gaz (CPF d'IA) est conçu pour assurer la production de trois produits : gaz naturel, GPL et condensat, répartis sur trois trains de traitement.

- **Gaz résiduel**

Composé à 89 % de Méthane (CH_4) et à 8 % d'Éthane (C_2H_6), avec une capacité de 27,5 millions de m^3 standard par jour.

- **GPL**

Constituée à 69 % de Propane (C_3H_8) et à 26 % de Butane (C_4H_{10}), avec une production de 2 630 tonnes par jour.

- **Condensat**

Formulé avec 67 % d'Heptanes et plus (C_7+), 4 % de Butanes (C_4), 8 % de Pentanes (C_5) et 18 % d'Hexanes (C_6), pour une production stable de 4 460 tonnes par jour [32].

1.4 Système d'évacuation par canalisation vers TRC

L'acheminement des produits du CPF d'IA vers le réseau de transport TRC s'effectue par trois canalisations principales :

- **Gaz naturel**

Canalisation d'environ 88 km de long et de 36 pouces de diamètre, capable de transporter 38,03 millions de m^3 standard par jour (soit 1 343 millions de pieds cubes standard par jour).

- **GPL**

Canalisation de 88 km de long et de 12 pouces de diamètre, assurant un transport de 9 938 m^3 standard par jour, équivalant à 62 510 barils standard par jour.

- **Condensat**

Canalisation de 92 km de long et de 12 pouces de diamètre, avec une capacité de 63 041 barils de stockage par jour (soit 10 023 barils de stockage par jour) [33].

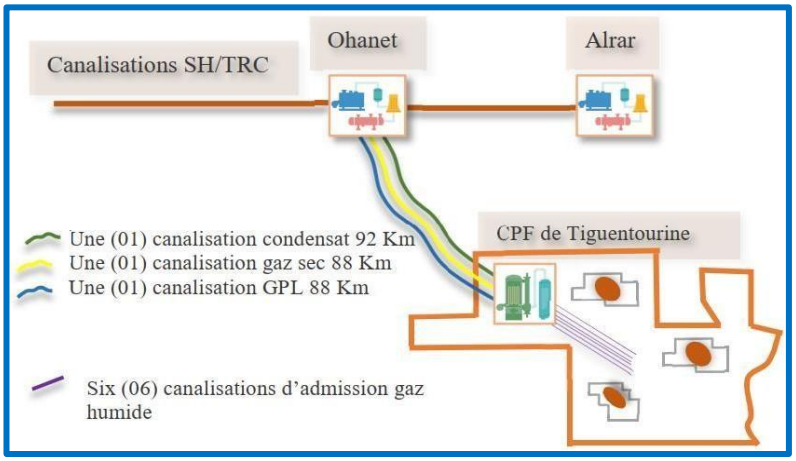


Figure II.2 : Système d'admission et d'évacuation par canalisation.

1.5 Description de l'exploitation à IA

La production du champ a démarré en 2006 avec dix puits et compte aujourd'hui 64 puits producteurs, avec le forage de six nouveaux puits prévu sur les trois prochaines années.

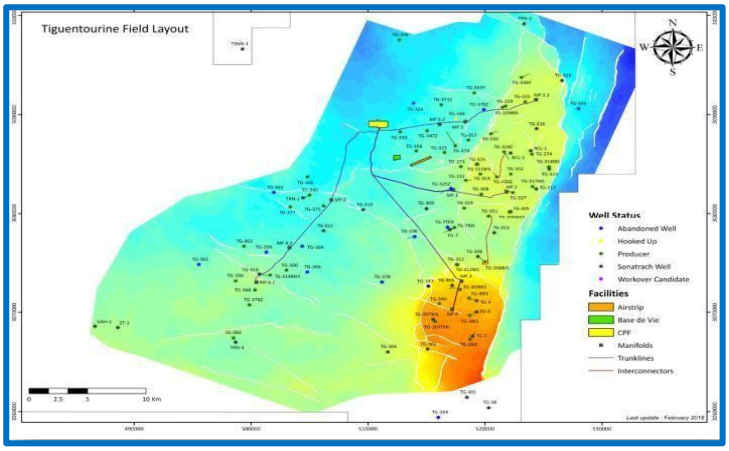


Figure II.3 : Situation des puits et réseau de collecte.

Les installations de forage intègrent notamment :

- Têtes de puits

- Systèmes de contrôle
- Instrumentation de surveillance (pression, température, débit)
- Systèmes de sécurité
- Matériel de communication

Le système de collecte repose sur un réseau de lignes individuelles, interconnectées par dix manifolds de champ, qui alimentent six canalisations régionales principales vers l'installation centrale située sur la falaise de TIGUENTOURINE [33].La différence entre le danger et le risque:

Nous avons élaboré l'exemple suivant afin de mieux expliquer la différence entre ces deux termes (cas de l'utilisation d'un insecticide):

- Un insecticide est un produit chimique créé pour tuer les insectes. Donc dans ce cas :
  - La source de danger est l'insecticide.
  - La cible est les insectes.
  - L'effet négatif est la mort des insectes.

Le danger est donc la propriété de tuer les insectes lorsque l'insecticide est utilisé, c'est-à- dire si on expose les insectes à l'insecticide. Le risque pour les insectes est donc qu'ils soient exposés à l'insecticide. Si cette exposition n'a pas lieu, le risque est (quasiment nul) mais le danger demeure car l'insecticide conserve ses propriétés néfastes sur les insectes, elles ne sont simplement pas utilisées.

1.6 Description générale des installations

Le CPF d'IA reçoit les fluides des puits via six canalisations principales convergeant vers des manifolds d'admission et deux pièges à condensat (slug catcher). L'installation comprend :

- Six manifolds et deux pièges à condensat assurant une première séparation des phases gazeuse, liquide et aqueuse.

- Deux trains de compression à l'admission qui réduisent la pression du système de collecte, optimisant ainsi la production.

- Trois trains de traitement parallèles destinés au traitement initial du gaz humide, comprenant l'élimination du H_2S/Hg, l'adoucissement aux amines, le séchage et le contrôle du point de rosée.

- Une unité d'élimination du CO_2, un système de déshydratation, un traitement du gaz sec, un stabilisateur de condensat, ainsi que des systèmes de séparation et de récupération des produits liquides et gazeux.

- Des installations dédiées à la compression du gaz résiduel et au stockage/exportation du GPL et du condensat [33].

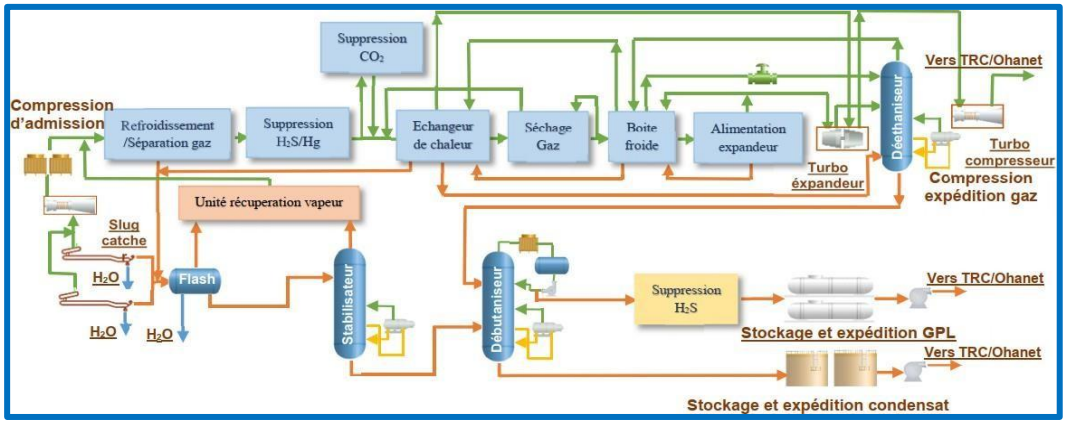


Figure II.4 : Organigramme fonctionnel simplifié du CPF d'IA.

1.7 Organisation de l'entreprise

La structure organisationnelle du CPF d'IA se décline en plusieurs divisions, comme le montre la **Figure II.5** :

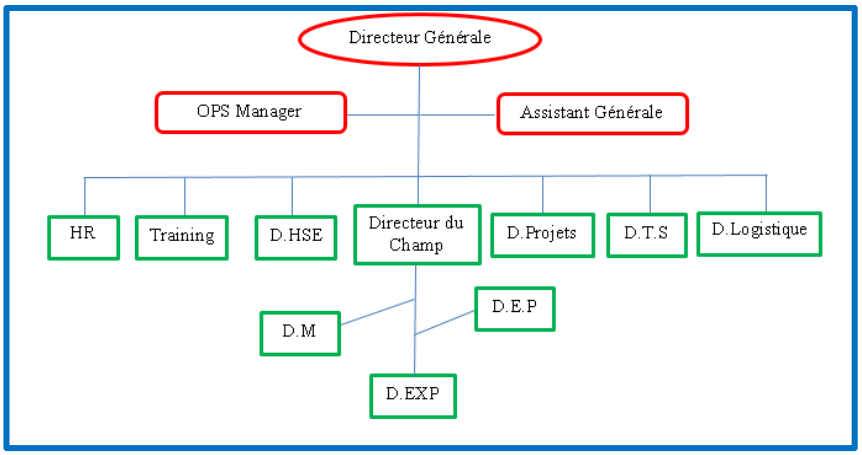


Figure II.5 : Organisation de l'entreprise du CPF d'IA.

- **Division HSE (Hygiène, Sécurité et Environnement)**

Chargée d'assurer la sécurité du personnel, des installations et de l'environnement, cette division réalise notamment des évaluations de risques et gère la délivrance des permis de travail.

- **Service Prévention :** Responsable de la délivrance des permis de travail après analyse des accidents.
- **Service Intervention :** Intervient en cas d'incidents tels que les incendies ou les débordements.
- **Service Environnement :** Met en place et veille au respect des normes pour garantir un environnement de travail sûr.
- **Service Médical :** Assure le bien-être du personnel par la fourniture de soins médicaux rapides et efficaces.

- **Division EP (Engineering Production)**

En charge de l'exploitation des puits ainsi que de la gestion du système de production et de collecte.

- **Division Exploitation**

Responsable de la délivrance des permis de travail et du suivi des risques

opérationnels.

- **Division Maintenance**

Gère l'ensemble des opérations mécaniques et électriques, incluant la maintenance préventive et corrective.

- **Division Technique Support**

Assure le suivi de la production, la planification des arrêts, l'étude des modifications et offre un support technique multidisciplinaire [32].

2 Déscription Générale d'un réseau anti-incendie

2.1 Notion de Base

2.1.1 L'Incendie (La combustion)

- **Définition**

La combustion est une réaction chimique exothermique impliquant un combustible, un comburant et une énergie d'activation. Lorsque ces trois éléments sont réunis, un foyer d'incendie peut apparaître. Cette réaction libère de la chaleur, de la lumière et des gaz **[34].**

- **Le triangle du feu**

Pour qu'un feu se déclare, trois éléments doivent impérativement être présents. Cette relation est représentée par le triangle du feu, qui met en évidence l'interdépendance entre le combustible, le comburant et l'énergie d'activation. Voici la figure suivante une présentation synthétique de ces trois composantes :



Figure II.6 : Le triangle du feu [35]

Types de combustion

Il existe plusieurs formes de combustion, différenciées par leur intensité, leur vitesse de propagation et leurs effets. Chacune présente des dangers particuliers, surtout dans les environnements industriels ou clos. Le tableau suivant en résume les principales caractéristiques **[34]** :

Tableau II.1 : les principales Types de combustion et leurs caractéristiques

Type de combustion	Caractéristiques	Exemple
Lente	Réaction sans flamme, sans lumière visible, progression faible	Décharges d'ordures
Vive	Réaction avec flamme, émission de chaleur et de lumière	Feux classiques avec oxygène suffisant
Très vive (déflagration)	Propagation rapide avec forte chaleur et pression	Déflagration dans locaux fermés
Instantanée (explosion)	Détonation brutale, onde de choc, propagation supersonique	Explosion de gaz, produits explosifs

Les classes de feux

Les feux sont classifiés selon la nature du combustible en cinq catégories principales. Cette classification permet de choisir les moyens d'extinction adaptés à chaque situation. Voici les différentes classes **[35].** :

- **Classe(A) :** Incendies de matériaux solides dont la combustion forme des braises,

tels que le bois, le carton, le tissu, la paille, le papier…

- **Classe(B) :** Feux de liquides ou de solides liquéfiables inflammables, tels que l'essence, l'alcool, le fioul, la graisse, le goudron…

- **Classe(C) :** Feux de gaz ou de vapeurs comme l'hydrogène, l'acétylène, le butane ou le propane.

- **Classe(D) :** Feux de métaux (sodium, aluminium, magnésium, potassium). Leur extinction nécessite des moyens spécifiques adaptés.

- **Classe(F) :** Feux liés aux appareils de cuisson, impliquant principalement les huiles et les graisses alimentaires.

Et dans la figure suivante, une illustration des moyens d'extinction adaptés au type de feu.



Figure II.7 : Les moyens d'extinction adaptés au type de feu [35].

Causes fréquentes d'incendie

Les incendies résultent souvent d'un enchaînement de facteurs techniques et humains. Ci-dessous une liste des causes les plus courantes rencontrées dans les milieux résidentiels et industriels **[34]** :

- Défaillances électriques (surcharges, courts-circuits, mauvais isolement)
- Fuites de liquides ou de gaz inflammables
- Appareils de chauffage ou chaudières défectueuses
- Échauffements mécaniques et étincelles
- Électricité statique
- Réactions chimiques mal contrôlées
- Combustions spontanées (fermentation, chiffons gras…)
- Travaux par points chauds (soudure, découpe…)
- Phénomènes naturels (soleil, foudre)
- Imprudence ou malveillance humaine.

Modes de propagation de l'incendie

Un feu peut rapidement s'étendre à l'ensemble d'un espace en raison de plusieurs mécanismes de transfert de chaleur. La figure suivante présente les principaux modes de propagation :

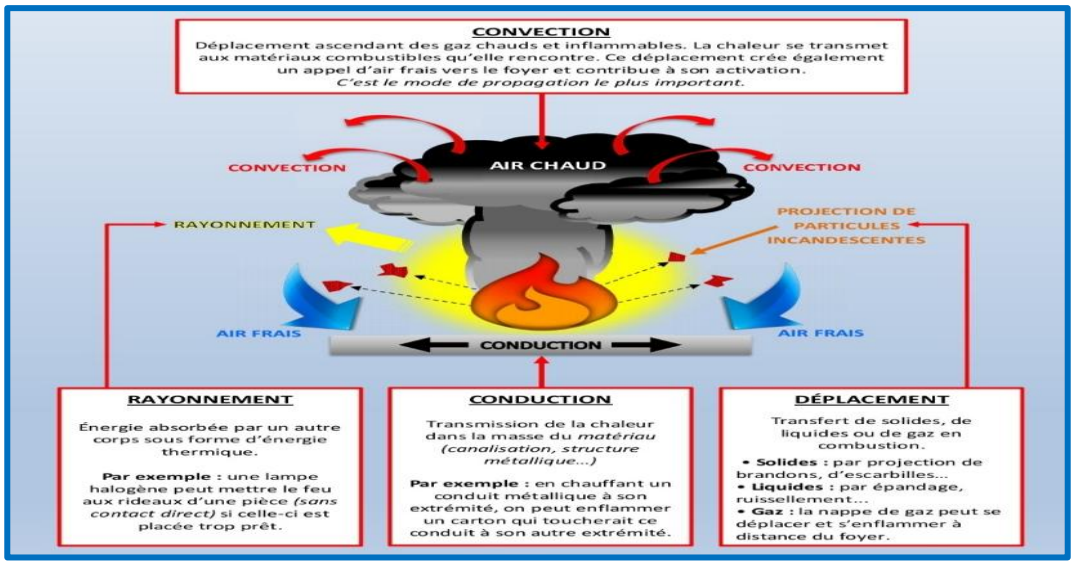


Figure II.8 : Modes de propagation de l'incendie [35].

2.1.2 Normes et réglementations appliquées

Définition de la norme NF EN

La norme NF EN est une norme européenne (EN) adoptée en France avec l'appellation NF, signifiant qu'elle est reconnue et validée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR).

Les normes NF EN sont élaborées par des organismes européens de normalisation (CEN, CENELEC ou ETSI) et harmonisées pour être appliquées dans tous les pays membres de l'Union européenne. Elles couvrent divers domaines, notamment la sécurité incendie, la construction, l'électrotechnique et l'environnement.

En France, une norme NF EN garantit que le produit, le service ou le procédé concerné respecte à la fois les exigences européennes et les spécificités françaises en matière de qualité et de sécurité.

