

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude
En vue d'obtention du diplôme de master académique en génie mécanique
Option fabrication mécanique et productique

Thème:

**Application de la méthode AMDEC sur un
compresseur d'air à vis**

Présenté par : Hichem OULD AMER

Devant le Jury:

M. M. EZZRAIMI	Maitre de conférence B	USDB	Président
M. M. ABADA	Maitre Assistant A	USDB	Rapporteur
M. N.D. MESSAOUD	Maitre Assistant A	USDB	Examinateur

Année universitaire :
2024/2025

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie chaleureusement M. KETFI, M. OUALI, M. MAGRAOUI ET M. MADANI, pour leur disponibilité, conseils avisés et leur soutien constant.

Je remercie également les professeurs du département génie mécanique, le personnel administratif, pour leurs encouragements, leurs disponibilités.

Enfin, je souhaite remercier ma famille et mes amis pour leur patience, leur compréhension et leur soutien indéfectible durant cette période intense de travail.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes parents, à ma femme, à mes frères et sœurs, et à mes enfants, pour leur amour, leur soutien inconditionnel et les sacrifices qu'ils ont consentis pour me permettre de poursuivre mes études. Leur exemple de travail et de persévérance a été une source d'inspiration constante.

Résumé

Ce mémoire explore l'application de la méthode AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) sur un compresseur d'air à vis, un équipement crucial au sein du site UPSIDE NORD de SONATRACH. L'étude se concentre sur l'amélioration de la fiabilité et de la performance de ces compresseurs, en mettant en lumière les enjeux de maintenance et les méthodes systématiques d'analyse des défaillances.

L'analyse des pratiques de maintenance et l'utilisation d'outils tels que les diagrammes d'Ishikawa, les 5 Pourquoi, et l'AMDEC permettent d'identifier les causes profondes des défaillances et de proposer des actions correctives ciblées. Les résultats mettent en évidence une réduction des arrêts non planifiés, une meilleure durée de vie des composants, une diminution des coûts de maintenance, et une sécurité accrue.

Ce mémoire souligne l'impact économique et environnemental positif de ces améliorations et plaide pour une maintenance proactive, essentielle à la pérennité des infrastructures industrielles. Il ouvre la voie à de futures recherches en maintenance industrielle, en fournissant des outils pratiques pour optimiser la maintenance et la performance des équipements cruciaux dans l'industrie.

Sommaire

Introduction générale 1

Chapitre I: Enjeux et défis de la maintenance industrielle

I.1 Impacts financiers et opérationnels des arrêts non planifiés 3

I.2 Complexité croissante des systèmes et obsolescence 3

I.2.1 Intégration multi-technologique 3

I.2.2 Gestion de l'obsolescence 4

I.3 Contraintes organisationnelles et humaines 4

I.3.1 Processus fragmentés 4

I.3.2 Gestion des compétences 5

I.4 Sécurité, qualité et impact environnemental 5

I.4.1 Sécurité du personnel 5

I.4.2 Conformité réglementaire 6

I.4.3 Impact environnemental 6

I.5 Pressions économiques et leviers de performance 6

I.5.1 Réduction du coût total de possession (TCO) 6

I.5.2 Concurrence et marges 7

I.6 Vers une maintenance fondée sur la connaissance des risques 7

Chapitre II: Description du compresseur d'air à vis

II.1 Introduction 8

II.2 Principe de fonctionnement du compresseur à vis 8

II.3 Analyse fonctionnelle 9

II.4 Classification des compresseurs à vis 10

II.5 Description technique de l'élément de compression 11

II.5.1 Structure mécanique 11

II.5.2 Profil asymétrique des rotors 12

II.6 Paramètres de fonctionnement 12

II.7 Découpage technique du compresseur 12

Sommaire

II.8 Conclusion	13
-----------------------	----

Chapitre III: Système de maintenance et Analyse des pannes

III.1 Généralités sur la maintenance	14
III.1.1. Historique de la maintenance	14
III.1.2. Typologies de Maintenance	14
III.1.2.1. Maintenance Corrective	14
III.1.2.2. Maintenance Préventive	15
III.1.2.3. Maintenance Conditionnelle et Prédictive	15
III.1.2.4. Maintenance Proactive	15
III.1.3. Indicateurs Clés de Performance en Maintenance (KPI)	15
III.1.3.1. MTBF (Mean Time Between Failures)	16
III.1.3.2. MTTR (Mean Time To Repair)	16
III.1.3.3. Taux de disponibilité et taux de panne	17
III.1.3.4. Importance et utilisation des KPI	17
III.2. Analyse des pannes et des causes profondes	18
III.2.1. Principes Fondamentaux de l'Analyse des Pannes	18
III.2.1.1. Collecte de Données	18
III.2.1.2. Analyse des Données	18
III.2.1.3. Identification des Causes Profondes	19
III.2.2. Outils et Techniques d'Analyse des Causes Profondes	19
III.2.2.1. Diagramme d'Ishikawa	19
III.2.2.2. Analyse des 5 Pourquoi	21
III.2.2.3. AMDEC	21
III.2.2.3.1. Étapes de la Méthode AMDEC	21
III.2.3. Transition vers les Stratégies de Maintenance Proactive	22
III.3. La GMAO	23
III.3.1. Définition	23
III.3.2. Pourquoi utiliser une GMAO ?	23
III.3.3. Comment la GMAO améliore la gestion des équipements et des interventions ?	23
III.3.4. Avantages spécifiques de la GMAO dans l'industrie pétrolière	24
III.3.5. Des exemples concrets	24
III.3.6. Les fonctionnalités clés d'une GMAO	25
III.4. Conclusion	26

Sommaire

Chapitre IV : Étude de Cas - Application de la Méthode AMDEC sur un Compresseur d'Air à Vis

IV.1 Introduction	27
IV.3 Historique des pannes	30
IV.4 Approche AMDEC approfondie et intégration des données historiques	32
IV.4.1 Principaux paramètres de l'AMDEC	33
IV.4.2 Limites de la Méthode AMDEC	34
IV.4.2.1. Subjectivité des évaluations	34
IV.4.2.2. Complexité dans les systèmes étendus	34
IV.4.2.3. Actualisation des données et évolutivité	34
IV.4.2.4. Modélisation des interactions complexes	35
IV.4.2.5. Dépendance à la qualité des données historiques	35
IV.4.2.6. Intégration avec les technologies modernes	35
IV.4.2.7. Difficulté de priorisation absolue	35
IV.4.2 Intégration des données historiques : méthode ABC	36
IV.4.3 Hiérarchisation des défaillances et analyse croisée (RPN × ABC)	36
IV.4.4 Tableau AMDEC avec intégration des données historiques	36
IV.4.4.1 Analyse détaillée des principaux modes de défaillance	38
a) Exemple 1 : Lubrification Insuffisante Entraînant une Défaillance Roulements élément HP	38
a).1 Données Historiques	38
a).2 Analyse des Causes Profondes	39
a).3 Actions Correctives Entreprises	40
a).4 Efficacité des Actions Correctives	40
a).5 Impact du Coût ABC	40
a).6 Ratio Coût-Bénéfice	41
a).7 Analyse de Weibull appliquée aux défaillances des roulements HP	42
a).7.1 Données utilisées	42
a).7.2 Méthodologie de l'analyse de Weibull	42
a).7.3 Étapes de calcul détaillées	43
a).7.4 Résultats obtenus et interprétation	44
a).7.5 Exploitation des résultats pour la maintenance	45
a).7.6 Avantages de l'analyse de Weibull	45
b) Exemple 2 : Vibrations Excessives	46
b).1 Données Historiques	46

Sommaire

b).2 Analyse des Causes Profondes	47
b).3 Actions Correctives Entreprises	48
b).4 Évaluation de l'Efficacité des Actions Correctives	48
b).5 Analyse du Coût ABC (Activity-Based Costing)	49
b).6 Analyse Coût-Bénéfice	49
b).7 Analyse de Fiabilité par la Loi de Weibull	50
b).7.1 Données utilisées	50
b).7.2 Tri des données et calcul des $F_i(t)$	51
b).7.3 Linéarisation de la loi de Weibull	51
b).7.4 Droite de Weibull	52
b).7.5 Interprétation des Paramètres Weibull	53
b).7.6 Fonction de Fiabilité	53
b).7.7 Taux de Défaillance Instantané	53
b).7.8 Conclusion de l'analyse Weibull	54
IV.4.4.2 Priorisation des Actions Correctives Basée sur le RPN et le Ratio Coût-Bénéfice ..	54
IV.4.4.2.1 Méthodologie de Combinaison des Critères pour la Priorisation	55
IV.4.4.2.2 Exemples Concrets d'Application de la Matrice de Priorisation aux Actions Correctives du Compresseur ZT250 EX	55
IV.4.4.3 Actions correctives et mise en œuvre	57
IV.4.4.3.1 Calendrier de Mise en Œuvre	57
IV.4.4.3.2 Allocation des Ressources	57
IV.4.4.3.3 Suivi et Évaluation	58
IV.4.4.3.3.1 Indicateurs de Performance	58
IV.4.4.3.3.2 Tableau de Bord de Suivi	59
IV.4.4.3.3.3 Amélioration Continue	59
IV.4.4.3.3.3.1 Révisions et Ajustements	59
IV.4.4.3.3.3.2 Formation et Sensibilisation	60
IV.3.4.7 Surveillance et examen	60
IV.4.4.4 Méthodes de Surveillance	61
IV.4.4.4.1 Surveillance des Indicateurs de Performance	61
IV.4.4.4.2 Audits et Inspections	61
IV.4.4.4.3 Examen et Amélioration	62
IV.4.4.4.3.1 Réunions de Revue	62
IV.4.4.4.3.2 Mise à Jour de l'AMDEC	62
IV.5. Conclusion et Recommandations	63

Sommaire

IV.5.1 Recommandations	63
IV.5.1.1 Recommandations pour la Maintenance	63
IV.5.1.2 Recommandations pour la Formation.....	64
IV.5.1.3 Recommandations pour la Recherche Future	65
IV.6 Conclusion	66
Conclusion générale	67

Liste des figures

Figure II.1 : vue d'ensemble du moto-compresseur d'air à vis	8
Figure II.2 : schéma de principe du fonctionnement d'un compresseur à vis	9
Figure II.3 : Analyse fonctionnelle du compresseur d'air	10
Figure II.4 : coupe de l'élément de compression à vis	11
Figure II.5 : représentation du découpage technique	13
Figure III.1. : diagramme d'Ishikawa	19
Figure III.2. : exemple de diagramme d'Ishikawa	20
Figure IV.1 : Démarche AMDEC	32
Figure IV.2 : Diagramme ISHIKAWA (cause à effets)	39
Figure IV.3 : Graphique illustrant le ratio coût-bénéfice des actions correctives proposées ..	41
Figure IV.4 : droite de Weibull pour roulement élément HP	46
Figure IV.5 : Diagramme d'Ishikawa des causes profondes des vibrations excessives	48
Figure IV.6 : Graphique illustrant le ratio Coût-Bénéfice	50
Figure IV.7 : Droite de Weibull	52