Tableau II.2 : Normes applicables aux installations fixes de lutte contre l'incendie

Norme	Domaine d'application	Description
NF EN 12845 [36]	Installations fixes de lutte contre l'incendie – Sprinklers	Définit les exigences et recommandations relatives à la conception, l'installation et la maintenance des systèmes sprinklers dans les bâtiments et installations industrielles. En France, elle est particulièrement appliquée aux Établissements Recevant du Public (ERP), tels que les centres commerciaux et les parkings.
NF EN 671-1 [37]	Robinets d'incendie armés (RIA) – Tuyaux semi-rigides	Spécifie les exigences et méthodes d'essai pour la fabrication et la performance des RIA destinés aux bâtiments et immeubles industriels. Ces équipements sont raccordés à une alimentation en eau et utilisables par les occupants.
NF EN 671-3 [37]	Maintenance des robinets d'incendie armés	Fournit des recommandations pour le contrôle et la maintenance des RIA et des postes muraux équipés de tuyaux semi-rigides ou plats, garantissant leur bon fonctionnement en permanence.
NF S 62-201 [37]	Installation et maintenance des RIA	Établit les règles d'installation et de maintenance des réseaux RIA conformes à la norme NF EN 671-1, applicables à tous types de bâtiments.
NF EN 694 [37]	Tuyaux semi-rigides pour systèmes fixes	Spécifie les méthodes d'essai applicables aux tuyaux semi-rigides utilisés pour les RIA afin d'assurer leur conformité aux exigences de sécurité.
NF S 61-211 [37]	Bouches d'incendie	Norme encadrant les bouches d'incendie incongelables de 100 mm, raccordées à un réseau d'eau sous pression pour l'alimentation des équipements de lutte contre l'incendie.
NF S 61-213 [37]	Poteaux d'incendie	Définit les caractéristiques des poteaux d'incendie incongelables de 100 mm et 2 x 100 mm, permettant le branchement des équipements au-dessus du sol.
S 61-214 (expérimentale) [37]	Poteaux d'incendie de 65 mm	Norme expérimentale pour les poteaux d'incendie incongelables de 65 mm, destinée à évaluer leur performance et leur compatibilité avec les installations existantes.
NF S 62-200 [37]	Installation des bouches et poteaux d'incendie	Établit les règles d'installation des bouches et poteaux d'incendie, qu'ils soient raccordés à un réseau public ou privé sous pression.

Définition de la norme NFPA

La National Fire Protection Association (NFPA), fondée en 1896, est une organisation internationale à but non lucratif dont la mission principale est d'élaborer et de réguler des normes de sécurité, principalement dans le domaine de la protection contre l'incendie. Toutefois, son champ d'application s'étend également aux risques liés aux bâtiments et à l'environnement. Certaines de ses normes sont traduites en français par le Centre National de Prévention et de Protection (CNPP). En France, les standards NFPA sont surtout adoptés par les groupes internationaux et dans les cas où la réglementation nationale ne couvre pas certaines spécificités, comme la norme NFPA 409, dédiée à la protection des hangars d'avions.

Tableau II.3 : Normes NFPA applicables à la protection incendie

Norme	Domaine d'application	Description
NFPA 11 [38]	Systèmes d'extinction par mousse	Établit les exigences relatives à la conception, l'installation, les tests, l'inspection et la maintenance des systèmes d'extinction utilisant de la mousse à bas, moyen et haut foisonnement. Ces systèmes sont employés aussi bien en intérieur qu'en extérieur pour la protection des risques spécifiques.
NFPA 13 [39]	Installations de sprinklers	Spécifie les règles techniques pour la conception et l'installation des systèmes sprinklers, couvrant l'ensemble des risques. Elle inclut des critères d'installation pour répondre aux contraintes architecturales, des spécifications pour le stockage, ainsi que des dispositions spécifiques pour les sprinklers résidentiels et la protection des risques particuliers.
NFPA 15 [40]	Systèmes d'arrosage à eau (déluge)	Norme utilisée pour les risques spéciaux nécessitant une protection contre les feux à développement rapide ou le refroidissement d'équipements sensibles tels que les réacteurs, réservoirs, transformateurs et convoyeurs.
NFPA 25 [41]	Maintenance des systèmes de protection incendie à base d'eau	Définit les exigences minimales en matière de contrôle, d'essai et de maintenance des systèmes d'extinction utilisant l'eau, y compris les sprinklers, les canalisations d'incendie, les systèmes à pulvérisation d'eau et les systèmes mousse-eau. Cette norme prend également en compte la gestion et l'enregistrement des interruptions d'alimentation en eau.
NFPA 850	Protection incendie des centrales électriques	Fournit des recommandations sur la protection incendie adaptée aux centrales de production d'électricité, notamment pour les équipements et installations spécifiques exploités par des entreprises comme ALSTOM.

Définition de la Référentiels APSAD

Les référentiels APSAD regroupent des règles et des documents techniques élaborés en concertation avec les acteurs de la sécurité incendie. Ils constituent des références techniques souvent utilisées pour l'obtention des certifications APSAD de service et répondent aux exigences des compagnies d'assurance. En France, ces référentiels sont largement appliqués pour la conception, l'installation et la maintenance des systèmes de sécurité incendie, et sont souvent considérés comme des « règles de l'art » en la matière.

Tableau II.4 : Principales règles APSAD applicables à la sécurité incendie

Règle	Domaine d'application	Description
APSAD R1 [42]	Systèmes d'extinction automatique à eau (sprinklers)	Définit les exigences relatives à la conception, l'installation et la maintenance des systèmes sprinklers. Elle recommande d'associer l'assureur dès l'élaboration du cahier des charges afin d'adapter la protection aux risques spécifiques. Cette règle a été développée en collaboration avec la Fédération Française des Sociétés d'Assurances.
APSAD R5 [43]	Robinets d'incendie armés (RIA) et postes d'incendie additives	Établit les critères de conception et d'installation des **RIA**, adaptés à tout type de bâtiment. Elle prend également en compte les **postes d'incendie additives**, qui permettent de combattre certains incendies spécifiques (comme les feux de classe B) nécessitant des agents d'extinction autres que l'eau. La règle détaille les exigences relatives aux équipements, aux sources d'eau, aux canalisations ainsi qu'aux opérations de surveillance

		et de maintenance.
APSAD R6 [44]	Organisation et management du risque incendie	Fournit un cadre structuré pour la maîtrise du risque incendie en entreprise. Elle définit les missions des équipes d'intervention, les moyens matériels requis et les exigences organisationnelles pour assurer une protection efficace contre les incendies. Cette règle peut également conduire à la mise en place d'un **système de management du risque incendie**.
APSAD R7 [45]	Détection automatique d'incendie	Accompagne les professionnels dans la conception et l'installation des **systèmes de détection automatique d'incendie**. Elle précise les critères de sélection et d'implantation des détecteurs, l'alimentation des systèmes, ainsi que les procédures de vérification et de maintenance. La règle distingue deux types de contrôles : les visites de vérification de conformité et les inspections périodiques de maintenance.
APSAD R12 [46]	Systèmes d'extinction automatique à mousse à haut foisonnement	Spécifie les exigences techniques pour la conception, l'installation et la maintenance des **systèmes fixes d'extinction automatique à mousse à haut foisonnement**, utilisés dans divers secteurs (industriel, commercial, agricole, tertiaire).
APSAD R13 [47]	Systèmes d'extinction automatique à gaz	Décrit les exigences minimales pour la conception, l'installation et la maintenance des **systèmes d'extinction automatique à gaz par noyage total**. Elle comprend une section générale applicable à toutes les installations ainsi que des parties spécifiques détaillant les critères propres à chaque type de gaz, avec des exemples de calcul pour le dimensionnement des équipements.

Réglementations algériennes en matière de sécurité incendie

La mise en conformité avec la réglementation incendie représente un enjeu crucial pour les entreprises en Algérie. Tout établissement ne respectant pas les prescriptions en vigueur s'expose à des sanctions légales.

Pour assurer la conformité des infrastructures, plusieurs lois, ordonnances et décrets algériens encadrent les normes de sécurité incendie. Ces réglementations définissent les règles essentielles à appliquer pour prévenir et limiter les risques liés aux incendies.

❖ Ordonnance n°76-4 du 20 février 1976

Concernant les règles applicables en matière de sécurité contre les risques d'incendie et de panique, ainsi que la création de commissions de prévention et de protection civile. **[48]**

Article 1 : La présente ordonnance vise à définir les règles applicables :

- À la protection contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public et les immeubles de grande hauteur.

- À la sécurité incendie dans les bâtiments d'habitation.
- Aux établissements présentant des dangers, des nuisances ou des inconvénients.
- À la classification des matériaux et éléments de construction selon leur comportement au feu et aux méthodes d'essais correspondantes.

❖ Loi n° 04-20 du 13 Dhou-El-Kaada 1425 (25 décembre 2004)

Relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable **[49].** Cette loi établit les règles de prévention des risques majeurs et de gestion des catastrophes, en s'appuyant sur les principes suivants :

- Principe de précaution et de prudence
- Principe de concomitance
- Principe d'action préventive et de correction prioritaire à la source
- Principe de participation
- Principe d'intégration des techniques nouvelles

L'État garantit aux citoyens un accès égal et permanent à ces mesures. **[50].**

2.2 Les composants d'un réseau anti incendie

Définition

C'est un circuit de pipe qui permettant la distribution du l'eau en différents points terminal fixée sur des supports à béton massif au-dessus de sol.

- ❖ Le débit doit être adéquat.
- ❖ Il doit être implanté en boucle maillé

- Il faut des sectionnements directs permettant la réparation de tronçon hors service. **[32]**

Composition du réseau anti-incendie

- Une réserve d'eau (bacs).
- Un système de pompage (Jockey, électrique, diesel)
- Un système de tuyauterie (canalisation).
- Accessoires de tuyauterie (les vannes de sectionnement).
- Un système de piquage. **[32]**

a) La réserve d'eau :

Le réservoir de stockage d'eau de feu à une capacité maximale de 14810 m3 dont 12000 m3 est affectés à l'eau d'incendie, ce qui est suffisant pour 12 heures de service sur la base de pompes à eau d'incendie ayant une capacité de 500 m3/h et fonctionnant ensemble.

Le réservoir est muni d'indicateurs de niveau qui peuvent être contrôlés par le CCR. Une alarme est activée dans le CCR en cas de haut ou bas niveau d'eau. Les transmetteurs de niveau régulent la vanne de niveau comme requis pour maintenir un niveau d'eau adéquat dans le réservoir de stockage de l'eau de feu. **[51]**

b) Le système de pompage :

Le système de pompes d'incendie consiste en deux pompes jockey (06-P-603A/B), plus deux unités principales entraînées par un moteur électrique (06-P-602A/B), plus deux unités principales entraînées par un moteur diesel (06-P-601A/B).

Chaque pompe d'incendie est dimensionnée pour délivrer 500 m3/h à sa capacité de service théorique, avec une pression de refoulement de pompe de 9,8 bar.

Les pompes jockey sont entraînées par un moteur électrique et conçues pour fournir

34 m3/h à leur point de service théorique avec une pression de refoulement de 6 bar, les pompes jockey sont conçues pour fonctionner par intermittence, le maintien de pression principale de l'eau à 6,0 - 7,0 bar.

NB : Une soupape de surpression (PRV) réglée à 13,6 bar se trouve sur la décharge**.**

c) Le système de tuyauterie (canalisation) :

Le système de tuyauterie consiste en des conduites de 12 pouces de diamètre en acier au carbone non revêtues et est essentiellement installé au-dessus du sol. Les sections de la conduite d'eau d'incendie souterraine sont revêtues et enrobées. **[52].**

d) Accessoires de tuyauterie (les vannes de sectionnement) :

Ce sont des vannes qui assurent l'isolation afin de réparer les tronçons hors service. **[32]**

e) Un système de piquage :

Ce sont des tuyauteries secondaire lien entre le réseau anti incendie et le système fixe d'extinction par eau ou mousse. **[32]**



Figure II.9 : Photo illustrant les composantes du Réseau Anti – Incendie

Equipment fixe de lutte contre l'incendie

C'est un circuit de pipe qui permettant la distribution du l'eau en différents points terminal fixée sur des supports à béton massif au-dessus de sol.

a) Poteaux d'incendie (PI) :

Un poteau d'incendie distribue de l'eau pour les établissements hydrauliques, pouvant être installé l'intérieur et à l'extérieur de CPF.

Il permet d'alimenter des engins d'incendie ou Faire des établissements des lances. **[32]**

- Comporte de deux sorties de diamètre 70 mm munies de robinets à volant pour une ouverture et fermeture progressives limitant ainsi tout risque de coup de bélier.
- Débit minimum 1 000 l/mn.
- Pression minimum 6 bar. **[32]**



Figure II.10 : Poteau d'incendie (PI)

b) Les armoires d'incendie :

C'est une armoire destinée à stocker des équipements d'incendie manuels portables pouvant être installée à l'intérieur et à l'extérieur de CPF.

Elle est constituée d'un caisson ventilé avec toit incliné et d'une étagère amovible.

Elle comporte d'un dispositif d'ouverture/fermeture sécurisé par serrure, et une identification extérieure « ARMOIRE INCENDIE». **[32]**

Produits pouvant être stockés dans l'armoire :

- Deux tuyaux 70 mm.
- Deux lances 70 mm.
- Une division.
- Clé tricoises. **[32].**



Figure II.11 : Armoire d'incendie

c) Les lances monitors fixes (LMF) :

C'est une lance fixée à commande manuelle pouvant être installée à l'intérieur de CPF pour projeter la mousse (la zone de stockage condensat) ou l'eau à débit fixe et jet réglable avec minimum 6 bars de pression à l'entrée. **[32]**

- Débit : 3000 l/min à 7 bars
- Rotation verticale : -60° à +80°
- Rotation horizontale : 360° **[32].**



Figure II.12 : lance monitor fixe (LMF)

d) Les robinets d'incendie armés (R.I.A):

Les Robinets d'Incendie Armés constituent des moyens de secours de première intervention, alimentés en eau permettant à toute personne non spécialisée d'agir immédiatement et efficacement sur un début d'incendie. **[32]**

Le robinet d'incendie armé se compose de :

- Un robinet d'arrêt de l'alimentation en eau.
- Un dévidoir.
- Une longueur élémentaire de tuyau semi-rigide (20/30 m).
- Une lance (Ø 25 mm). **[32]**



Figure II.13 : Robinets d'incendie armés (R.I.A).

Système spécialisés de protection

a) Système déluge :

Les installations déluge sont des équipements d'extinction fixes constitués d'un réseau de tuyauteries disposées à proximité du risque incendie à protéger dont le déclenchement est assuré manuellement et/ou semi automatiquement par l'intermédiaire d'un système complémentaire de Détection Automatique Incendie. **[32]**

Le système déluge est composé de :

- Réseau anti incendie.
- Les tuyauteries (couleur rouge).
- Skid de déclenchement de système déluge: les vannes de déluge, bypass, valve jacket, Mano de la pression d'entrée, Transmetteur de pression.
- Les diffuseurs. **[32].**



Figure II.14 : Les diffuseurs (cas les aero)



Figure II.15 : Skid de déclenchement de Système déluge . [51]

Les systèmes déluges sont activés après la détection auxquels ils sont associés et les têtes d'arrosage sont ouvertes.

- Système de détection : Les détecteurs (détecteur de flamme CCTV, détecteur de flamme IR/UV et détecteur de gaz combustible IR par point) **[32]**
- Après la confirmation de la détection, le système déluge est fonctionné comme suite :

- ❖ Semi-automatique : salle de contrôle actionne l'électrovanne pour ouverture de la vanne déluge.
- ❖ Manuellement : On actionne la vanne jacket.
- ❖ BY PASS : On bypass la vanne de déluge. **[32]**

NB : Tous les diffuseurs sont activés en même temps.

➢ Les modes d'extinction liées au système déluge :

- **Refroidissement :** Le refroidissement, qui consiste à absorber l'énergie calorifique émise par le foyer, a pour objectif d'abaisser la température du combustible au-dessous de la température d'inflammation afin de bloquer la distillation des gaz inflammables. Le refroidissement est important pour protéger du rayonnement et éviter l'inflammation. **[32]**
- **L'isolement :** L'isolement, mode d'action proche du précédent, sépare « physiquement » les gaz de distillation par rapport à l'oxygène de l'air. L'agent extincteur forme donc couche isolant le combustible même après l'extinction. **[32]**

b) Système rideaux d'eau :

Ce système est juste existé dans la zone de stockage GPL, par mode d'extinction isolement et refroidissement, il se compose d'un collecteur à grand diamètre fournissant dix (10) points de vente. **[32]**

Le système rideaux d'eau est composé de :

- ❖ Réseau anti incendie.
- ❖ Les tuyauteries (couleur rouge).
- ❖ Les vannes à commande manuelle.
- ❖ Les diffuseurs. **[32].**



Figure II.16 : Image qui clarifier les composantes de système rideaux d'eau.

Le système de rideaux d'eau est activé après la détection auxquels ils sont associés et les diffuseurs sont ouvertes :

- Système de détection : les détecteurs (détecteurs de gaz combustible IR à portée optique, détecteur de gaz combustible IR ponctuels).

- Après la confirmation de la détection, le système de rideaux d'eau est fonctionné manuellement par dix (10) vannes à grille à commande manuelle selon les besoins. **[32]**



Figure II.17 : Rideau d'eau au niveau de stockage GPL. [51]

c) Système à mousse :

Ce système est juste existé dans la zone de stockage condensat, par mode d'extinction refroidissement et étouffement, l'activation de cette système assuré manuellement.

Le système à mousse consiste en un système de dosage Fire Dos FD 6000 monté sur plate- forme. Le système de dosage est réglé pour une induction à 3% et est alimenté par

six conteneurs plastiques translucides 1000L de concentré de mousse conservé dans un logement séparé.