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Différents modèles compresseur d'air GA, ZT et ZR	10
Tableau II.2 : paramètres de fonctionnement du compresseur d'air	12
Figure III.2. : exemple de diagramme d'Ishikawa	20
Tableau IV.1 : Tableau référence criticité	29
Tableau IV.2 : Criticité du compresseur d'air dans l'unité UPSIDE NORD	30
Tableau IV.3 : Historique despannes	31
Tableau IV.4 : Analyse AMDEC pour le compresseur d'air	37
Tableau IV.5 : Historique des défaillances dû aux roulements HP	38
Tableau IV.6 : Évolution des KPI après mise en œuvre des actions correctives	40
Figure IV.3 : Graphique illustrant le ratio coût-bénéfice des actions correctives proposées ..	41
Tableau IV.7 : les données utilisées	42
Tableau IV.8 : calcul des probabilités cumulées	43
Tableau IV.9 : interprétation des résultats	44
Tableau IV.10 : Historique des incidents liés aux vibrations	47
Tableau IV.11 : Évolution des KPI avant et après les actions correctives	48
Tableau IV.12 : temps de fonctionnement	51
Tableau IV.13 : calcul des $F_i(t)$	51
Tableau IV.14 : linéarisation de la loi de Weibull	52
Tableau IV.15 : Interprétation des Paramètres Weibull	53
Tableau IV.16 : Fonction de fiabilité	53
Tableau IV.17 : Taux de défaillance instantané	54
Tableau IV.18 : Classement des actions correctives en fonction de leur RPN et de leur ratio coût-bénéfice	56
Tableau IV.19 : calendrier de mise en œuvre pour les actions correctives prioritaires	57
Tableau IV.20 : Exemple d'allocation des ressources	58
Tableau IV.21 : Les indicateurs de performance pour chaque action corrective	58
Tableau IV.22 : Exemple de tableau de bord de suivi pour les actions correctives	59
Tableau IV.23 : Exemple de programme de formation	60
Tableau IV.24 : Les indicateurs de performance pour chaque action corrective	61
Tableau IV.25 : Exemple de plan d'audit et d'inspection	62
Tableau IV.26 : Exemple de plan de réunion de revue	62
Tableau IV.27 : Tableau détaillant les recommandations pour la maintenance	64
Tableau IV.28 : Tableau détaillant les recommandations pour la formation	65
Tableau IV.29 : Tableau détaillant les recommandations pour la recherche future	65

Introduction générale

Introduction générale

Dans le paysage industriel moderne, la fiabilité des équipements est un enjeu stratégique majeur, en particulier dans les secteurs pétroliers et gaziers. Les compresseurs d'air, et plus particulièrement les compresseurs à vis, jouent un rôle central dans de nombreux processus industriels. Leur défaillance peut entraîner des arrêts de production coûteux, des retards dans les livraisons et des pertes financières significatives, sans compter les impacts potentiels sur la sécurité des opérateurs et l'environnement.

Ce mémoire de fin d'étude s'inscrit dans cette problématique en se concentrant sur l'application de la méthode AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) sur un compresseur d'air à vis, équipement crucial au sein du centre de séparation et de compression CSC. L'objectif principal de cette étude est d'améliorer la fiabilité et la performance de ces compresseurs en mettant en lumière les enjeux de maintenance et les méthodes systématiques d'analyse des défaillances.

Les objectifs spécifiques de cette étude sont les suivants :

- Identifier les modes de défaillance critiques du compresseur d'air à vis ;
- Analyser les causes profondes de ces défaillances en s'appuyant sur des données réelles provenant du site UPSIDE NORD;
- Appliquer la méthode AMDEC pour proposer des actions correctives et préventives ciblées ;
- Évaluer l'impact de ces actions sur les indicateurs de performance pertinents (par exemple, MTBF, MTTR, taux de disponibilité) ;
- Proposer des recommandations pour une maintenance proactive et durable, adaptées au contexte spécifique du site UPSIDE NORD.

Introduction générale

Ce travail est structuré en quatre chapitres :

- **Chapitre I :** Enjeux et défis de la maintenance industrielle
- **Chapitre II :** Description détaillée du compresseur d'air à vis
- **Chapitre III :** Systèmes de maintenance et analyse des pannes
- **Chapitre IV :** Étude de cas : Application de la méthode AMDEC sur le compresseur d'air à vis

Ce mémoire vise à contribuer à la compréhension des enjeux de la maintenance industrielle et à mettre en lumière les méthodes systématiques d'analyse des défaillances, avec un focus particulier sur l'application de la méthode AMDEC dans le contexte spécifique du site UPSIDE NORD. Nous espérons que cette étude fournira des outils pratiques pour optimiser la fiabilité et la performance des équipements industriels, en particulier les compresseurs d'air à vis, et ainsi améliorer la compétitivité et la durabilité des entreprises industrielles.

Chapitre I :

Enjeux et défis de la

maintenance

industrielle

La maintenance industrielle occupe une place déterminante dans la stratégie globale des entreprises, notamment dans les secteurs à forte intensité technologique. Elle ne se limite plus à une simple action corrective, mais s'inscrit désormais dans une logique proactive visant à optimiser la performance des installations. Cette approche, fondée sur l'anticipation des défaillances et la maîtrise des coûts, conditionne la compétitivité et la pérennité des organisations. Le présent chapitre s'intéresse aux conséquences des arrêts non planifiés, en analysant leurs impacts à la fois économiques, opérationnels et structurels.

I.1 Impacts financiers et opérationnels des arrêts non planifiés

Dans les industries à forte intensité capitalistique (pétrochimie, sidérurgie, agroalimentaire), chaque heure d'arrêt non planifié peut engendrer des pertes comprises entre 10 000 et 100 000 \$ selon les secteurs et la taille de l'installation. Ces coûts se répartissent en :

- Coûts directs : réparation d'urgence, intervention de techniciens 24/7, pièces de rechange commandées en express.
- Coûts indirects : perte de production (engrais, carburant, composants électroniques...), pénalités contractuelles, réputation entachée vis-à-vis des clients.
- Effets en cascade : surcharges des lignes de production adjacentes, arbitrages de priorités, rééchelonnement des plannings logistiques.

Exemple : lors d'un arrêt brutal d'une unité de distillation pétrochimique, la société **Total-Energies** a estimé une perte de 75 000 €/h de chiffre d'affaires et 20 000 €/h de coûts annexes (chauffage, énergie auxiliaire, relance de four). Sur cinq heures d'interruption, le manque à gagner a dépassé 500 000 €. [1]

Constat clé

La réactivité en cas de panne, même bien organisée, ne compense pas les conséquences financières et opérationnelles des arrêts imprévus.

I.2 Complexité croissante des systèmes et obsolescence

I.2.1 Intégration multi-technologique

Les équipements modernes ne sont plus de simples ensembles mécaniques :

- Systèmes électromécaniques : moteurs à vitesse variable, entraînements par variateurs, contrôle de couple.
- Systèmes hydrauliques et pneumatiques : servo-vannes, accumulateurs, circuits à haute pression.
- Automates programmables (PLC), SCADA, IoT : capteurs intelligents offrant des flux de données en temps réel.

La maintenance doit désormais maîtriser les interactions entre ces couches : un dysfonctionnement d'un capteur peut masquer une usure mécanique, une dérive de process peut être liée à un automaton.

I.2.2 Gestion de l'obsolescence

Sur un parc de machines âgées de 20 à 30 ans, jusqu'à 35 % des composants (cartes électroniques, pompes, sondes de mesure, power arm, ...etc) sont obsolètes ou hors catalogues. Les conséquences :

- Délai d'approvisionnement de plusieurs mois.
- Recours à la rétro-ingénierie ou fabrication de pièces sur mesure.
- Dépendance à un petit nombre de fournisseurs spécialisés.

Chez l'entreprise **EDF**, l'indisponibilité d'un module de commande a entraîné 120 jours de stand-by complet, faute de pièce d'origine. Le recours au rétro-design a permis de reprendre l'activité, mais au prix d'un investissement de 150 000 € et d'une mobilisation d'ingénieurs R&D pendant 4 mois. [2]

I.3 Contraintes organisationnelles et humaines

I.3.1 Processus fragmentés

Dans de nombreuses usines :

- Demandes d'intervention mal formalisées (post-it, mails dispersés),

- Priorisation floue (urgence déclarée sans critère objectif),
- Backlog (arriéré) de demandes croissant sans moyen de suivi rigoureux.

En conséquence, les techniciens passent 30 % de leur temps à rechercher les informations nécessaires plutôt qu'à intervenir sur les machines.

I.3.2 Gestion des compétences

Le profil « mécanicien-automaticien-hydraulicien » devient rare ; l'écart entre la formation initiale et les technologies en cours d'exploitation se creuse. Le vieillissement des opérateurs seniors s'accompagne d'un turnover des jeunes techniciens peu attirés par des installations « héritage ». (legacy installation en anglais).

Pyramide des âges

- Moins de 35 ans : 20 % de l'effective maintenance
- 35–50 ans : 40 % de l'effective maintenance
- Plus de 50 ans : 40 % de l'effective maintenance

Sans politique proactive de formation et de transmission, le risque de déficit de savoir-faire technique devient systémique.

I.4 Sécurité, qualité et impact environnemental

I.4.1 Sécurité du personnel

Selon l'Agence Européenne pour la Sécurité et la Santé au Travail, 15 % des accidents graves en industrie sont liés à un défaut d'entretien (fuites, ruptures sous pression, mauvais verrouillage de carters). Un compresseur mal graissé peut générer une surchauffe, provoquer la rupture d'un joint et entraîner une explosion de vapeur d'huile.

I.4.2 Conformité réglementaire

Normes et directives imposent :

- Périodicité minimale des inspections (ATEX, ISO 55001),
- Traçabilité intégrale des opérations de maintenance,
- Audits externes avec pénalités en cas de non-conformité.

La sanction peut aller jusqu'à l'arrêt administratif de site.

I.4.3 Impact environnemental

- Fuites d'huile et de fluides frigorigènes : sols pollués, besoin de dépollution coûteuse.
- Surconsommation énergétique : machines mal réglées consomment 5 à 15 % d'énergie en plus.

Une grande plateforme gazière a réduit de 12 % sa facture énergétique annuelle (500 000 €) après un plan de remise à niveau des pompes et ventilateurs basé sur un audit énergétique. [3]

I.5 Pressions économiques et leviers de performance

I.5.1 Réduction du coût total de possession (TCO)

Le TCO (Total Cost of Ownership) d'une installation englobe :

1. Coûts d'acquisition et d'installation,
2. Coûts opérationnels (énergie, consommables),
3. Coûts de maintenance (interventions préventives, correctives, pièces de rechange),
4. Coûts de financement (immobilisation du capital).

Une maintenance « au plus juste » peut réduire de 20 à 30 % les coûts de maintenance, tout en prolongeant la durée de vie utile des actifs de 15 à 25 %.

I.5.2 Concurrence et marges

Dans un contexte de concurrence renforcée, chaque point de pourcentage de marge compte. Les décisions de maintenance font désormais l'objet de calculs détaillés de retour sur investissement : remplacer un module usé doit générer un gain en disponibilité justifiant son coût en moins de six mois.

I.6 Vers une maintenance fondée sur la connaissance des risques

Face à ces défis – arrêts coûteux, complexité technologique, obsolescence, contraintes humaines, réglementaires et budgétaires – la maintenance doit évoluer vers une approche structurée et systématique de la gestion des risques. Cette démarche repose sur :

1. Cartographie des équipements et de leur criticité : identifier les actifs dont la panne aurait l'impact le plus lourd.
2. Analyse des conséquences : chiffrer les coûts directs/indirects, mesurer l'impact sur la sécurité et l'environnement.
3. Hiérarchisation des priorités : allouer les ressources là où le rapport « effort investi / risque évité » est maximal.
4. Surveillance continue : collecter des indicateurs clés (température, vibration, débits) pour détecter les dérives avant panne.
5. Amélioration continue : boucles de retour d'expérience garantissant la mise à jour régulière des plans de maintenance.