La solution de mousse entre dans le manifold où l'alimentation est contrôlée par des vannes papillon quart-de-tour. La solution de mousse peut alors être acheminée vers les systèmes de mousse individuels fixes pleine surface pour les réservoirs de stockage ou acheminés vers la conduite de solution de mousse. La conduite de solution de mousse est située au-dessus du sol et suit le contour extérieur de la digue. Fixés sur la conduite de solution fixe, des canons à eau à fonctionnement manuel dimensionnés à 2 500 LPM sont installés. **[52]**

Le système à mousse est composé de :

- Réseau anti incendie.
- Les vannes à commande manuelle.
- Une réserve d'émulseur (six conteneurs plastiques translucides de 1000L, type : AFFF- AR).
- Doseurs (FD 6000).
- Les tuyauteries (couleur gris).
- Générateur de mouse (chambre ou diffuseurs, lance canon fixe et portable). **[32]**



Figure II.18 : Image qui clarifier les composantes de système à mousse.

Le système à mousse est activé après la détection :

- Système de détection : les détecteurs (détecteur de flamme CCTV, détecteur de

gaz combustible IR ponctuels)

❖ Après la confirmation de la détection, le système à mousse est fonctionné manuellement comme suite :

- Ouvrir la vanne des conteneurs d'émulseur (la vanne de 1er conteneur toujours ouverte)
- La vanne d'eau ce qui suit au réseau anti incendie.
- La pompe d'injection d'émulseur est déclenchée automatiquement, et elle est prête d'aspirer l'émulseur pour former une solution moussante (pré mélange).
- Ouvrir les 4 vannes en tête des trois bacs et la cuvette de rétention selon les besoins.
- A l'arrivée de la solution moussante au niveau les diffuseurs, chambres et lance monitor fixe, elle se compose la mousse par le contact de l'air. **[32]**

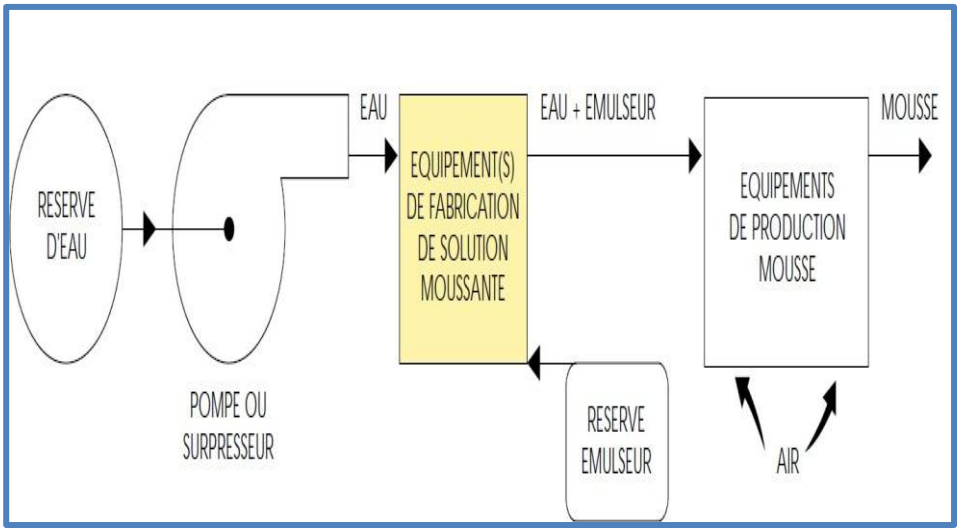


Figure II.19 : Schéma principe du mousse

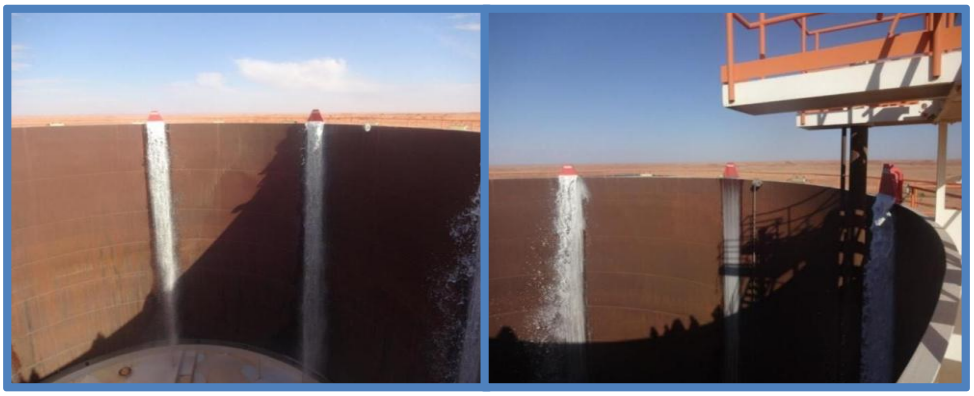


Figure II.20: Diffuseurs à mousse au niveau de stockage condensat (bac à toit Flottant).

Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de présenter de manière détaillée l'entreprise étudiée ainsi que son réseau de protection incendie, tout en soulignant l'importance de la conformité aux normes et aux exigences réglementaires. Cette analyse a permis de mettre en évidence les différents composants du système de sécurité incendie, en s'appuyant sur des référentiels internationaux tels que la norme NF EN, les standards NFPA, le guide APSAD, ainsi que sur le cadre législatif algérien.

Cette démarche s'inscrit dans une logique de maîtrise des risques liés aux incendies, et constitue une base essentielle pour l'évaluation de la performance et de l'efficacité des dispositifs de protection mis en place.

Dans la continuité de ce travail, la méthode AMDEC sera appliquée sur les composants de haute importance de ce réseau, afin d'analyser les points de défaillance critiques. Une comparaison approfondie sera ensuite menée avec les résultats obtenus à travers l'utilisation de la version payante de Chat-GPT, permettant ainsi d'évaluer l'apport réel de l'intelligence artificielle dans ce type d'étude.

Ce volet fera l'objet d'une analyse détaillée dans le troisième chapitre.

CHAPITRE III : ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE L'AMDEC CLASSIQUE ET IA APPLIQUEE A LA POMPE ET AU MOTEUR DIESEL DU SITE CPF – IN AMENAS

Chapitre III : Étude Comparative entre l'AMDEC Classique et IA appliquée à la Pompe et au Moteur Diesel du site CPF – In Amenas

Introduction

Ce chapitre est consacré à la mise en œuvre d'une étude comparative entre deux approches d'analyse des risques : la méthode AMDEC classique d'une part, et les résultats obtenus à travers l'utilisation de l'intelligence artificielle, en l'occurrence Mechanical Engineering Assistant, d'autre part. Cette étude vise à évaluer la pertinence, les avantages et les limites de chaque approche en matière de hiérarchisation des défaillances et d'aide à la décision..

Afin de valider cette comparaison, nous avons appliqué les deux approches sur des composants critiques du réseau de lutte contre l'incendie au sein de l'installation CPF d'In Amenas (partenariat SONATRACH – ENI – Equinor), en ciblant spécifiquement les éléments les plus sollicités et présentant une fréquence d'intervention élevée.

1 Analyse statistique des composants selon la Criticité d'interventions

Afin d'améliorer la fiabilité du réseau anti-incendie du site CPF – In Amenas, une évaluation de la criticité des équipements a été réalisée.

Les résultats présentés proviennent de la moyenne des évaluations faites par des experts, ingénieurs et techniciens de la maintenance et de l'intervention, sur la base d'un questionnaire (voir annexes).

L'analyse couvre une période de dix ans (2014–2024) et vise à hiérarchiser les priorités de maintenance en fonction de l'importance opérationnelle des équipements.

Les résultats de cette évaluation sont détaillés dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Analyse statistique des composants selon la Criticité CPF (2014-2024)

Composant	Criticité (1 à 5)	Commentaires / Observations
Réservoir d'eau (bac)	**2**	**Rôle de réserve, faibles risques de défaillance.**
Pompe jockey	**2**	**Maintien de la pression, faible impact en cas de panne.**
Pompe électrique	**3**	**Composant important, mais redondance avec la pompe diesel.**
Pompe diesel	**5**	**Composant stratégique, critique en cas de coupure électrique.**
Vanne de contrôle	**2**	**Assure l'isolement des sections, impact contrôlé.**
Réseau de tuyauterie	**3**	**Risque de fuites modérées, réparations possibles sans arrêt total.**
Lances monitors fixes	**2**	**Moins sollicitées, maintenance simple.**
Poteaux incendie	**1**	**Faible criticité globale, usage ponctuel.**
Système déluge	**3**	**Protection importante pour zones à haut risque.**
Système à mousse	**3**	**Essentiel pour risques chimiques, maintenance modérée.**
Armoire d'incendie (AI)	**2**	**Nécessaire pour interventions rapides, peu de pannes majeures.**
Système rideaux d'eau	**3**	**Utilisation spécifique, impact moyen en cas de panne.**
RIA (Robinets Incendie Armés)	**2**	**Usage localisé, criticité faible.**
Extincteurs portatifs	**1**	**Impact très localisé et isolé.**
Détecteurs de fumée / chaleur	**3**	**Détection précoce indispensable, nécessite vérification périodique.**
Système d'alarme incendie (sirènes / voyants)	**3**	**Critique pour l'alerte, fiabilité requise.**
Groupe électrogène d'urgence	**3**	**Assure le fonctionnement en coupure électrique, critique secondaire.**
Système SCADA incendie (télégestion)	**3**	**Surveillance distante importante, impact sur l'efficacité globale.**

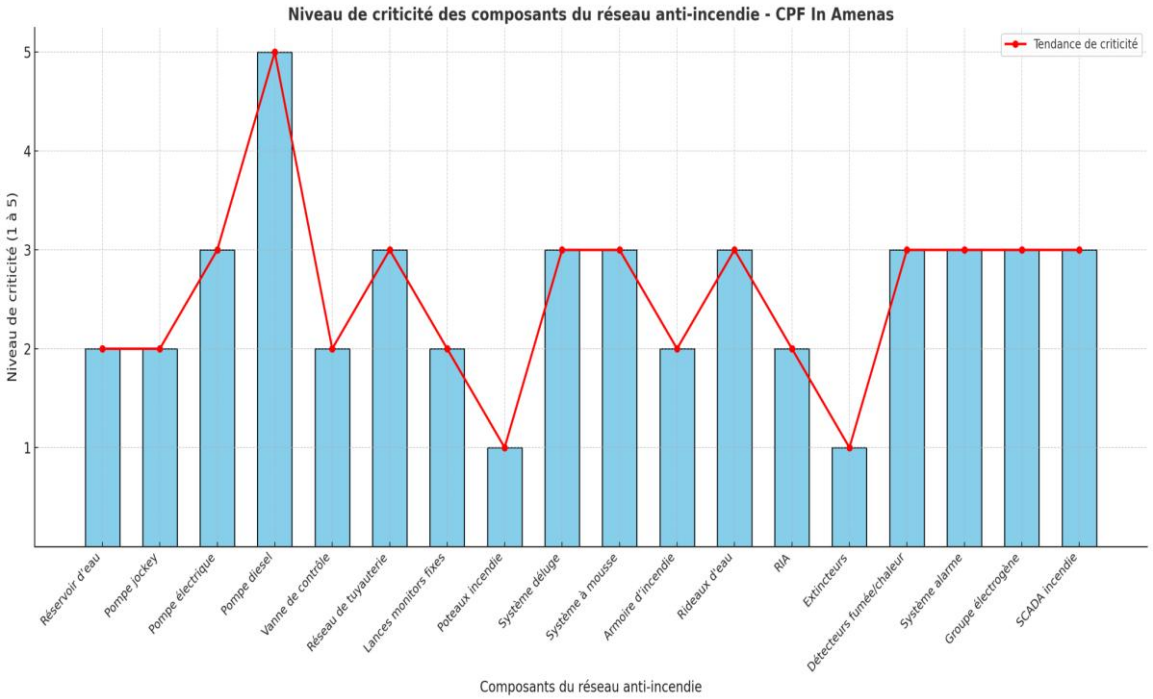


Figure III.1 : Niveau de criticité des composants du réseau anti incendie CPF (2014-2024)

Analyse du graphique

Le graphique ci-dessus illustre visuellement le niveau de criticité des différents composants du réseau anti-incendie du site CPF – In Amenas.

- On constate clairement que la pompe diesel atteint un niveau de criticité de 5, soit le maximum sur l'échelle utilisée (1 à 5).
- Les autres composants oscillent entre des niveaux de criticité de 1 à 3, indiquant un impact beaucoup moins important en cas de défaillance.
- La courbe rouge trace une tendance de criticité qui souligne l'écart majeur existant entre la pompe diesel et les autres équipements.

Analyse spécifique de la pompe diesel

La pompe diesel est-elle la plus critique parce que :

- **Rôle vital dans la sécurité :** La pompe diesel assure l'alimentation principale en eau en cas de défaillance électrique ou d'incendie majeur. Elle est conçue pour

fonctionner de manière autonome et immédiate dans des situations d'urgence, garantissant ainsi la protection des biens et des personnes.

- **Absence de redondance immédiate :** À la différence d'autres pompes (électrique, jockey), la pompe diesel représente souvent le dernier rempart en cas de panne générale. Une défaillance ici entraîne directement une perte de capacité de lutte contre l'incendie.

- **Maintenance complexe et technique :** La maintenance préventive et corrective d'une pompe diesel est plus lourde : elle nécessite des vérifications régulières du moteur thermique, du système d'alimentation en carburant, de refroidissement, et du circuit de démarrage. Une mauvaise maintenance augmente fortement le risque de non-démarrage en urgence.

- **Pannes critiques à conséquences immédiates :** Les pannes types (défaut de démarrage, surchauffe, usure moteur) compromettent immédiatement l'efficacité du réseau anti-incendie, sans solution de rechange rapide.

- **Conditions d'exploitation sévères :** La pompe diesel doit rester fiable même après de longues périodes d'inactivité, ce qui impose des exigences strictes sur la qualité de son entretien et sur la surveillance de son état général.

- **Impact environnemental négatif :** En fonctionnement, le moteur diesel de la pompe émet une quantité significative de gaz à effet de serre (CO_2, NOx, particules fines), contribuant ainsi à la pollution atmosphérique. Ce facteur environnemental est de plus en plus sensible dans les normes de gestion durable des installations industrielles.

La pompe diesel combine un risque opérationnel majeur et un impact écologique négatif, justifiant ainsi son classement comme composant le plus critique du réseau anti-incendie.

2 Analyse Fonctionnelle Détaillée du Moteur et de la Pompe Diesel

.

Afin de comprendre en profondeur le comportement global d'un moteur diesel couplé à une pompe, il est impératif d'analyser de manière structurée ses différents sous-systèmes ainsi que les composants associés. Cette démarche fonctionnelle permet non seulement d'identifier le rôle précis de chaque élément, mais également de saisir son principe de fonctionnement et son impact sur la performance globale de l'équipement.

Les deux tableaux suivants présentent une décomposition méthodique des sous-systèmes principaux du moteur et de la pompe diesel, en associant pour chaque sous-ensemble son rôle, ainsi que pour chaque composant son rôle spécifique et son principe de fonctionnement. Ce travail constitue une étape clé dans l'analyse AMDEC, la maintenance prédictive, ainsi que dans toute démarche d'amélioration continue en milieu industriel :

la pompe diesel

Tableau III.2 : Analyse Fonctionnelle Détaillée de la Pompe Diesel.

Sous-système	Rôle du Sous-système	Composant	Rôle du Composant	Principe de fonctionnement du Composant
Palier 1 NDE	Supporte l'arbre et assure la rotation sans friction.	Roulement (x2)	Supporte l'arbre en rotation.	Réduit la friction pour assurer un mouvement fluide.
		Rondelle de freinage	Empêche le desserrage des écrous.	Maintient la tension par friction mécanique.
		Écrou de freinage	Assure la fixation du roulement.	Applique une force de serrage contrôlée.
		Joint d'étanchéité	Préserve l'étanchéité d'huile.	Empêche la fuite d'huile et l'entrée de contaminants.
		Couvercle extérieur du palier	Protège les éléments internes.	Forme une barrière contre les agents extérieurs.

		Couvercle intérieur du palier	Protège contre les contaminants internes.	Isolant interne contre poussière et fluides.
		Renifleur de carter	Régule la pression interne.	Libère la pression excessive sans perte de lubrifiant.
		Fouloir (split gland)	Maintient l'étanchéité mécanique.	Comprime le presse-étoupe pour limiter les fuites.
		Presse-étoupe	Assure l'étanchéité dynamique autour de l'arbre.	Comprime un matériau souple autour de l'arbre en rotation.
Volute	Convertit l'énergie cinétique en énergie de pression pour le liquide.	Volute de la pompe	Canalise le fluide.	Transforme l'énergie du liquide en augmentant la pression.
		Impulseur	Transmet l'énergie au fluide.	Crée un mouvement centrifuge qui pousse le liquide vers l'extérieur.
		Bague d'usure	Protège la volute et l'impulseur contre l'usure.	Crée une surface d'usure remplaçable entre les éléments en friction.
		Soupape de décharge d'air	Purge l'air du circuit.	Évacue les poches d'air pour éviter la cavitation.
		Chemise de l'arbre	Supporte l'impulseur.	Fixe l'impulseur sur l'arbre en assurant son alignement.
Palier 2 DE	Supporte l'arbre côté moteur et assure une bonne rotation.	Roulement (x1)	Supporte la rotation de l'arbre.	Réduit la friction pendant la rotation.
		Rondelle de freinage	Stabilise l'écrou du roulement.	Maintient la fixation sous vibration.
		Écrou de freinage	Fixe le roulement sur l'arbre.	Applique une force de serrage.
		Joint d'étanchéité (x2)	Garantit l'étanchéité au niveau du palier.	Empêche les fuites d'huile et l'infiltration de contaminants.

		Couvercle extérieur du palier	Protège contre l'environnement externe.	Bouclier mécanique contre les contaminants.
		Couvercle intérieur du palier	Protection supplémentaire interne.	Isole des particules ou fluides internes.
		Renifleur de carter	Régule la pression du carter.	Permet l'évacuation de la surpression sans perte d'huile.
		Fouloir (split gland)	Maintient la compression du presse-étoupe.	Assure une pression continue pour étanchéité optimale.
		Presse-étoupe	Assure l'étanchéité dynamique.	Comprime pour empêcher la fuite sous rotation.
Accouplement	Transmet le mouvement rotatif du moteur à la pompe tout en compensant les désalignements.	Accouplement	Transmet le couple et corrige les désalignements.	Permet la transmission d'énergie même en cas d'axes légèrement décalés.
		Arbre (shaft)	Transfère la puissance mécanique.	Transmet la rotation de l'accouplement vers l'impulseur.



Figure III.2 : Schéma synoptique d'une pompe centrifuge.

le moteur diesel

Tableau III.3 : Analyse Fonctionnelle Détaillée de le moteur Diesel.

Système	Sous-systèmes	Rôle et Principe de fonctionnement
Système mécanique	- Pompe à eau- Thermostat- Courroies- Échangeur eau/huile…etc	**Rôle** : Assurer le fonctionnement mécanique global et le transfert de l'énergie moteur. **Principe** : Conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique via le mouvement coordonné de pièces mobiles, en garantissant le transfert optimal de fluide et la régulation thermique.
Système de refroidissement	- Radiateur- Pompe à eau- Thermostat- Durites de refroidissement…..etc	**Rôle** : Maintenir la température de fonctionnement du moteur dans une plage optimale. **Principe** : Circulation continue d'un liquide caloporteur à travers le moteur et le radiateur pour dissiper la chaleur excédentaire.
Système de lubrification	- Pompe à huile- Filtre à huile- Radiateur d'huile- Indicateur de pression…..etc	**Rôle** : Réduire les frottements entre les pièces mobiles et prévenir l'usure. **Principe** : Distribution sous pression d'huile lubrifiante sur toutes les parties critiques du moteur, avec filtration et refroidissement continu.
Système d'injection de carburant	- Pompe d'injection haute pression- Injecteurs- Flexibles d'alimentation- Système de retour carburant	**Rôle** : Fournir le carburant sous haute pression pour la combustion. **Principe** : Injection précise de fines gouttelettes de carburant dans la chambre de combustion, synchronisée avec le cycle moteur pour une performance optimale.
Système d'admission d'air	- Filtre à air- Turbocompresseur- Collecteur d'admission- Soupapes d'admission	**Rôle** : Assurer l'apport d'air nécessaire à la combustion. **Principe** : Filtration de l'air ambiant puis compression par turbocompresseur pour augmenter l'oxygène disponible, améliorant ainsi le rendement de la combustion.
Système d'échappement	- Turbocompresseur (côté échappement)- Collecteur d'échappement- Capteurs de température- Soupapes d'échappement	**Rôle** : Évacuer efficacement les gaz de combustion. **Principe** : Extraction rapide des gaz brûlés hors du moteur pour éviter toute contre-pression, tout en utilisant l'énergie résiduelle pour alimenter le turbocompresseur.
Système de démarrage	- Démarreur électrique AC/DC- Accumulateurs hydrauliques- Alternateur- Système de commande de démarrage	**Rôle** : Permettre la mise en marche du moteur. **Principe** : Conversion de l'énergie électrique ou hydraulique en mouvement rotatif

		initial pour entraîner le vilebrequin jusqu'à l'auto-entraînement par combustion.

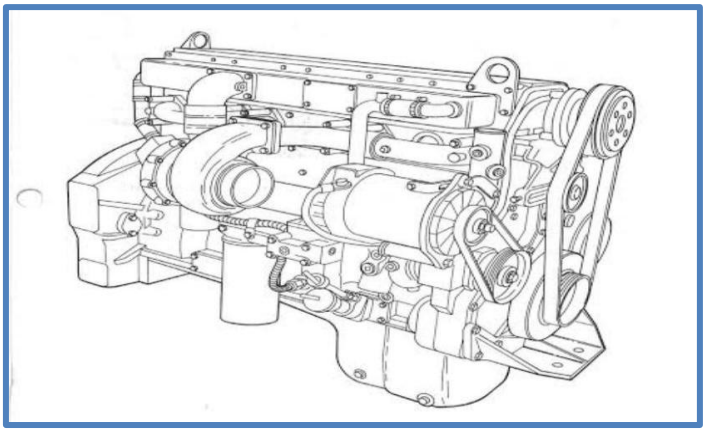


Figure III.3 : Schéma du moteur diesel.

3 Application de l'AMDEC

Avant d'entamer l'application de la méthode AMDEC, il est essentiel de préciser les raisons de son choix par rapport aux autres outils :

- Analyse systématique des modes de défaillance (Modes de défaillance) potentiels.
- Évaluation de la gravité des effets (Gravité) sur le fonctionnement global.
- Estimation de la capacité de détection (Détection) des défaillances.
- Calcul de la priorité de traitement à travers l'indice de criticité (Criticité).
- Renforcement de la maintenance préventive par la prédiction des pannes (Prévention proactive).
- Amélioration de la fiabilité (Fiabilité) et réduction des temps d'arrêt.
- Appui à la prise de décision technique basée sur une analyse rigoureuse et structurée.

Partant de ces justifications solides, nous allons, dans ce qui suit, procéder à l'application détaillée de la méthode AMDEC sur les systèmes étudiés.

Dans le cadre de notre étude de fiabilité et de prévention des défaillances, nous avons choisi d'appliquer la méthode AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) sur deux éléments essentiels au bon fonctionnement du système : la pompe diesel et le moteur diesel. Ces deux composants jouent un rôle clé dans l'alimentation, la compression et la génération d'énergie mécanique. L'analyse détaillée présentée ci-dessous, à travers les deux tableaux AMDEC, vise à identifier les points critiques, évaluer les risques associés à chaque défaillance potentielle et proposer des actions correctives ou préventives adaptées en fonction du niveau de criticité déterminé, comme indiqué dans les deux tableaux suivants :

Tableau III.4 : AMDEC de la Pompe Diesel

Fiche AMDEC du Réseau anti incendie

Étude de cas AMDEC
CPF Pompe à eau
DIESEL

Systéme	Fonction	sous systéme	Elément	Fonction	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité				Actions correctifs
									D	G	F	C	
Pompe DIESEL	transmettre de l'énergie à des fluides (en particulier liquides) grâce à la force centrifuge	Palier 1 NDE	Roulement x2	Transmission du mouvement et guidage des composants rotatifs	Blocage, vibrations, échauffement	Mauvaise lubrification, usure, contamination	Augmentation des vibrations, surchauffe, panne du système	Analyse vibratoire, analyse d'huile, contrôle thermique (thermomètre infrarouge)	3	3	2	18	Contrôle régulier, lubrification, remplacement si usure.
			Rondelle de freinage	Assure le freinage et la stabilité de l'écrou de freinage.	Rupture, usure	Vieillissement contrainte mécanique excessive Mauvais montage	Risque de desserrage de l'écrou de freinage Augmentation des vibrations	Analyse vibratoire, analyse d'huile	2	2	2	8	Inspection, vérification de serrage, remplacement si usée.
			Ecrou de freinage	Assure le freinage et la stabilité de roulement.	Desserrage, rupture	Fatigue mécanique, vibrations excessives, Mauvais montage de rondelle de freinage	Bruit de roulement, augmentation de jeu entre l'écrou et le roulement, Augmentation des vibrations	Détection Audible Analyse vibratoire	3	2	2	12	Contrôle de serrage, vérification périodique, inspection.
			Joint d`étanchéité	Assure l`étanchéité d`huile du carter	fuite externe	Usure, pression excessive, vieillissement	Perte de lubrifiant, risque de contamination avec surchauffe de pièces tournante	Inspection visuelle, Arrêt équipement	4	3	3	36	Remplacement périodique, contrôle d'usure.
			Couvercle extérieur du palier	Protège les éléments roulants du palier	Fissure, desserrage	Vibrations, chocs mécaniques	Exposition des éléments internes, possible	Inspection visuelle régulière	2	2	2	8	Vérification des fixations, remplacement si nécessaire.

			Couvercle intérieur du palier	Protège les éléments roulants du palier	Fissure, desserrage	Vibrations, chocs mécaniques	Exposition des éléments internes, contamination possible	Inspection visuelle régulière	2	2	2	8	Serrage correct, remplacement si nécessaire.
			Renifleur carter	Evacuer la surpression d`huile du carter.	Obstruction, fuite	Accumulation de dépôts, absence d'entretien	Surpression interne, échauffement	Inspection visuelle Contrôle thermique (Thermomètre infrarouge)	3	2	3	18	Nettoyage régulier, remplacement si bouché.
			Fouloir (split gland)	Maintien du presse-étoupe	Usure, desserrage	Frottement excessif, mauvaise installation	Mauvaise étanchéité, fuite de fluide processus	Inspection visuelle, contrôle de serrage	3	3	2	18	Vérification de l'installation, remplacement régulier.
			Presse Etoupe	Assure l'étanchéité du liquide processus	Fuite, desserrage	Usure	Perte de fluide, perte de pression de fluide process	Inspection visuelle, test d'étanchéité	4	3	3	36	Remplacement périodique.
		volute	Volute de la pompe	Contenir et diriger le fluide en sortie de l'épaisseur	Fissure, cavitation, corrosion	Cavitation, choc hydraulique, usure chimique	Perte de pression, fuite, baisse de performance	Inspection visuelle, Test de performance	3	3	2	18	Inspection régulière, test de performance.
			l'impulseur de la pompe	Transmettre de l'énergie à l'eau de processus grâce à la force centrifuge	Érosion, déséquilibre, fissure	Cavitation, usure	Baisse de débit, vibrations anormales	Analyse vibratoire, Test de performance	3	3	3	27	Inspection, équilibrage, remplacement si usure.
			Bague d`usure	Protection de l`épaisseur du frottement et d`usure.	Protection de l'épaisseur contre les frottements et l'usure	Contact répété avec l'épaisseur, abrasifs	Augmentation du jeu, perte de performance	Test de performance	3	3	3	18	Remplacement régulier, mesure d'usure.
			Soupape de décharge d`air	Purger l'air de volute	Blocage, fuite	Contamination, accumulation de débris	Présence d'air dans le système, perte de performance	Test de fonctionnement, inspection visuelle	2	2	2	8	Nettoyage, remplacement si fuite.
			Chemise de l`arbre	Centrage et fixation de l'impulseur.	Usure, déformation, fissure	Frottement excessif, corrosion, Fatigue mécanique	Désalignement, vibrations, réduction du rendement	Analyse vibratoire, inspection visuelle	3	3	2	18	Contrôle régulier, vérification du serrage, remplacement

		Palier 2 DE	Roulement x1	Transmission de mouvement et guidage des composants rotatifs	Blocage, vibrations, échauffement	Mauvaise lubrification, usure, contamination	Augmentation des vibrations, Surchauffe, panne du système	Analyse vibratoire, analyse d'huile, contrôle thermique (thermomètre infrarouge)	3	3	2	18	Contrôle régulier, lubrification, remplacement si usure.
			Rondelle de freinage	Assure le freinage et la stabilité de l'écrou de freinage	Rupture, usure	Vieillissement contrainte mécanique excessive mauvais montage	Risque de desserrage de l'écrou de freinage, Augmentation des vibrations	Analyse vibratoire, Analyse d'huile	2	2	2	8	Inspection, contrôle de serrage, remplacement si usée.
			Ecrou de freinage	Assurer le freinage et la stabilité de roulement	Desserrage, rupture	Vibrations excessives, fatigue mécanique, Mauvais montage de rondelle de freinage	Bruit de roulement, augmentation de jeu entre l'écrou et le roulement, augmentation des vibrations	Détection audible analyse vibratoire	3	2	2	12	Serrage contrôlé, vérification périodique, inspection.
			Joint d'étanchéité x2 (intérieur+extérieur)	Assure l'étanchéité d'huile du carter	Fuite interne, fuite externe	Usure, pression excessive, vieillissement	Perte de lubrifiant, risque de contamination avec surchauffe de pièces tournante	Inspection visuelle, arrêt équipement	4	3	3	36	Remplacement périodique, contrôle d'usure.
			Couvercle extérieur du palier	Protège des éléments roulants du palier	Fissure, desserrage	Choc mécanique, vibrations	Exposition des composants internes, contamination possible	Inspection visuelle,	2	2	2	8	Vérification des fixations, remplacement si nécessaire.
			Couvercle intérieur du palier	Protège des éléments roulants du palier	Fissure, desserrage	Vibrations, choc mécanique	Risque de contamination	Inspection visuelle régulière	2	2	2	8	Serrage correct, remplacement si nécessaire.
			Renifleur cartér	Évacuation de la surpression d'huile du carter	Obstruction, fuite	Accumulation de dépôts, absence d'entretien	Surpression interne, échauffement	Inspection visuelle, contrôle thermique (thermomètre infrarouge)	3	2	3	18	Nettoyage régulier, remplacement si bouché.

			Fouloir (split gland)	Maintien du presse-étoupe	Usure, desserrage	Frottement excessif, mauvais installation	Mauvais d'étanchéité, fuite du fluide processus	Inspection visuelle, test d'étanchéité	3	3	2	18	Remplacement régulier, contrôle d'étanchéité.
			Presse-étoupe (gland)	Assurer l'étanchéité du liquide processus	Fuite, desserrage	Usure	Perte de fluide, perte de pression de fluide processus	Inspection visuelle, test d'étanchéité	4	3	3	36	Remplacement périodique.
		Accouplement	Accouplement	Assurer la transmission du couple et supporter les contraintes de vibrations entre le moteur et la pompe	Désalignement, rupture, usure prématurée	Mauvais alignement, surcharge, fatigue mécanique	Perte de transmission, vibrations excessives, panne de la pompe	Analyse vibratoire, contrôle d'alignement	3	3	2	18	Contrôle d'alignement, inspection régulière.
			Arbre (shaft)	Support des éléments tournantes avec transmission de l`énergie.	Flexion de d'arbre	Désalignement, fissure, usure, contrainte mécanique	Fatigue mécanique, surcharge, lubrification insuffisante Dégradation l'état des pièces interne tournante	Vibrations, perte de transmission, panne du système	3	3	2	18	Révision générale, vérification de la flexion, remplacement.