Cette transition impose un pilotage renforcé, l'intégration d'outils de suivi et la formation des équipes à la culture des risques. C'est dans ce cadre que la méthode AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) prend tout son sens : elle constitue la pierre angulaire d'une maintenance proactive, orientée risques et résultats mesurables.

C'est dans cette optique de maintenance préventive ciblée que nous proposons d'illustrer concrètement la démarche grâce à une étude de cas réelle. Nous nous focaliserons sur un compresseur d'air à vis – équipement clé des installations industrielles – en analysant ses spécificités techniques, son principe de fonctionnement et les contraintes d'exploitation qui lui sont associées. Cette étude permettra non seulement de concrétiser la méthodologie AMDEC à travers un exemple tangible, mais aussi de démontrer l'importance d'une analyse approfondie des équipements pour une gestion optimale des risques.

Chapitre II:

Description du

compresseur d'air à

vis

II.1 Introduction

L'air comprimé est une source d'énergie essentielle dans de nombreuses industries, notamment dans les domaines pétrolier, chimique, pharmaceutique et agroalimentaire. Le compresseur d'air à vis représente aujourd'hui une solution de compression largement répandue grâce à sa fiabilité, son efficacité énergétique, son faible besoin en maintenance et sa capacité à produire un débit continu. Ce chapitre a pour objectif de présenter en détail le fonctionnement, la structure et les caractéristiques techniques d'un compresseur à vis, en prenant comme référence le modèle de la gamme Atlas Copco GA/ZT/ZR, utilisé dans l'industrie.

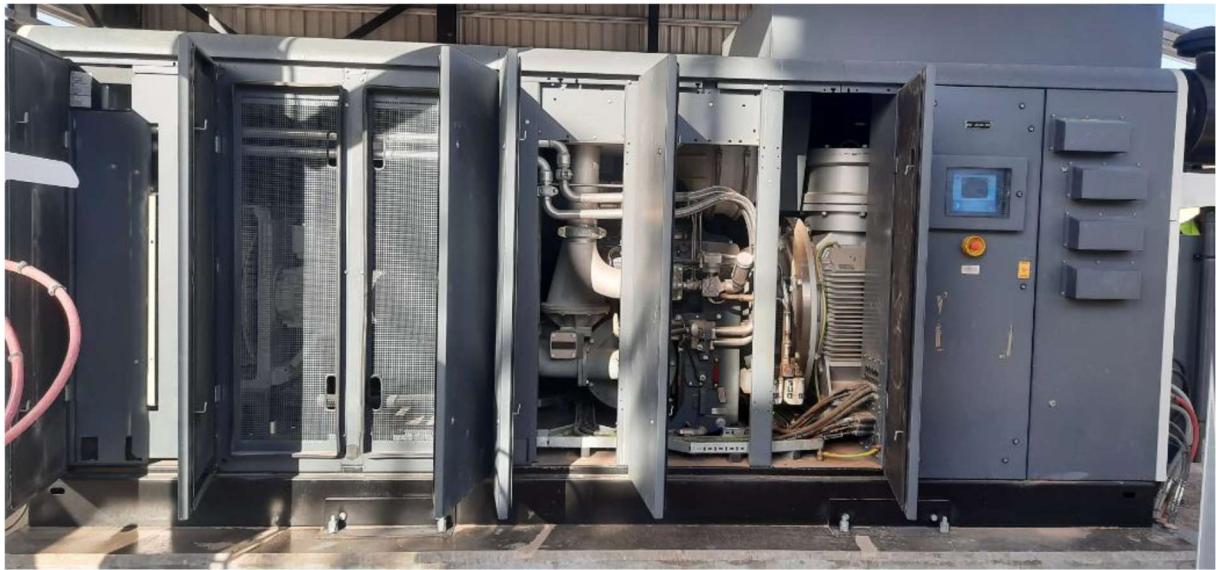


Figure II.1 : vue d'ensemble du moto-compresseur d'air à vis

II.2 Principe de fonctionnement du compresseur à vis

Le compresseur à vis est un compresseur à déplacement positif qui fonctionne en réduisant le volume d'un gaz afin d'en augmenter la pression. Le compresseur à vis étudié ici comporte deux étages de compression : un étage basse pression (BP) et un étage haute pression (HP). Voici le détail du processus de compression :

Aspiration de l'air ambiant : L'air ambiant est d'abord aspiré par l'élément BP en passant par des filtres et un pré-filtre d'air. Ces filtres permettent de purifier l'air en éliminant les impuretés et les particules avant qu'il n'entre dans le système de compression.

Compression dans l'élément BP : L'air filtré entre dans la chambre de compression de l'étage BP. À l'intérieur de cette chambre, deux rotors hélicoïdaux (un rotor mâle et un rotor femelle) tournent en sens inverse. L'air est piégé dans les compartiments formés entre les lobes des

rotors. À mesure que les rotors tournent, le volume de ces compartiments est progressivement réduit, ce qui augmente la pression de l'air.

Refroidissement de l'air comprimé : Après avoir été comprimé dans l'étage BP, l'air est dirigé vers un radiateur où il est refroidi. Ce refroidissement est essentiel pour réduire la température de l'air avant qu'il n'entre dans l'étage HP, ce qui améliore l'efficacité de la compression et protège les composants du compresseur.

Compression dans l'élément HP : L'air refroidi est ensuite aspiré dans l'étage haute pression (HP). Dans cet étage, le processus de compression est répété. L'air est à nouveau piégé dans les compartiments entre les lobes des rotors et subit une réduction de volume, ce qui augmente encore sa pression.

Refroidissement final et expulsion : Après avoir été comprimé dans l'étage HP, l'air est une fois de plus refroidi dans un radiateur avant d'être expulsé vers le circuit extérieur. Ce refroidissement final assure que l'air comprimé est à une température appropriée pour son utilisation dans les applications industrielles.

Transport vers le circuit extérieur : L'air comprimé et refroidi est finalement transporté vers le circuit extérieur où il peut être utilisé pour diverses applications. Des clapets de non-retour et des systèmes de régulation assurent que l'air comprimé est distribué de manière efficace et sûre.