Tableau III.5 : AMDEC de moteur diesel

Fiche AMDEC du Réseau anti incendie

Etude de cas AMDEC CPF
Moteur DIESEL
Produire l'énergie mécanique de rotation

Système	Fonction	sous système	Elément	Fonction	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité				Actions correctifs
									D	G	F	C	
Moteur Diesel	Produire de l'énergie mécanique de rotation	système mécanique	Arbre à cames moteur	Assure la synchronisation du mouvement et la régulation du débit d'air	Fonctionnement irrégulier	Mauvaise lubrification	Perte de puissance, bruit anormal	Analyse vibratoire	3	2	2	12	Améliorer la lubrification
			Poulie d'arbre à cames	Transmission du mouvement de rotation de l'arbre à cames aux soupapes et culbuteurs	Fonctionnement intermittent	Serrage incorrect de la chaîne de distribution	Perte de synchronisation	Mesure vibratoire	4	3	2	24	Vérifier le serrage
			Courroies de distribution	Transmission du mouvement	Rupture	Usure, tension incorrecte	Arrêt moteur	Contrôle tension	5	4	1	20	Remplacement périodique
			culasse	Recouvre la partie supérieure du bloc moteur et assure l'étanchéité de la chambre de combustion	Fuite externe	Surchauffe, contrainte thermique	Fuite, perte de compression	Test pression	3	2	3	18	Surveillance thermique
			Injecteur de carburant	Injecte et garantit le bon acheminement du carburant dans la chambre de combustion	Fonctionnement intempestif	Carburant impur	Perte de puissance	Analyse fumées	2	3	2	12	Filtrage amélioré
			Soupape d'aspiration et de refoulement	Assure l'alimentation et l'évacuation du moteur en air frais et chaud	Ne s'ouvre pas	Dépôts, surchauffe	Mauvaise combustion	Analyse compression	4	3	2	24	Nettoyage régulier
			Culbuteur moteur	Transforme le mouvement de bas en haut du poussoir en un mouvement de haut en bas de la queue de soupape	Usure	Frottement excessif	Mauvais levée des soupapes	Inspection visuelle	3	2	3	18	Lubrification améliorée
			Joints d'étanchéité culasse	Assurent l'étanchéité entre les conduits de gaz et de fluides (refroidissement et lubrification)	Fuite interne	Température élevée	Fuites d'huile ou de liquide	Contrôle fuite	3	2	3	18	Remplacement périodique

			Cylindres	Guident la course du piston et reçoivent le mélange air-carburant	Dépasse la limite supérieure tolérée	Particules abrasives	Perte d'étanchéité	Analyse huile	4	3	2	24	Contrôle filtration
			Piston	Assurer la compression	usure	fatigue	Perte de puissance	Bruit échauffement	2	1	2	4	Changement des pistons
			Segments d'étanchéité	Assurent l'étanchéité des gaz de fuite passés à travers le segment de compression	Usure	Frottements excessifs	Perte de compression	Analyse huile	3	2	2	12	Surveillance et remplacement
			Bielle	Convertit le mouvement alternatif du piston en rotation du vilebrequin	Fissure	Surcharge moteur	Casse moteur	Analyse vibratoire	4	3	2	24	Contrôle régulier
			Coussinets de bielles	Réduisent les chocs et frottements entre le vilebrequin et la bielle	Usure	Défaut de lubrification	Bruit moteur	Analyse vibratoire	3	2	3	18	Surveillance de l'huile
			Vilebrequin	Transforme la force générée par la combustion en mouvement rotatif	Fissure	Charge excessive	Arrêt moteur	Analyse vibratoire	5	3	2	30	Contrôle périodique
			Couronne du volant moteur	Transmet la puissance du démarreur au vilebrequin	Dégradation	Usure des dents	Difficulté de démarrage	Inspection visuelle	3	2	3	18	Remplacement si usé
			Bloc moteur	Supporte les composants et dissipe la chaleur	Fissure	Contraintes thermiques	Perte de performance	Inspection visuelle	4	3	2	24	Surveillance thermique
		système de refroidissement	Indicateur de température	Signale une élévation anormale de la température du liquide de refroidissement	Indication erronée	Capteur défectueux	Mauvais contrôle thermique	Diagnostic électronique	3	2	2	12	Vérification et remplacement du capteur
			Indicateur de niveau d'eau	Contrôle le niveau du liquide de refroidissement	Indication erronée	Capteur défaillant	Risque de surchauffe moteur	Inspection visuelle	3	2	2	12	Remplacement du capteur
			Voyant lumineux de température eau	S'allume lorsque la température du liquide dépasse un seuil critique	Fonctionnement intempestif	Problème électrique	Absence d'alerte en cas de surchauffe	Test électrique	2	2	2	8	Vérification des connexions
			Vannes PCV	Crée une dépression dans le carter moteur	Blocage physique au coincement	Accumulation de dépôts	Pression excessive dans le moteur	Analyse pression	3	2	3	18	Nettoyage et remplacement si nécessaire

			Thermostat	Maintient une température optimale de fonctionnement	Blocage physique au coincement	Défaillance mécanique	Surchauffe ou refroidissement excessif	Test température	4	3	2	24	Vérification et remplacement périodique
			Pressostat	Mesure la pression différentielle	Lecture erronée	Défaillance capteur	Régulation incorrecte	Inspection électronique	3	2	2	12	Remplacement du capteur
			Échangeur d'eau	Refroidit les circuits hydrauliques	Fuite externe	Corrosion	Surchauffe des circuits	Test pression	3	2	3	18	Entretien et remplacement si nécessaire
			Pompe à eau	Transfère l'eau de refroidissement	Défaillance en position ouverte	Roulements usés	Mauvais refroidissement moteur	Test débit	4	3	2	24	Maintenance préventive
			Courroies, poulies	Permet de transmettre un mouvement de rotation	Rupture	Usure excessive	Perte de transmission	Inspection visuelle	4	3	2	24	Remplacement régulier
			Filtre - bypass	Empêche les particules d'entrer dans le moteur	Blocage physique au coincement	Accumulation de particules	Réduction du débit	Test pression	3	2	3	18	Remplacement périodique
			Flexibles et connexions	Assurent la liaison et transportent les fluides	Fuite externe	Vieillissement des matériaux	Perte de fluide moteur	Inspection visuelle	3	2	3	18	Vérification et remplacement
			Résistance d'eau	Stabilise la température du fluide	Court-circuit (électrique)	Court-circuit ou usure	Mauvais contrôle thermique	Test électrique	3	2	2	12	Vérification électrique
			Échangeur d'eau/huile	Refroidit l'huile moteur	Fuite externe	Corrosion interne	Surchauffe moteur	Test pression	4	3	2	24	Maintenance régulière et remplacement si nécessaire
		système de lubrification	Radiateur à calandre	Refroidit le moteur à combustion interne	Fuite externe	Corrosion	Surchauffe moteur	Test pression	4	3	2	24	Maintenance et remplacement si nécessaire
			Pompe à engrenages d'huile	Assure la circulation de l'huile moteur	Défaillance	Usure des engrenages	Mauvaise lubrification	Test débit	3	2	3	18	Maintenance préventive
			Filtre à huile	Évite que des particules fines ne pénètrent dans le moteur	Fuite interne	Accumulation de particules	Réduction du débit d'huile	Test pression	3	2	3	18	Remplacement périodique
			Filtre bypass d'huile	Assure un débit d'huile d'appoint	Blocage physique au coincement	Mauvais entretien	Diminution de la lubrification	Inspection visuelle	3	2	3	18	Contrôle et remplacement

			Flexibles et connexions	Transportent l'huile et assurent l'étanchéité	Fuite externe	Vieillissement des matériaux	Perte de lubrification	Inspection visuelle	3	2	3	18	Vérification et remplacement
			Indicateur de pression d'huile	Surveille la pression d'huile moteur	Indication erronée	Capteur défectueux	Risque de panne moteur	Diagnostic électronique	4	3	2	24	Remplacement du capteur
			Indicateur delta P	Mesure la différence de pression d'huile	Indication erronée	Défaillance capteur	Mauvaise régulation	Inspection électronique	3	2	2	12	Remplacement du capteur
			Indicateur de température d'huile	Contrôle la température de l'huile moteur	Indication erronée	Problème électrique	Risque de surchauffe moteur	Test électrique	3	2	2	12	Vérification des connexions
			Refroidisseur d'huile	Maintient l'huile moteur à température optimale	Fuite externe	Corrosion interne	Surchauffe moteur	Test pression	3	2	3	18	Maintenance régulière
			Flexibles et connexions	Transportent l'huile et assurent l'étanchéité	Fuite externe	Vieillissement des matériaux	Perte de lubrification	Inspection visuelle	3	2	3	18	Vérification et remplacement
			Voyant lumineux 810 alarme pression d'huile	Alerte en cas de pression d'huile anormale	Fonctionnement intempestif	Panne électrique	Absence d'alerte	Test électrique	3	2	2	12	Vérification et remplacement
			Carter d'huile	Stocke et distribue l'huile moteur	Fuite externe	Détérioration mécanique	Perte de lubrification	Inspection visuelle	3	2	3	18	Remplacement si nécessaire
		système d'injection de carburant	Injecteur de carburant	Injecte le carburant dans la chambre de combustion	Fonctionnement intempestif	Carburant impur	Mauvaise combustion, perte de puissance	Analyse fumées	3	2	2	12	Vérification et remplacement des filtres
			Pompe d'injection HP	Assure une haute pression pour l'injection du carburant	Fonctionnement intermittent	Mauvaise lubrification	Baisse de performance moteur	Test pression	4	3	2	24	Maintenance et lubrification régulières
			Transmetteur de niveau de carburant	Mesure le niveau de carburant dans le réservoir	Indication erronée	Capteur défaillant	Mauvaise gestion de l'approvisionnement	Inspection électronique	3	2	2	12	Vérification et remplacement du capteur
			Flexibles	Transportent le carburant entre les composants	Fuite externe	Vieillissement des matériaux	Risque d'incendie,	Inspection visuelle	4	3	2	24	Remplacement périodique

							perte de carburant						
			Vanne manuelle	Permet l'arrêt manuel du flux de carburant	Ne s'ouvre pas	Accumulation de saletés	Impossibilité de couper l'alimentation	Inspection visuelle	3	2	3	18	Nettoyage et maintenance régulière
			Filtre de carburant	Empêche les impuretés d'entrer dans le circuit	Blocage physique au coincement	Carburant impur	Mauvaise combustion, obstruction	Test pression	3	2	3	18	Remplacement périodique
			Retour de carburant	Assure le retour du carburant non utilisé vers le réservoir	Fuite externe	Usure des composants	Perte de carburant, risque d'incendie	Inspection visuelle	4	3	2	24	Vérification et remplacement
		Système d' admission d' air	Filtre d'air	Retient les poussières et particules indésirables	Blocage physique au coincement	Accumulation de particules	Perte de puissance moteur	Inspection visuelle	3	2	3	18	Remplacement périodique
			Turbocompresseur	Augmente la pression de l'air admis	Fonctionnement intermittent	Mauvaise lubrification	Perte de pression du turbo	Analyse vibratoire	4	3	2	24	Vérification et maintenance régulières
			Refroidisseur d'air	Réduit la température de l'air comprimé	Fuite externe	Corrosion	Température excessive moteur	Test pression	3	2	3	18	Inspection et remplacement si nécessaire
			Refroidisseur d'air	Réduit la température de l'air comprimé	Fuite externe	Corrosion	Température excessive moteur	Test pression	3	2	3	18	Inspection et remplacement si nécessaire
			Soupape d'aspiration	Régule l'entrée d'air	Ne s'ouvre pas	Dépôts de carbone	Mauvaise combustion	Analyse compression	3	2	2	12	Nettoyage régulier
			Durites	Transportent l'air entre composants	Fuite externe	Vieillissement des matériaux	Perte de performance	Inspection visuelle	3	2	3	18	Remplacement périodique
			Vanne de fermeture d'admission d'air	Contrôle l'entrée d'air	Ne s'ouvre pas	Mécanisme bloqué	Dysfonctionnement moteur	Inspection manuelle	3	2	3	18	Vérification et lubrification
			Indicateur pression de turbocompresseur	Mesure la pression de l'air	Indication erronée	Capteur défaillant	Mauvaise régulation moteur	Diagnostic électronique	3	2	2	12	Remplacement du capteur
			Turbocompresseur	Augmente la puissance moteur	Fonctionnement intermittent	Lubrification insuffisante	Perte d'efficacité	Analyse vibratoire	4	3	2	24	Contrôle et maintenance réguliers

		Système d'échappement	Indicateur de température d'échappement	Mesure la température des gaz	Indication erronée	Capteur défectueux	Surchauffe non détectée	Test électronique	3	2	2	12	Remplacement du capteur
			Soupape d'échappement	Permet l'évacuation des gaz	Ne s'ouvre pas	Dépôts de suie	Mauvaise combustion	Inspection visuelle	3	2	3	18	Nettoyage et maintenance
		Système de démarrage	Démarreur électrique AC/DC (Batteries)	Fournit l'énergie pour démarrer le moteur	Ne démarre pas	Batterie faible ou défectueuse	Impossibilité de démarrer	Test électrique	4	3	2	24	Vérification et recharge de la batterie
			Alternateur	Fournit l'énergie électrique nécessaire	Fonctionnement intempestif	Courroie cassée ou usure	Batterie non chargée	Inspection visuelle	3	2	2	12	Remplacement des courroies, contrôle régulier
			Démarreur hydraulique	Assure un accouplement temporaire avec le vilebrequin	Fuite externe	Joint défectueux ou usé	Perte de pression hydraulique	Test pression	3	2	3	18	Vérification et remplacement des joints
			Pompe Manuelle	Aspire un liquide pour le refouler	Défaillance	Usure mécanique ou fuite	Mauvais amorçage	Inspection manuelle	3	2	3	18	Vérification et entretien périodique
			Tank d'huile	Stocke l'huile pour la lubrification	Fuite externe	Corrosion ou fissure	Manque d'huile, risque de surchauffe	Inspection visuelle	3	2	3	18	Remplacement en cas de détérioration
			Accumulateurs	Emmagasinent de l'énergie sous forme de pression	Perte de pression	Fuite interne ou mauvaise étanchéité	Dysfonctionnement du système hydraulique	Test pression	4	3	2	24	Maintenance préventive et contrôle des fuites
			Indicateur pression	Mesure la pression d'allumage et de compression	Indication erronée	Capteur défectueux	Mauvaise régulation moteur	Diagnostic électronique	3	2	2	12	Remplacement du capteur défectueux
			Contacteur 1804	Ouvre ou ferme un circuit électrique	Ne commute pas	Problème électrique ou encrassement	Circuit non fonctionnel	Test électrique	2	2	2	8	Vérification des connexions et nettoyage

3.1 Analyse et remarques sur les résultats trouvés de la pompe et le moteur Diesel

Analyse AMDEC des composants de la Pompe diesel

Cette analyse couvre un ensemble complémentaire de composants mécaniques critiques de la pompe diesel, classés par niveau de criticité.

- **Composants à criticité critique (C ≥ 20)**

Ces éléments présentent un risque majeur de panne ou d'arrêt de la pompe, nécessitant un contrôle immédiat et constant : Joint d'étanchéité (principal), Chemise de l'arbre, Joint d'étanchéité (intérieur) et impulseur de la pompe

- **Composants à criticité majeure (10 ≤ C < 20)**

Ces composants impactent directement la fiabilité du système de pompage et nécessitent une maintenance préventive renforcée. Roulement x2 ,Renifleur carter, Fouloir (split gland), Volute de la pompe, Bague d'usure, Roulement x1,Renifleur cartér, Fouloir (copie), Presse-étoupe (copie), Accouplement et Arbre (shaft)

- **Composants à criticité modérée (C ≤ 10)**

Composants ayant un impact secondaire, mais qui peuvent causer des dérives si leur état n'est pas suivi régulièrement. Écrou de freinage, Presse-étoupe, Rondelle de freinage, Couvercle extérieur du palier, Couvercle intérieur du palier, Soupape de décharge d'air, Joint d'étanchéité (extérieur), Couvercle extérieur du palier (copie) et Couvercle intérieur du palier (copie)

- **Composants à criticité faible (C < 5)**

Aucun composant de cette liste ne présente une criticité faible.

Analyse AMDEC de Moteur diesel

L'analyse AMDEC complète des 67 composants de la pompe diesel révèle plusieurs éléments critiques affectant la fiabilité, la sécurité et la performance du moteur. Le tableau classe ces composants selon quatre niveaux de criticité, accompagnés de recommandations techniques ciblées.

- **Composants à criticité critique (C ≥ 20)**

Ces composants représentent un danger majeur pour le système moteur et nécessitent une surveillance permanente et des mesures immédiates : Vilebrequin

- **Composants à criticité majeure (10 ≤ C < 20)**

Ces composants peuvent fortement affecter les performances du moteur. Des actions correctives et préventives sont nécessaires : Culasse, Culbuteur moteur, Joints d'étanchéité culasse, Coussinets de bielles, Couronne du volant moteur, Vannes PCV, Échangeur d'eau, Filtre – bypass, Flexibles et connexions, Pompe à engrenages d'huile, Filtre à huile, Filtre bypass d'huile, Flexibles et connexions, Refroidisseur d'huile, Flexibles et connexions, Carter d'huile, Vanne manuelle, Filtre de carburant, Filtre d'air, Refroidisseur d'air, Soupape d'aspiration,Vanne de fermeture d'admission d'air, Indicateur pression de turbocompresseur,Turbocompresseur,Alternateur,Tank d'huile,Accumulateurs, Indicateur pression ,Courroies de distribution,Poulie d'arbre à cames,Soupape d'aspiration et de refoulement,Cylindres,Bielle,Bloc moteur,Thermostat,Pompe à eau,Courroies, poulies,Échangeur d'eau/huile,Radiateur à calandre,Indicateur de pression d'huile,Pompe d'injection HP,Flexibles,Retour de carburant,Turbocompresseur,Soupape d'échappement et Démarreur hydraulique

- **Composants à criticité modérée (C < 10)**

Ces éléments ont un impact moyen, mais peuvent causer des dérives s'ils ne sont pas suivis régulièrement : Voyant lumineux de température eau ,Contacteur 1804 ,Arbre à cames moteur,Injecteur de carburant,Segments d'étanchéité,Indicateur de température,Indicateur de niveau d'eau,Pressostat,Résistance d'eau,Indicateur delta P,Indicateur de température d'huile,Voyant lumineux 810 alarme pression d'huile,Injecteur de carburant,Transmetteur de niveau de carburant,Refroidisseur d'air,Durites,Indicateur de température d'échappement, Démarreur électrique AC/DC (Batteries) et Pompe Manuelle.

❖ **Composants à criticité faible (C < 5)**

Ces éléments sont peu critiques mais doivent faire l'objet d'un suivi occasionnel : Piston

3.2 Recommandations spécifiques en fonction de chaque criticité pour : la pompe diesel et le moteur diesel

pour la pompe diesel

❖ **Pour les composants à criticité critique (C ≥ 20) :**

- Surveillance dynamique de l'étanchéité (capteurs de fuite, analyse en ligne).
- Inspection régulière de la chemise d'arbre (recherche de rayures, usure, corrosion).
- Remplacement périodique des joints selon des seuils d'usure définis.
- Équilibrage dynamique et contrôle de cavitation de l'impulseur.