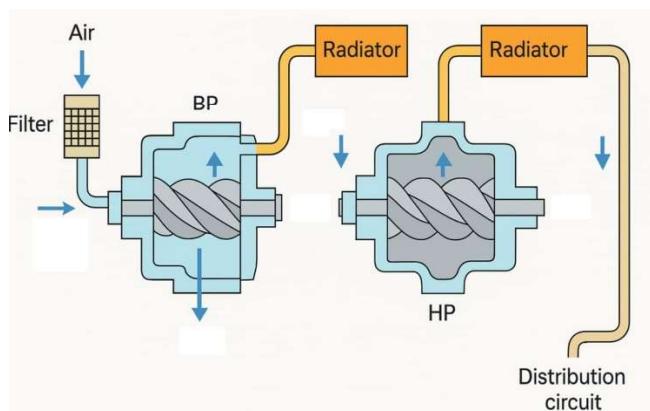


Figure II.2 : schéma de principe du fonctionnement d'un compresseur à vis.

II.3 Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle d'un compresseur à vis repose sur la chaîne d'énergie suivante :

- **Énergie d'entrée :** Fournie généralement par un moteur électrique (ou diesel).

- **Énergie mécanique** : Transmise aux rotors via un système d'engrenage ou courroie.
- **Énergie de compression** : Obtenue par réduction de volume dans la chambre de compression.
- **Énergie d'air comprimé** : Air stocké sous pression pour alimenter divers outils ou procédés industriels.

Les fonctions techniques principales assurées par le compresseur dans la figure II.2 :

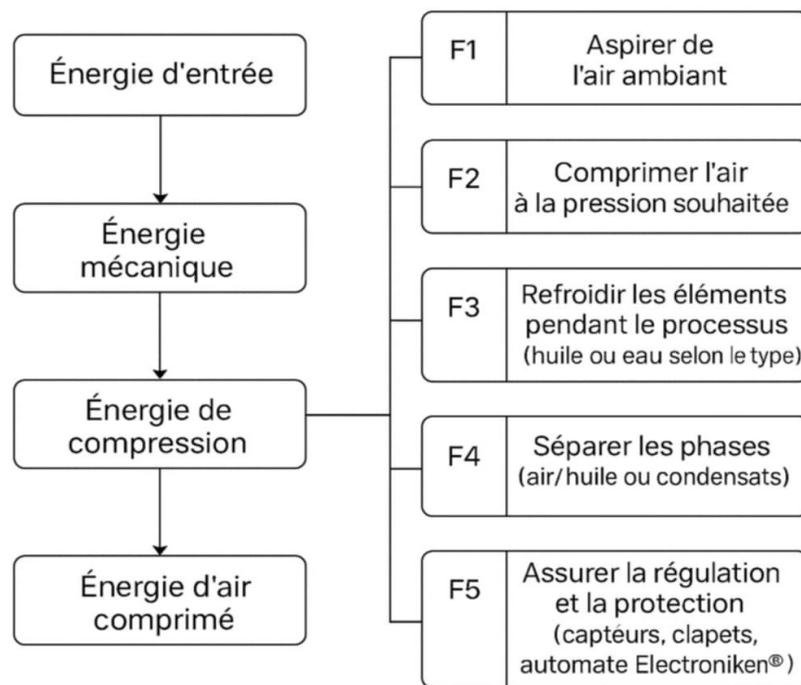


Figure II.3 : Analyse fonctionnelle du compresseur d'air.

II.4 Classification des compresseurs à vis

Selon les critères techniques et d'usage, les compresseurs à vis peuvent être classés en plusieurs catégories :

Critère	Type
Lubrification	À vis lubrifiées (GA), À vis sèches (ZT/ZR)
Refroidissement	Refroidi par air (ZT), Refroidi par eau (ZR)
Nombre d'étages	Mono-étagé, bi-étagé
Régulation	Fixe, à vitesse variable (VSD)
Application	Industrielle, médicale, alimentaire, etc.

Tableau II.1 : Différents modèles compresseur d'air GA, ZT et ZR.

II.5 Description technique de l'élément de compression

II.5.1 Structure mécanique

L'élément de compression à vis constitue le cœur du compresseur. Il est chargé de transformer l'énergie mécanique en énergie pneumatique en comprimant l'air à l'aide d'un système rotatif de haute précision. Cet ensemble est conçu pour assurer une compression efficace, continue et fiable.

Il est composé des éléments suivants :

Rotors asymétriques : L'élément comprend deux rotors — un rotor mâle à 4 lobes et un rotor femelle à 6 cannelures. Leur forme hélicoïdale permet une réduction progressive du volume de la chambre de compression, ce qui entraîne une augmentation de la pression.

Engrenages de synchronisation : Ils assurent une rotation parfaitement synchronisée des deux rotors, sans contact direct, réduisant ainsi l'usure et garantissant un rendement élevé.

Roulements à rouleaux et dispositifs anti-frottement : Ces composants assurent la stabilité et la durabilité de la rotation des arbres tout en minimisant les pertes mécaniques.

Joints d'arbre : Ils garantissent l'étanchéité entre l'intérieur de l'élément de compression et l'environnement extérieur, prévenant toute fuite d'huile ou d'air.

Enveloppes de refroidissement : Intégrées autour du bloc, elles permettent un contrôle thermique efficace, essentiel pour maintenir des conditions de fonctionnement optimales.[4]

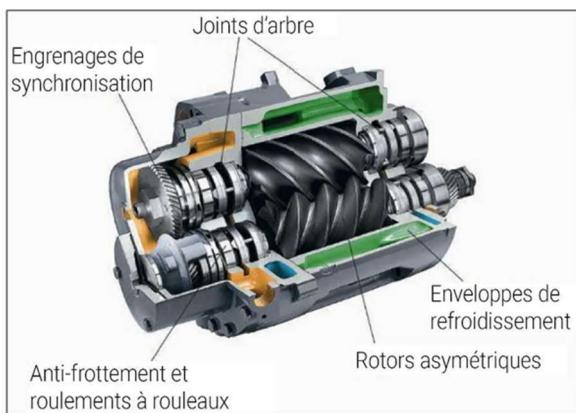


Figure II.4 : coupe de l'élément de compression à vis

II.5.2 Profil asymétrique des rotors

Atlas Copco utilise un profil asymétrique développé dans les années 1970, garantissant :

- Faibles pertes volumétriques.
- Réduction de l'usure.
- Grande durée de vie.
- Économie d'énergie.

II.2.6 Paramètres de fonctionnement

Paramètre	Valeur typique (ZT275)
Pression de service	7,5 à 10 bar
Débit	379 à 457 l/s
Vitesse de rotation moteur	1485 tr/min
Vitesse de rotation rotor mâle	7800 à 9300 tr/min

Tableau II.2 : paramètres de fonctionnement du compresseur d'air

II.7 Découpage technique du compresseur

Le compresseur se compose des sous-systèmes suivants :

- 1. Moteur électrique** : Il est le cœur du compresseur, fournissant l'énergie nécessaire pour entraîner les éléments de compression.
- 2. Élément de compression HP (haute pression)** : Cet élément est responsable de la compression de l'air à haute pression. Il utilise des rotors pour comprimer l'air aspiré.
- 3. Élément de compression BP (basse pression)** : Situé généralement en amont de l'élément HP, cet élément réalise une première étape de compression à une pression plus basse.
- 4. Radiateur de refroidissement d'air HP** : Après la compression, l'air chaud passe par ce radiateur pour être refroidi avant d'être envoyé vers les étapes suivantes.
- 5. Radiateur de refroidissement d'air BP** : De manière similaire à l'HP, l'air comprimé à basse pression est également refroidi ici.
- 6. Pompe à huile** : Elle assure la lubrification des éléments en mouvement pour minimiser l'usure et assurer un fonctionnement optimal.

7. Filtres d'air et pré-filtres d'air : Ces filtres sont essentiels pour garantir que l'air aspiré est exempt de particules et contaminants, protégeant ainsi les composants internes.

8. Filtres à huile : Ils filtrent l'huile utilisée pour la lubrification, assurant que l'huile est propre et exempte d'impuretés.

9. Transmetteurs électroniques et tableau d'affichage électronique : Ces composants permettent de surveiller et de contrôler les paramètres du compresseur en temps réel, assurant ainsi un fonctionnement sécurisé et efficace.

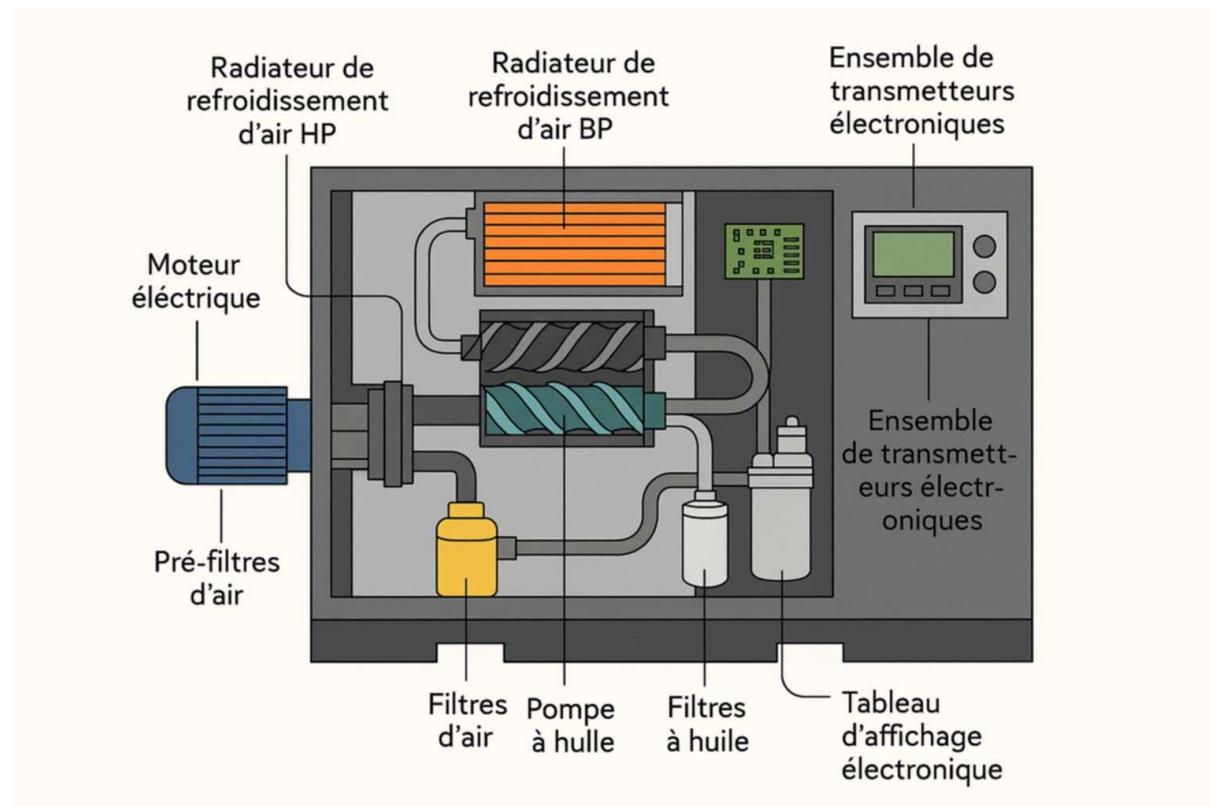


Figure II.5 : représentation du découpage technique

II.8 Conclusion

Le compresseur d'air à vis est un équipement indispensable dans le paysage industriel moderne. Grâce à sa technologie avancée, notamment le profil asymétrique, les systèmes de lubrification ou de refroidissement efficaces et une régulation précise, il permet de garantir un air comprimé fiable, économique et adapté aux normes les plus strictes. Le modèle étudié d'Atlas Copco (GA/ZR/ZT) représente une référence en matière de performance et de durabilité, ce qui justifie son implantation dans les installations pétrolières de haute exigence.