❖ **Pour les composants à criticité majeure (10 ≤ C < 20) :**

- Analyse vibratoire continue pour les roulements et l'arbre.
- Lubrification contrôlée avec surveillance de température.
- Contrôle dimensionnel des bagues, volutes et arbres.
- Alignement laser des accouplements.
- Test de fuite et serrage contrôlé du presse-étoupe.

❖ **Pour les composants à criticité modérée (C ≤ 10) :**

- Inspection visuelle régulière des couvercles, rondelles et écrous.
- Remplacement préventif lors des cycles de maintenance.
- Test fonctionnel des soupapes de décharge d'air.

- Contrôle de couple de serrage et du jeu d'usure.

Pour le moteur diesel

❖ Criticité critique (C ≥ 20)

- Mise en place d'un programme de surveillance vibratoire en temps réel via capteurs accélérométriques.
- Réalisation régulière d'analyses par ultrasons et magnétoscopie pour détecter les fissures internes.
- Contrôle rigoureux des limites de couple moteur, avec arrêt automatique en cas de surcharge.
- Mise en place de redondances mécaniques ou électroniques pour sécuriser la chaîne cinématique.

❖ Criticité majeure (10 ≤ C < 20)

- Élaboration d'un plan de maintenance préventive basé sur le nombre d'heures moteur.
- Contrôles de couple, d'étanchéité et de pression à intervalles fixés par l'historique de pannes.
- Étalonnage périodique des capteurs (pression, température, niveau).
- Renforcement du suivi des paramètres thermodynamique (pressions d'injection, températures d'huile et d'échappement).
- Remplacement périodique des filtres et flexibles selon les cycles de maintenance.

❖ Criticité modérée (C ≤ 10)

- Contrôle fonctionnel régulier des capteurs et indicateurs analogiques/numériques.
- Nettoyage des injecteurs par méthode chimique ou ultrasonique toutes les 12 heures.

- Vérification de l'état des durites et remplacement préventif en cas de rigidité anormale.
- Tests de fonctionnement de la chaîne de démarrage électrique (tension batterie, relais, démarreur).
- Vérification de continuité électrique des voyants et contacteurs.
- Nettoyage des connecteurs pour prévenir l'oxydation et la perte de signal.
- Test de signal lumineux et audit de la signalisation toutes les 200 heures.

❖ **Criticité faible (C < 5)**

- Inspection visuelle lors des arrêts techniques planifiés.
- Vérification de l'alignement piston-bielle et du jeu à la jupe.
- Lubrification préventive avec graisse haute température en conditions extrêmes.

4 Application de l'AMDEC générée par l'intelligence artificielle (using intelligence of Mechanical Engineering de Jose V.F. Vieira)

4.1 Présentation de la méthode of Mechanical Engineering intelligence

Nous avons utilisé **Mechanical Engineering intelligence** pour qu'elle prépare le tableau relatif à la pompe diesel, en y ajoutant une analyse technique ainsi que des recommandations générales, les résultats trouvés sont présentées dans les deux images suivantes :

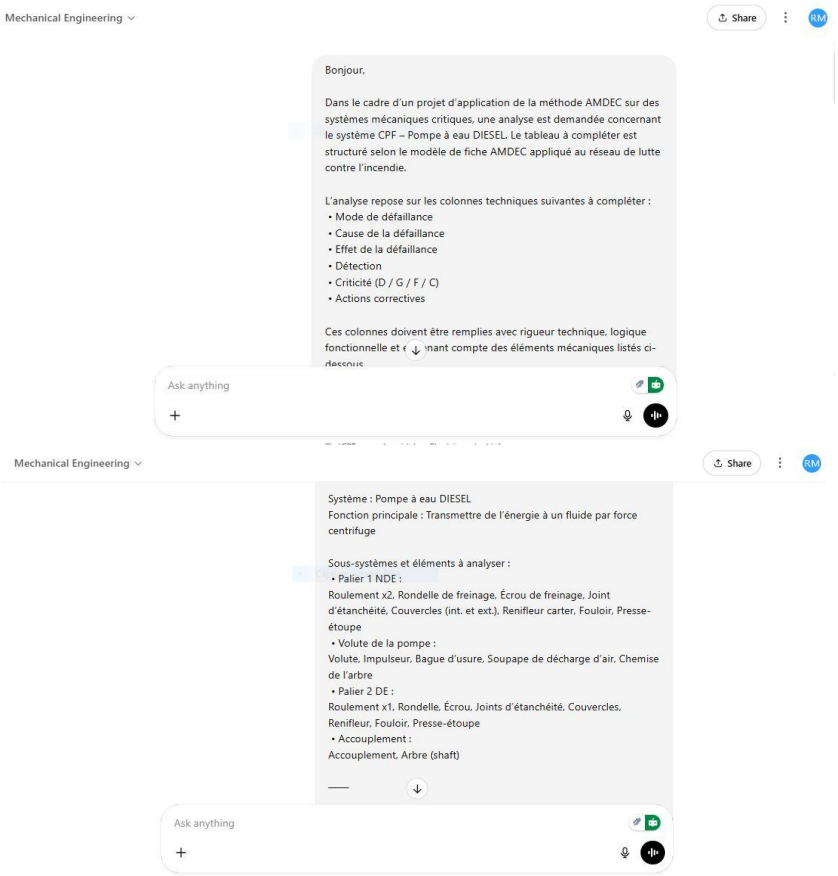


Figure III.4 : Image illustrant la commande donnée à IA

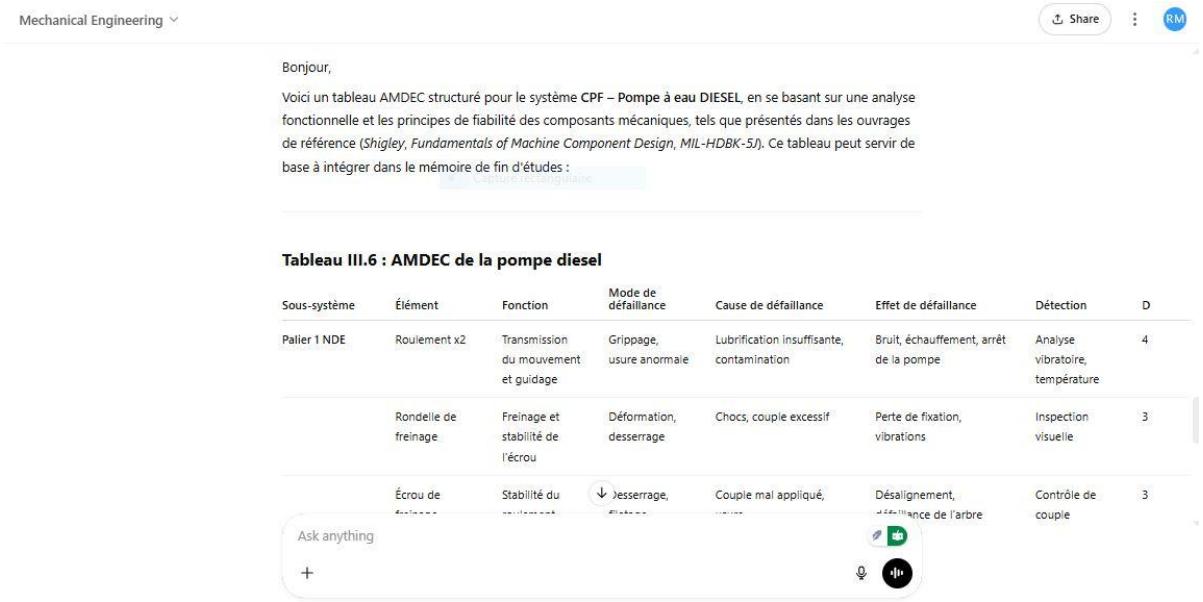


Figure III. 5: Image illustrant les résultats générés par IA

4.2 Résultats de l'AMDEC, Analyse Techniques et recommandations par bot

La pompe diesel

Tableau III.6 : AMDEC de la pompe diesel par le bot

Sous-système	Élément	Fonction	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Effet de défaillance	Détection	D	G	F	C	Actions correctives
Palier 1 NDE	Roulement x2	Transmission du mouvement et guidage des composants rotatifs	Grippage, usure anormale	Lubrification insuffisante, contamination	Bruit, échauffement, arrêt de la pompe	Analyse vibratoire, température	4	4	3	48	Contrôle périodique de lubrification, remplacement préventif
	Rondelle de freinage	Freinage et stabilité de l'écrou	Déformation, desserrage	Chocs, couple excessif	Perte de fixation, vibrations	Inspection visuelle	3	3	2	18	Remplacement périodique, serrage au couple recommandé
	Écrou de freinage	Assure la stabilité du roulement	Desserrage, filetage endommagé	Couple mal appliqué, usure	Désalignement, défaillance de l'arbre	Contrôle de couple	3	3	2	18	Vérification du couple de serrage, application de frein-filet
	Joint d'étanchéité	Assure l'étanchéité d'huile du carter	Fuite, usure prématurée	Pression élevée, vieillissement	Fuite d'huile, perte de lubrification	Fuite visible, niveau d'huile	3	4	2	24	Remplacement planifié, choix de joint adapté
	Couvercle extérieur du palier	Protection des éléments roulants	Fissuration, corrosion	Ambiance humide, vibrations	Contamination, entrée de corps étrangers	Inspection visuelle	2	3	2	12	Traitement de surface, remplacement régulier
	Couvercle intérieur du palier	Protection interne	Usure, mauvaise fixation	Défaut d'assemblage, vibrations	Détérioration interne du palier	Vérification au démontage	2	3	2	12	Renforcement de la fixation, inspection préventive
	Renifleur carter	Évacue la surpression d'huile	Obstruction	Encrassement, maintenance négligée	Surpression, fuites, défaillance des joints	Contrôle pression carter	3	3	2	18	Nettoyage périodique, filtre intégré
	Fouloir (split gland)	Maintien du presse-étoupe	Usure, desserrage	Frottement, vibration	Fuite liquide, perte d'étanchéité	Contrôle visuel	3	3	2	18	Réglage de pression de serrage, remplacement

	Presse-étoupe (gland)	Assure l'étanchéité du liquide processus	Fuite, usure des garnitures	Matériau inadéquat, vieillissement	Pertes de fluide, contamination environnement	Observation de fuite	4	4	2	32	Sélection matériaux résistants, surveillance en continu
Volute	Volute de la pompe	Contenir et diriger le fluide en sortie	Érosion, fissuration	Fluide agressif, cavitation	Baisse de performance hydraulique	Inspection visuelle	3	3	2	18	Renforcement du matériau, traitement anti-cavitation
	Impulseur	Transmet de l'énergie au fluide	Déséquilibre, casse	Corps étranger, cavitation	Vibrations, perte de débit, dommage moteur	Analyse vibratoire	4	4	3	48	Équilibrage régulier, matériaux résistants
	Bague d'usure	Réduction des frottements et protection mécanique	Usure rapide, jeu excessif	Fluide chargé, désalignement	Perte d'efficacité, frottement métal-métal	Inspection au démontage	3	4	2	24	Remplacement périodique, contrôle des jeux
	Soupape de décharge d'air	Purge de l'air dans la volute	Blocage, fuite	Corps étranger, joint endommagé	Mauvais amorçage, cavitation	Test de purge	3	3	2	18	Entretien régulier, filtration d'entrée
	Chemise de l'arbre	Centrage et fixation de l'impulseur	Usure, jeu radial	Frottement, défaut de montage	Désalignement, détérioration impulseur	Contrôle géométrique	3	3	2	18	Réusinage ou remplacement, alignement précis
Palier 2 DE	Roulement x1	Guidage des composants rotatifs	Grippage, jeu axial	Usure, lubrification insuffisante	Bruit, vibration, arrêt partiel	Analyse vibratoire	4	3	3	36	Lubrification automatique, capteur température
	Rondelle de freinage	Freinage et stabilité de l'écrou	Déformation, fissure	Couple excessif, vieillissement	Perte de maintien, vibration	Inspection visuelle	3	3	2	18	Remplacement programmé, matériau renforcé
	Écrou de freinage	Stabilité du roulement	Desserrage, usure du filetage	Serrage inadéquat, fatigue mécanique	Dysfonctionnement palier	Vérification au serrage	3	3	2	18	Clé dynamométrique, vérification régulière

	Joints d'étanchéité x2	Étanchéité d'huile	Fuite, écrasement	Pression interne, vieillissement	Fuite d'huile, contamination système	Vérification visuelle	3	3	2	18	Remplacement périodique, ajustement des tolérances
	Couvercles palier ext/int	Protection des roulements	Fissures, usure	Vibrations, environnement corrosif	Contamination, réduction de durée de vie	Inspection manuelle	2	3	2	12	Revêtement protecteur, remplacement selon cycle
	Renifleur carter	Évacuation surpression	Obstruction, casse	Huile sale, défaut d'entretien	Surchauffe, fuite, surpression	Pression mesurée	3	3	2	18	Entretien périodique, nettoyage du renifleur
	Fouloir (split gland)	Maintien du presse-étoupe	Usure, défaut de montage	Pression trop élevée, matériau faible	Fuite liquide, arrêt du système	Contrôle visuel	3	3	2	18	Vérification serrage, matériau résistant
	Presse-étoupe (gland)	Étanchéité du liquide processus	Usure des garnitures	Temps d'utilisation élevé	Perte d'étanchéité, fuites	Inspection à l'arrêt	3	3	2	18	Remplacement périodique, surveillance continue
Accouplement	Accouplement	Transmission du couple entre moteur et pompe	Rupture, désalignement	Fatigue, surcharge, mauvais montage	Panne totale de transmission, vibrations excessives	Analyse vibratoire, contrôle d'alignement	4	4	3	48	Alignement laser, surveillance vibrations, lubrification adaptée
	Arbre (shaft)	Support des éléments tournants, transmission d'énergie	Flexion, rupture	Désalignement, surcharge, défaut métal	Blocage ou casse, panne totale	Analyse de flexion	4	4	3	48	Vérification par ultrasons, équilibrage dynamique

Le moteur diesel

Tableau III.7 : AMDEC de moteur diesel Système mécanique

Élément	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Effet de défaillance	Détection	D	G	F	C	Actions correctifs
Arbre à cames moteur	Jeu anormal ou grippage	Défaut de lubrification	Désynchronisation de la distribution	Analyse vibratoire	4	3	3	36	Améliorer la filtration d'huile, inspection périodique
Poulie d'arbre à cames	Désalignement ou rupture	Mauvais serrage, fatigue du métal	Perte de synchronisation, bruit moteur	Inspection visuelle et acoustique	3	3	2	18	Vérification de couple de serrage, remplacement préventif
Courroie de distribution	Rupture	Vieillissement, tension incorrecte	Arrêt brutal du moteur, dommages internes	Inspection visuelle régulière	5	4	3	60	Remplacement programmé, contrôle de tension
Culasse	Fissure ou déformation	Surchauffe prolongée	Fuite de liquide, baisse de compression	Contrôle pression et température	4	3	3	36	Surveillance thermique, remplacement en cas de fissure
Injecteur de carburant	Blocage partiel ou complet	Impuretés dans le carburant	Mauvaise pulvérisation, consommation accrue	Analyse des gaz d'échappement	3	3	2	18	Filtration renforcée, nettoyage ou remplacement injecteur
Soupape admission/échappement	Non-étanchéité ou blocage	Dépôt de calamine, surchauffe	Fuite de compression, perte de puissance	Test de compression	4	3	2	24	Détartrage régulier, contrôle des jeux
Culbuteur moteur	Usure ou déformation	Frottement excessif, manque d'huile	Dysfonctionnement des soupapes	Inspection manuelle	3	2	3	18	Lubrification renforcée, remplacement si usure
Joint de culasse	Fuite interne ou externe	Déformation due à la température	Mélange liquide-huile, surchauffe	Analyse de liquide moteur	5	4	3	60	Remplacement à intervalles fixes, contrôle couple culasse
Cylindre	Rayures ou ovalisation	Usure mécanique, manque de lubrification	Perte d'étanchéité, fumée bleue	Analyse d'huile, compression	4	3	3	36	Rectification ou remplacement cylindre
Piston	Fissure ou grippage	Température élevée, déformation	Bruit moteur, perte de puissance	Analyse acoustique et température	4	3	2	24	Contrôle des températures, changement piston endommagé

Segments d'étanchéité	Usure ou casse	Usure naturelle, manque de lubrification	Fuite de gaz, consommation d'huile	Test compression, fumées	3	3	2	18	Remplacement régulier, surveillance de l'huile
Bielle	Déformation ou rupture	Surcharge, défaut de lubrification	Casse moteur, bruit violent	Analyse vibratoire	5	4	2	40	Lubrification adéquate, couple de serrage contrôlé
Coussinets de bielle	Usure excessive	Mauvaise lubrification	Jeu anormal, bruit métallique	Analyse huile, écoute moteur	4	3	3	36	Améliorer qualité d'huile, contrôle à chaque entretien
Vilebrequin	Fissure ou déséquilibre	Fatigue mécanique	Vibration anormale, arrêt moteur	Analyse vibratoire	5	4	3	60	Équilibrage dynamique, remplacement en cas de fissure
Couronne volant moteur	Dent cassée ou usée	Démarrage fréquent, mauvaise matière	Démarrage difficile, grincement	Inspection visuelle	3	2	2	12	Remplacement planifié, contrôle de l'usure
Bloc moteur	Fissuration ou déformation	Choc thermique, surpression	Fuite interne, surchauffe	Contrôle structurel, visuel	5	3	3	45	Surveillance thermique, usage conforme aux limites

Tableau III.8 : AMDEC de moteur diesel Système : Refroidissement

Élément	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Effet de défaillance	Détection	D	G	F	C	Actions correctifs
Indicateur de température	Affichage bloqué	Court-circuit interne	Aucune alerte en cas de surchauffe	Test fonctionnel à froid/chaud	4	2	2	16	Test périodique + remplacement du capteur défectueux
Indicateur de niveau d'eau	Indication constante	Flotteur bloqué ou capteur oxydé	Risque de manque de liquide sans détection	Vérification manuelle visuelle	4	2	2	16	Nettoyage du capteur + test de niveau
Voyant lumineux température	Ne s'allume pas en cas critique	Connexion défaillante	Absence d'alerte de surchauffe	Test électrique avec simulateur	5	3	2	30	Reprise des connexions, vérification relais
Vannes PCV	Blocage partiel	Résidus huileux, manque d'entretien	Pression dans le carter, fuites possibles	Analyse pression carter	3	2	3	18	Nettoyage à intervalles réguliers + purge

Thermostat	Ouverture retardée	Fatigue du ressort ou débris	Température moteur au-dessus de la norme	Analyse thermique en fonctionnement	4	3	2	24	Remplacement préventif selon les heures moteur
Pressostat	Signal erroné	Fuite interne ou étalonnage déréglé	Mauvaise commande du ventilateur ou pompe	Analyse pression dynamique	3	2	2	12	Vérification étalonnage + changement capteur
Échangeur d'eau	Obstruction interne	Tartre, boue ou dépôt calcaire	Refroidissement inefficace	Mesure différentielle de température	4	3	2	24	Rinçage du circuit + nettoyage chimique
Pompe à eau	Débit insuffisant	Jeu au niveau des paliers, corrosion	Surchauffe progressive du moteur	Test de débit + sonde T°	5	3	2	30	Vérification du jeu + remplacement de la pompe
Courroies, poulies	Patinage ou glissement	Tension incorrecte ou usure	Baisse d'efficacité de la pompe	Contrôle tension à l'arrêt	4	2	2	16	Réglage de tension + changement à fréquence fixe
Filtre - bypass	Colmatage	Absence d'entretien, fluide sale	Chute de débit dans le circuit de refroidissement	Analyse pression différentielle	3	3	2	18	Remplacement périodique du filtre
Flexibles et connexions	Porosité ou fissure	Vieillissement, température excessive	Fuite lente ou brutale du liquide	Inspection à pression statique	4	2	3	24	Contrôle visuel + remplacement préventif
Résistance d'eau	Non-fonctionnement total	Rupture du fil résistif ou oxydation	Température fluide instable au démarrage	Test continuité + sonde T°	3	2	2	12	Vérification résistance + remplacement en panne
Échangeur eau/huile	Micro-fuites internes	Perforation due à corrosion	Mélange huile/eau + perte performance lubrifiant	Analyse de l'huile et liquide	5	3	2	30	Contrôle qualité liquide + remplacement complet

Tableau III.9 : AMDEC de moteur diesel Lubrification

Élément	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Effet de défaillance	Détection	D	G	F	C	Actions correctifs
Radiateur à calandre	Obstruction interne	Dépôts ou tartre	Refroidissement d'huile insuffisant	Analyse thermique huile	4	3	2	24	Rinçage du circuit + nettoyage ou remplacement
Pompe à engrenages d'huile	Débit instable	Jeu excessif ou usure paliers	Baisse de pression d'huile	Mesure dynamique pression	5	3	2	30	Révision des engrenages + remplacement préventif

Filtre à huile	Colmatage progressif	Contamination excessive	Blocage partiel du circuit de lubrification	Analyse pression différentielle	4	3	2	24	Changement régulier + suivi propreté huile
Filtre bypass d'huile	Fonctionnement bloqué	Surcharge ou non-entretien	Dérivation inefficace – surpression possible	Inspection pression	3	2	3	18	Remplacement du filtre + contrôle qualité huile
Flexibles et connexions	Déformation ou fissure	Vieillissement, pression excessive	Fuite d'huile – perte rapide de lubrification	Contrôle visuel + pression statique	4	2	3	24	Remplacement périodique + surveillance des pressions
Indicateur de pression d'huile	Aiguille figée ou erronée	Capteur HS, faux contact	Absence de signal d'alerte	Diagnostic avec capteur externe	5	3	2	30	Vérification du circuit + remplacement capteur
Indicateur delta P	Valeur de pression incohérente	Défaut de calibration	Mauvaise détection des chutes de pression	Calibration électronique	3	2	2	12	Étude des dérives + étalonnage ou changement
Indicateur de température d'huile	Affichage lent ou incorrect	Thermistance défectueuse	Surveillance thermique faussée	Test de réponse thermique	3	2	2	12	Test fonctionnel + remplacement si dérive constatée
Refroidisseur d'huile	Rendement réduit	Boue, corrosion interne	Température huile trop élevée	Mesure T° entrée/sortie	4	3	2	24	Nettoyage ou détartrage + contrôle régulier
Voyant alarme pression d'huile	Ne s'allume pas	Court-circuit ou relais défaillant	Non-détection des défaillances pression	Test par simulation d'alarme	4	2	2	16	Réparation circuit électrique + vérif. des relais
Carter d'huile	Déformation ou fissure	Impact mécanique ou corrosion	Fuite lente ou rapide de l'huile	Inspection visuelle sous moteur	4	2	3	24	Remplacement de carter + serrage boulons

Tableau III.10 : AMDEC de moteur diesel Système - Injection de carburant

Élément	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Effet de défaillance	Détection	D	G	F	C	Actions correctifs
Injecteur de carburant	Pulvérisation irrégulière	Encrassement ou dépôt de calamine	Mauvaise atomisation – cliquetis moteur	Analyse d'injection / bruit moteur	3	3	2	18	Nettoyage aux ultrasons ou remplacement

Pompe d'injection haute pression	Perte de pression	Usure interne ou cavitation	Diminution de puissance – ratés à l'accélération	Mesure de pression dynamique	4	3	3	36	Révision mécanique complète ou remplacement
Transmetteur niveau de carburant	Signal instable	Flotteur bloqué ou sonde HS	Risque de panne sèche ou ravitaillement excessif	Lecture sur tableau de bord	2	2	2	8	Contrôle du réservoir + remplacement du capteur
Flexibles de carburant	Poreux ou fissuré	Température, pression ou UV	Fuite de carburant – risque de feu	Inspection visuelle + odeur	5	3	2	30	Remplacement préventif avec flexibles renforcés
Vanne manuelle	Grippage ou fuite interne	Oxydation ou dépôt de paraffine	Difficulté à isoler le circuit en urgence	Essai manuel de fermeture	3	2	3	18	Dégrippage + traitement anticorrosion
Filtre de carburant	Saturation ou colmatage	Utilisation de gasoil sale	Débit insuffisant – ratés moteur	Mesure delta P + analyse carburant	4	3	2	24	Changement systématique + surveillance qualité carburant
Retour de carburant	Débit bloqué ou fuite	Obstruction ou fissure durite	Excès de pression – fuite ou échauffement	Inspection + test de débit retour	4	3	3	36	Remplacement des tuyaux + purge du circuit

Tableau III.11 : AMDEC de moteur diesel Système - Admission d'air

Élément	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Effet de défaillance	Détection	D	G	F	C	Actions correctifs
Filtre à air	Saturation du média filtrant	Absence de nettoyage ou milieu poussiéreux	Perte de débit – réduction puissance moteur	Inspection visuelle + chute de débit	3	3	3	27	Nettoyage périodique ou remplacement
Turbocompresseur	Jeu axial excessif	Manque de lubrification ou défaut roulement	Baisse de suralimentation – fumée noire	Analyse acoustique et pression turbo	4	3	3	36	Révision complète + surveillance lubrification
Refroidisseur d'air (intercooler)	Perte d'étanchéité	Microfissures ou corrosion interne	Air surchauffé – baisse rendement	Test de pression et thermographie	3	3	3	27	Remplacement ou réparation selon état
Soupape d'aspiration	Blocage partiel	Encrassement par résidus de combustion	Admittance irrégulière – cliquetis moteur	Test compression + analyse fumée	3	2	3	18	Démontage et nettoyage à intervalle défini

Durites d'admission	Fissuration ou desserrage	Vieillissement ou vibration moteur	Fuite d'air – perte d'efficacité turbo	Inspection visuelle sous pression	3	3	2	18	Remplacement périodique + serrage renforcé
Vanne de fermeture d'admission d'air	Non-réactivité	Mécanisme encrassé ou moteur pas à pas HS	Blocage d'air à l'entrée – arrêt moteur	Test commande électrique + visuel	4	3	2	24	Nettoyage du mécanisme + vérification actionneur
Indicateur pression du turbocompresseur	Signal hors plage	Défaillance du capteur ou dérive électronique	Mauvais pilotage de la pression – sous-régime	Lecture via interface diagnostic	2	2	2	8	Étalonnage ou remplacement du capteur

Tableau III.12 : AMDEC de moteur diesel Système - Échappement

Élément	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Effet de défaillance	Détection	D	G	F	C	Actions correctifs
Turbocompresseur	Surchauffe du palier central	Insuffisance de lubrification	Perte de pression – baisse de performance	Analyse vibratoire et température	4	3	3	36	Vérification du circuit d'huile + entretien préventif
Indicateur de température d'échappement	Valeur hors plage	Sonde endommagée ou câble coupé	Non-détection d'une surchauffe critique	Diagnostic électronique	3	2	2	12	Remplacement de la sonde + contrôle du faisceau
Soupape d'échappement	Obstruction partielle	Encrassement par résidus carbonés	Surpression dans la chambre – cognements moteur	Contrôle visuel + test compression	3	3	3	27	Nettoyage périodique ou remplacement si usure avancée

Tableau III.13 : AMDEC de moteur diesel Système de Démarrage

Élément	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Effet de défaillance	Détection	D	G	F	C	Actions correctifs
Démarreur électrique AC/DC	Refus de démarrage	Tension insuffisante ou batterie usée	Blocage complet du démarrage moteur	Testeur de batterie	4	3	2	24	Recharge ou remplacement de la batterie
Alternateur	Production électrique instable	Usure de la courroie ou défaut de tension	Batterie déchargée – perte des fonctions auxiliaires	Inspection visuelle	3	2	2	12	Contrôle de la tension et remplacement des courroies

Démarreur hydraulique	Perte d'efficacité d'accouplement	Fuite d'huile ou usure du piston interne	Démarrage difficile ou impossible	Test de pression hydraulique	3	2	3	18	Remplacement des joints + contrôle des niveaux d'huile
Pompe manuelle	Aspiration incomplète	Endommagement du mécanisme de pompage	Circuit non amorcé – démarrage retardé	Vérification manuelle	3	2	3	18	Nettoyage, graissage et vérification de l'étanchéité
Tank d'huile	Perte de fluide	Corrosion interne ou fissure structurelle	Risque de surchauffe du moteur	Inspection visuelle	3	2	3	18	Inspection anticorrosion + remplacement si nécessaire
Accumulateurs	Pression insuffisante	Fuite interne ou valve défectueuse	Dysfonctionnement du circuit de démarrage hydraulique	Test de pression	4	3	2	24	Maintenance préventive et remplacement des éléments usés
Indicateur de pression	Affichage incorrect	Défaillance du capteur ou connectique	Risque de régulation incorrecte	Diagnostic électronique	3	2	2	12	Test du capteur et remplacement en cas d'anomalie
Contacteur 1804	Circuit non fermé	Encrassement des bornes ou oxydation	Coupure de l'alimentation du démarreur	Multimètre / inspection visuelle	2	2	2	8	Nettoyage des contacts et vérification des connexions

Analyse Techniques et recommandations par le bot

❖ La pompe diesel

L'analyse AMDEC de la pompe à eau diesel met en évidence plusieurs points critiques liés à l'usure mécanique, aux problèmes d'étanchéité et à l'alignement des composants rotatifs. Les éléments les plus critiques ($C \geq 20$) concernent les roulements, l'impulseur, l'accouplement et l'arbre, car leur défaillance entraîne un arrêt immédiat ou une destruction du système.

Les composants à criticité moyenne ($10 \leq C < 20$) sont souvent liés à l'étanchéité (joints, presse-étoupe, renifleur), qui peuvent provoquer des fuites ou des baisses de performance si leur maintenance est négligée. Les pièces à faible criticité ($C < 10$) sont en général des éléments de protection ou de fixation, mais leur bon état reste essentiel pour la fiabilité globale.

➢ **Recommandations générales :**

a. Mettre en place un plan de maintenance préventive basé sur l'analyse vibratoire, les inspections visuelles et le contrôle de serrage.

b. Renforcer le suivi de lubrification (huile et graisse) pour prévenir les usures prématurées des roulements et de l'arbre.

c. Privilégier des matériaux résistants à la corrosion, la cavitation et aux températures élevées, notamment pour les composants en contact avec les fluides.

d. Installer des capteurs de température et de vibration sur les éléments critiques pour déclencher des alertes avant la défaillance.

❖ Le moteur diesel

➢ Le système mécanique

- **Criticité très élevée (C ≥ 45) :** Courroie de distribution, Joint de culasse, Vilebrequin, Bloc moteur — leur défaillance entraîne une panne totale ou des dommages irréversibles.

- **Criticité élevée (20 ≤ C < 45) :** Arbre à cames, Culasse, Cylindres, Bielles, Coussinets — influencent directement la performance et la durée de vie du moteur.

- **Criticité modérée (18 ≤ C < 20) :** Soupapes, Segments, Culbuteurs, Pistons — soumis à l'usure normale, impactant progressivement l'efficacité.

- **Criticité faible (C = 10) :** Couronne de volant moteur — non critique à court terme, mais importante pour le démarrage.

➢ Le système de refroidissement

- **Criticité critique (C ≥ 20) :** Pompe à eau, Échangeur eau/huile, Voyant température — leur défaillance provoque des dommages rapides et graves.

- **Criticité majeure (10 ≤ C < 20) :** Thermostat, Échangeur d'eau, Flexibles, Vannes PCV — altèrent progressivement la régulation thermique.

- **Criticité modérée (C < 10) :** Indicateurs, pressostat, courroies — risques indirects dus à la détection tardive ou absente.

➢ Le système de lubrification

- **Criticité critique (C ≥ 20) :** Pompe à huile à engrenages, Indicateur de pression d'huile — garantissent la pression d'huile. Une défaillance peut provoquer un grippage moteur ou une panne grave.

- **Criticité majeure (10 ≤ C < 20) :** Radiateur d'huile, Filtre à huile, Flexibles, Refroidisseur, Carter, Voyant d'alarme, Filtre bypass — responsables de la filtration,

du refroidissement et de la circulation. Leurs défaillances entraînent fuites, surchauffes ou contamination.

- **Criticité modérée (C < 10) :** Indicateur delta P, Capteur de température d'huile — surveillent les paramètres du circuit. Une lecture erronée peut induire des diagnostics incorrects.

➢ **Le système d'injection**

- **Criticité critique (C ≥ 20) :** Pompe haute pression, Retour carburant, Flexibles carburant — tout défaut entraîne des pertes de puissance, des fuites inflammables ou des risques de surchauffe du circuit.

- **Criticité majeure (10 ≤ C < 20) :** Injecteurs, Filtre à carburant, Vanne manuelle — garants de la qualité de pulvérisation, de filtration et d'intervention rapide. Une défaillance provoque des ratés moteurs ou une combustion inefficace.

- **Criticité modérée (C < 10) :** Transmetteur de niveau de carburant — un signal erroné peut engendrer des arrêts imprévus ou des débordements.

➢ **Le système d'admission d'air**

- **Criticité critique (C ≥ 20) :** Turbocompresseur, Filtre à air, Intercooler — défaillance = baisse drastique de performance, fumées noires, combustion incomplète, surchauffe de l'air admis.

- **Criticité majeure (10 ≤ C < 20) :** Soupape d'aspiration, Durites d'admission, Vanne de fermeture — anomalies provoquent des fuites, déséquilibres d'admission, ou arrêts imprévus du moteur.

- **Criticité modérée (C < 10) :** Indicateur pression turbo — en cas de dérive, la régulation moteur devient inefficace, affectant la pression de suralimentation et le rendement.

- **Le système d'échappement**

  - **Criticité critique (C ≥ 20) :** Turbocompresseur, Soupape d'échappement — tout défaut majeur sur ces éléments peut conduire à des dommages irréversibles : surchauffe, perte de puissance, cognements internes, voire casse moteur.

  - **Criticité modérée (10 ≤ C < 20) :** Indicateur de température d'échappement (EGT) — un capteur défectueux fausse la lecture thermique et retarde l'intervention, exposant le système à une dégradation accélérée.

- **Le système de démarrage**

  - **Criticité Majeure (10≤C<20):** Démarreur électrique AC/DC,Accumulateurs,Démarreur hydraulique,Pompe manuelle ,Tank d'huile .Ces composants sont responsables de l'initiation directe ou indirecte du cycle moteur.

  - **Criticité Modérée (10 ≤ C < 20) :**Alternateur,Indicateur de pression,Contacteur 1804 .Ces éléments ne bloquent pas le démarrage directement, mais influencent sa fiabilité et le contacteur défectueux empêche le passage de courant vers le démarreur.

Recommandations générales :

a. Maintenance conditionnelle ,Lubrification optimale et Contrôle thermique rigoureux .

b. Capteurs intelligents pour détecter les anomalies thermiques,Liquide de refroidissement de qualité et purges régulières.

c. Surveillance prédictive ,Maintenance planifiée et Amélioration continue.

d. Contrôle qualité carburant et Analyser les sons d'injection pour anticiper la dégradation des injecteurs.

e. Mettre en place un plan périodique de nettoyage des conduits, soupapes et composants d'admission.

f. Surveillance thermique intelligente et Maintenance ciblée du turbocompresseur.

g. Intégrer un système de démarrage double (électrique et hydraulique).

5 Étude comparative entre AMDEC classique et AMDEC IA

5.1 Comparaison des résultats obtenus

La comparaison entre l'AMDEC classique et celle assistée par l'intelligence artificielle met en évidence des écarts notables en termes de précision, de cohérence et de rapidité d'exécution. L'AMDEC traditionnelle repose sur l'expertise des équipes humaines, leur permettant de mieux appréhender les réalités du terrain et de s'adapter aux conditions réelles d'exploitation, bien qu'elle puisse parfois être influencée par une certaine subjectivité. En revanche, l'AMDEC assistée par IA se distingue par une structuration rigoureuse et une évaluation systématique des défaillances, produisant des résultats cohérents grâce à l'automatisation du calcul des indices (D, G, F, C). Toutefois, l'IA présente des limites face aux contextes spécifiques ou non modélisés dans les données d'entrée, ce qui rend l'intervention humaine indispensable pour garantir la pertinence et la fiabilité des recommandations finales.

.

5.2 Points forts et limites de chaque approche

Tableau III.14 : Points forts et limites de chaque approche

Critère	AMDEC Classique	AMDEC assistée par IA
Précision contextuelle	Excellente, basée sur l'expérience métier	Bonne, dépendante de la qualité des données d'entrée
Objectivité des évaluations	Moyenne (influence subjective possible)	Élevée (basée sur des règles prédéfinies et constantes)
Rapidité de traitement	Faible à moyenne (temps de réunions et validations nécessaires)	Très élevée (traitement automatisé et instantané)
Capacité d'exhaustivité	Limitée (oubli possible de certains scénarios)	Élevée (analyse systématique de toutes les combinaisons possibles)
Adaptabilité au terrain	Très bonne (prise en compte de cas spécifiques)	Moyenne (besoin d'un ajustement humain selon le contexte réel)

5.3 Complémentarité entre l'expertise humaine et l'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle et l'expertise humaine sont complémentaires dans le processus AMDEC. L'IA améliore les phases préparatoires en automatisant l'analyse et la détection des défaillances, tandis que l'interprétation des résultats et la définition des actions correctives nécessitent le jugement des experts. Plus les apports des spécialistes humains sont riches et précis, plus les performances de l'IA s'en trouvent renforcées, augmentant ainsi la fiabilité des résultats et la pertinence des analyses. Par conséquent, une approche hybride alliant rigueur algorithmique et savoir-faire technique constitue la solution optimale pour une AMDEC efficace et fiable.



Figure III.6 : expertise humaine avec IA

Conclusion :

L'étude menée sur le site CPF IN AMINAS, appliquée à la pompe et au moteur diesel du réseau anti-incendie, démontre que la synergie entre l'expertise humaine et l'intelligence artificielle permet une analyse AMDEC plus précise, rapide et efficace.

L'expertise humaine apporte une compréhension terrain indispensable, tandis que l'IA permet une analyse systématique et rigoureuse des criticités. Leur combinaison garantit des résultats professionnels, améliorés, et adaptés aux exigences des environnements industriels critiques.

Ce modèle hybride représente une avancée majeure pour la maintenance préventive et la fiabilité des systèmes de sécurité dans le secteur pétrolier et gazier.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Le présent mémoire s'est donné pour objectif principal d'analyser la fiabilité des composants critiques du réseau de lutte contre l'incendie, à travers l'application de la méthode AMDEC, dans un environnement industriel sensible : le CPF d'In Amenas, exploité par Sonatrach en partenariat avec ENI et Equinor.

L'étude a été conduite selon une double approche :

i) Une première analyse a été réalisée manuellement, selon la méthode AMDEC classique, en mobilisant l'expertise humaine pour identifier les modes de défaillance des composants clés (pompes, moteurs, etc.), leurs effets, et évaluer leur criticité.

j) Une seconde analyse, complémentaire à la première, a été menée à l'aide d'un outil d'intelligence artificielle, dans le but de comparer la pertinence, la rapidité, la cohérence et la fiabilité des résultats générés par une technologie numérique de pointe face à une démarche manuelle traditionnelle.

Les résultats obtenus ont montré :

- Identification des zones critiques :

  L'analyse a permis de mettre en évidence plusieurs composants sensibles au sein du réseau incendie, notamment la pompe diesel et le moteur diesel. Ces équipements présentent des points de vulnérabilité qui pourraient compromettre la disponibilité du système de lutte contre l'incendie en cas de défaillance.

- Priorisation des actions correctives :

  Grâce à l'approche AMDEC, les défaillances les plus significatives ont pu être hiérarchisées en fonction de leur gravité et de leur fréquence d'apparition. Cette priorisation a conduit à la proposition d'actions ciblées visant à améliorer la fiabilité globale du système, telles que l'optimisation des plans de maintenance, le renforcement du suivi des signaux d'alerte, et la mise en œuvre de mesures préventives adaptées.

- Complémentarité de l'intelligence artificielle :

Conclusion Générale

L'intégration de l'outil d'intelligence artificielle (Mechanical Engineering Assistant) a permis d'automatiser et d'accélérer la génération des tableaux AMDEC. Les résultats produits par l'IA se sont révélés globalement cohérents avec ceux issus de l'analyse humaine, bien que certaines limitations aient été observées en matière de contextualisation technique.

- Vers une approche hybride :

L'étude a mis en évidence l'intérêt d'une approche combinée, alliant expertise humaine et outils numériques. Cette synergie ouvre la voie à une amélioration continue de la gestion des risques industriels, en renforçant à la fois la rapidité d'analyse et la précision des recommandations.

À l'avenir, il serait pertinent d'envisager :

- L'intégration de bases de données internes pour alimenter automatiquement les analyses AMDEC via des outils IA.

- Le développement de modèles hybrides combinant expertise humaine et intelligence artificielle dans une démarche participative.

- L'élargissement du champ d'étude à d'autres unités industrielles similaires pour valider la généricité du modèle proposé.

- L'association de l'AMDEC à d'autres méthodes quantitatives (SIL, LOPA, etc.) pour une évaluation plus complète des barrières de sécurité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

[1] ISO, Aspects Liés A La Sécurité: Principes Directeurs Pour Les Inclure Dans Les Normes. Organisation Internationale De Normalisation, 1999.

[2] Occupational Health And Safety Assessment Series 18001. This International Standard Provides A Framework For Occupational Health And Safety Management Systems, Aiming To Reduce Workplace Risks And Enhance Employee Safety.

[3] A. Villemeur. Sûreté De Fonctionnement Des Systems Industriels. Fiabilité - Facteurs Humains – Informatisation. Editions Eyrolles, 798 P.

[4] C. Lievens. Sécurité Des Systèmes. Cepadues Editions, Toulouse, France.

[5] Risk Management — Vocabulary — Guidelines For Use In Standards. This Guide Provides Generic Definitions Of Risk Management Terms To Promote A Coherent Approach To The Description Of Risk Management Activities And Terminology.

[6] S. Haugen, S. Jorunn, S. Sklet, J.E. Vinnem. Operational Risk Analysis– Total Analysis Of Physical And Non-Physical Barriers. Generalization Report Rev 01, 29.

[7] ISO/IEC 27005:2011, Technologies De L'information-Techniques De Sécurité -- Gestion Des Risques Liés A La Sécurité De L'information [Archive], Sur ISO, 1er Juin 2011 (Consulté Le 31 Décembre 2015).

[8]. Maintenance, Sûreté De Fonctionnement : Découverte. Éditions Universitaires.

[9] B. I, Outils De Quantification Des Modes De Défaillance Lors D'une Analyse De Risque, Institut National Des Sciences Appliquées De Strasbourg, 2007.

[10] K. J, L'amdec, École Des Études Commerciales : Centre D'étude En Qualité Totale, 1994.

[11] R. M, AMDEC – Moyen, Base Documentaire : Méthodes De Production Dans Le Thème : Conception Et Production Et Dans L'univers Génie Industriel, 1999.

[12] HERGON. E, CRESPEAU. H, ROUGER. Ph, Modes De Défaillance Du Processus Transfusionnel. Intérêt De L'analyse Prévisionnelle De Sureté De Fonctionnement, Paris: Institut National De La Transfusion Sanguine.

[13] G. Landy, AMDEC Guide Pratique.

[14] Fault Tree Analysis. In System Safety Conference, Vol.1 (Pp. 1–9). Orlando,...

[15] Modélisation Et Evaluation De La Fiabilité Des Systèmes Mécatroniques: Application Sur Système Embarqué. Université d'Angers.

[16] Méthode d'Evaluation Des Risques Agrégés: Application Au Choix Des Investissements De Renouvellement D'installations.

[17] The Bowtie Method: A Review. Safety Science, 88, 211–218. Https://Doi.Org/10.1016/J.Ssci.2016.03.001

[18] The Application Of Bow-Tie Method In Hydrogen Sulfide Risk Management Using Layer Of Protection Analysis (LOPA). Journal Of Failure Analysis And Prevention, 17(2), 291–303. Https://Doi.Org/10.1007/S11668-017-0247-X

[19] Évaluation Des Risques Liés Au Rejet D'hydrocarbures Dans L'air. International Journal Of Human Settlements.

[20] Norme IEC 61882. Hazard And Operability Studies (HAZOP Studies) - Application Guide. International Electrotechnical Commission (IEC). Edition 2.0 2016-03.

[21]. Outils D'analyse Des Risques Générés Par Une Installation Industrielle. Mai 2003

[22]. Études De Danger Et D'exploitabilité (Études HAZOP) – Guide D'application. 2001

[23] INERIS DRA-007, Eléments Importants Pour La Sécurité (EIPS), Rapport Ω6, 2003.

[24] M. Bousserouel Et S. Benkaddour, «Application De La Méthode AMDEC Afin D'établir Un Plan De Maintenance Dédié A Un Système De Production: Cas Système MPS500 Du Laboratoire MELT», Département De Génie Électrique Et Électronique, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, P. 5, 2019.

[25] M. Bourareche, «Évaluation Des Performances Des Barrières De Sécurité Dans Un Environnement De Connaissances Imparfaites», Institut d'Hygiène & Sécurité, Université De Batna 2, Thèse De Doctorat, P. 8, 2021.

[26] A. B. Chaat, «Évaluation Des Risques Par La Conversion De Nœud Papillon En Réseau Bayésien Sur Four Reboilleur», Université Amar Telidji - Laghouat, Faculté De Technologie, Département De Génie Des Procédés, Mémoire De Master, 2024.

[27] Enseigner Et Apprendre A L'ère De L'intelligence Artificielle. Dans M. Rondeau & L. Heiser (Dir.), Préserver L'agentivité Des Enseignants Et Des Elèves : Des Pistes Issues D'une Recension Des Ecrits. Livre Blanc, Canopé.Lien : Https://Cnam.Hal.Science/CDFT-CNAM/Hal-04013223v2

[28]The AI Assessment Scale (AIAS): A Framework For Ethical Integration Of Generative AI In Educational Assessment. Arxiv. Https://Arxiv.Org/Abs/2312.07086

Références bibliographiques

[29]Conseil Supérieur De L'éducation Et Commission De L'éthique En Science Et En Technologie (2024). Intelligence Artificielle Générative En Enseignement Supérieur : Enjeux Pédagogiques Et Ethiques. Québec, Le Conseil; La Commission.

[30] A Systematic Review Of Chatgpt Use In K-12 Education. European Journal Of Education, Research, Development And Policy. Https://Doi.Org/10.1111/Ejed.12599

[31] La Digitalisation De L'enseignement-Apprentissage Des Langues Etrangères Entre Ethique Et Esthétique : Cas Du FLE. Laboratoire De Recherche Société Langage, Art Et Médias, 7(7).

[32] B. MAZARI, « Augmentation Du Rendement Des Pompes D'huiles Suivant La Recommandation Constructeur Sulzer », Projet Professionnel De Fin De Stage MSP, Formation Avant Recrutement, Institut Algérien Du Pétrole, 2017.

[33] Rapport De L'étude De Dangers (EDD) CPF d'In Amenas, Mars 2021.

[34] N. Dridi, «Lutte Contre L'incendie – Formation Equipier Incendie», IAP – École De Hassi Messaoud, Département HSE, Sonatrach, Janvier 2016.

[35] Université De Montpellier, «Sécurité Incendie – Guide Pédagogique», Université De Montpellier, S.D, Mai 2020.

[36] CNPP Entreprise – Système De Sécurité Incendie Et Détection D'incendie, Édition Mai 2004.

[37] Muriel Huet – Traité Pratique De Sécurité Incendie, 2003.

[38] NFPA 11 – Norme Relative Aux Systèmes D'extinction Par Mousse.

[39] NFPA 13 – Norme Sur L'installation Des Systèmes De Sprinklers.

[40] NFPA 15 – Norme Concernant Les Systèmes D'arrosage A Eau.

[41] NFPA 25 – Norme Sur Les Systèmes De Protection Contre L'incendie A Base D'eau.

[42] APSAD R1 – Règle Relative Aux Systèmes D'extinction Automatique A Eau De Type Sprinkler.

[43] APSAD R5 – Règle D'installation Des Robinets D'incendie Armés Et Postes D'incendie Additives, Janvier 2012.

[44] APSAD R6 – Maîtrise Du Risque Incendie, Règles D'organisation Et Système De Management.

[45] APSAD R7 – Détection Automatique D'incendie, Règle D'installation.Bibliographie

Références bibliographiques

[46] APSAD R12 – Extinction Automatique A Mousse A Haut Foisonnement, Edition Du 1er Février 2006.

[47] APSAD R13 – Règle D'installation Des Systèmes D'extinction Automatique A Gaz, Juin 2010.

[48] Journal Officiel N°21 – Publication Du 12 Mars 1976.

[49] Journal Officiel N°84 – Publication Du 29 Décembre 2004.

[50] JORADP – Site Officiel Du Journal Officiel De La République Algérienne Démocratique Et Populaire. Disponible Sur : Www.Joradp.Dz.

[51] IN AMENAS, ALGERIA FIRE PROTECTION REVIEW OF CENTRAL PROCESSING FACILITY (CPF) 7th – 17th December 2009.

[52] Etude De Danger (EDD) - In Amenas - Révision: 2, Octobre 2011 Préparé Par: Maggie Zh.

ANNEXES

Annexes

Annexe : Questionnaire

Questionnaire d'Évaluation de la Criticité des Composants du Réseau Anti-Incendie

1. Informations Générales

Site : CPF – In Amenas

Contexte : Dans le cadre de l'amélioration continue du réseau de lutte contre l'incendie du site CPF – In Amenas, ce questionnaire vise à recueillir l'expérience des experts, ingénieurs et techniciens en maintenance.

Les réponses permettront :

- D'identifier les équipements critiques.
- De prioriser les interventions de maintenance préventive.
- D'optimiser les plans de fiabilisation et de sécurisation.

2. Consignes de Réponse

- Veuillez évaluer **chaque composant** selon son niveau de criticité basé sur votre expérience de terrain.
- Utilisez **l'échelle de criticité** ci-dessous.
- Merci d'ajouter, si possible, des **commentaires** pour expliquer votre évaluation.

Période de référence : 2014 – 2024 (10 ans d'observation continue).

3. Échelle de Criticité

Niveau	Criticité	Signification
1	Très Faible	Rares pannes, impact négligeable.
2	Faible	Quelques pannes sans impact majeur.
3	Moyenne	Pannes occasionnelles, impact modéré.
4	Élevée	Pannes fréquentes ou fortes conséquences.
5	Très Élevée / Critique	Défaillance critique, impact direct sur la sécurité.

4. Tableau d'Évaluation des Composants

Composant	Criticité (1 à 5)	Commentaires / Observations
Réservoir d'eau (bac)		
Pompe jockey		
Pompe électrique		
Pompe diesel		
Vanne de contrôle		
Réseau de tuyauterie		
Lances monitors fixes		
Poteaux incendie		
Système déluge		
Système à mousse		
Armoire d'incendie (AI)		
Système rideaux d'eau		
RIA (Robinets Incendie Armés)		
Extincteurs portatifs		
Détecteurs de fumée / chaleur		
Système d'alarme incendie (sirènes / voyants)		
Groupe électrogène d'urgence		
Système SCADA incendie (télégestion)		

Signature du Répondant :

Nom et Prénom : _____
Fonction : _____
Date : _____