Chapitre III:

Système de

maintenance et

Analyse des pannes

III.1 Généralités sur la maintenance

III.1.1. Historique de la maintenance

Le domaine de la maintenance a connu une évolution significative, passant d'une approche réactive, centrée sur la maintenance curative, à des stratégies proactives et prédictives. La maintenance curative, bien que nécessaire en certaines circonstances, se caractérise par ses coûts élevés et les interruptions de production qu'elle engendre. La maintenance préventive, basée sur des interventions planifiées, a permis d'atténuer certains de ces inconvénients. Néanmoins, c'est avec l'avènement de la maintenance prédictive, s'appuyant sur l'analyse de données en temps réel et l'identification de schémas annonciateurs de défaillance, que l'optimisation des interventions a pris une nouvelle dimension. La maintenance proactive, quant à elle, intègre une démarche d'amélioration continue des processus et des infrastructures, visant à réduire les causes profondes des défaillances. Enfin, l'approche TPM (Total Productive Maintenance) promeut une implication de tous les niveaux hiérarchiques dans la gestion de la maintenance.

La transition vers la maintenance 4.0 marque une étape décisive, intégrant les technologies de l'Internet des Objets (IoT), de l'Intelligence Artificielle (IA), et du Big Data. Les capteurs IoT permettent la collecte de données en temps réel, tandis que l'IA exploite ces données pour prédire les pannes et optimiser les stratégies de maintenance. Le Big Data, quant à lui, centralise et analyse des volumes massifs d'informations pour une prise de décision éclairée.

L'industrie pétrolière illustre parfaitement l'application de ces concepts. La surveillance conditionnelle, l'analyse prédictive, et les systèmes de maintenance intégrés à l'IA sont déployés pour anticiper les défaillances d'équipements critiques tels que les turbines et les pipelines, permettant ainsi de réduire les arrêts de production et d'optimiser les coûts. [5]

III.1.2. Typologies de Maintenance :

III.1.2.1. Maintenance Corrective :

Elle se caractérise par une intervention *a posteriori*, en réponse à une panne. Bien qu'elle permette une réactivité immédiate et ne requière pas de planification préalable, elle engendre des coûts élevés (réparations urgentes, pièces de rechange, mobilisation rapide de personnel) et

des temps d'arrêt imprévus, impactant la production. Elle demeure cependant inévitables dans certains cas. [6]

III.1.2.2. Maintenance Préventive :

Cette approche consiste en des interventions planifiées et régulières (inspections, remplacements de pièces) visant à garantir le bon fonctionnement des équipements et à minimiser le risque de pannes. La planification rigoureuse permet d'optimiser l'utilisation des ressources et de réduire les interruptions de production. Elle s'articule autour de calendriers établis (hebdomadaire, mensuel, semestriel, annuel) définissant les tâches à effectuer (lubrification, contrôle des niveaux, inspections approfondies, révisions complètes).

III.1.2.3. Maintenance Conditionnelle et Prédictive :

Ces stratégies avancées reposent sur l'analyse des conditions de fonctionnement (maintenance conditionnelle) et sur la prédition des défaillances à l'aide d'algorithme et de données en temps réel (maintenance prédictive). Elles permettent de planifier les interventions avant l'apparition des pannes, optimisant ainsi les coûts et réduisant les temps d'arrêt. Des exemples d'implémentation dans l'industrie pétrolière incluent la surveillance des vibrations, l'analyse de la température et la surveillance chimique.

III.1.2.4. Maintenance Proactive :

Allant au-delà de la simple anticipation des défaillances, cette approche vise à identifier et à corriger les causes potentielles de défaillance avant qu'elles n'affectent les opérations. Elle nécessite un engagement en matière de formation continue, d'analyse des causes profondes des défaillances (Root Cause Analysis) et d'optimisation des processus. Elle se distingue donc des autres types de maintenance par son orientation vers la prévention à long terme et l'amélioration continue.

III.1.3. Indicateurs Clés de Performance en Maintenance (KPI)

Les indicateurs clés de performance (KPI : key performance indicators) fournissent une mesure quantifiable et objective de l'efficacité des activités de maintenance. Ils permettent de suivre l'évolution des performances, d'identifier les axes d'amélioration et de prendre des décisions éclairées. Parmi les KPI les plus couramment utilisés, on retrouve le MTBF (Mean

Time Between Failures), le MTTR (Mean Time To Repair), le taux de disponibilité et le taux de panne. [7]

III.1.3.1. MTBF (Mean Time Between Failures)

Le MTBF, ou Temps Moyen Entre Pannes, est un indicateur essentiel pour évaluer la fiabilité et la disponibilité des équipements réparables. Il représente le temps moyen de fonctionnement d'un actif entre deux défaillances consécutives. Un MTBF élevé est synonyme de meilleure fiabilité et de moindre fréquence de pannes.

Le MTBF se calcule en divisant le temps total de fonctionnement d'un actif sur une période donnée par le nombre total de défaillances survenues durant cette même période. La formule est la suivante :

$$\text{MTBF} = \frac{\text{Temps total de fonctionnement}}{\text{Nombre de défaillances}} \quad (\text{En heures}).$$

Un MTBF élevé est indicateur d'une bonne fiabilité de l'équipement. Améliorer le MTBF est un objectif primordial pour les services de maintenance, car cela se traduit par une augmentation de la productivité, une réduction des coûts de maintenance, et une diminution des pertes de production dues aux arrêts imprévus. Il est important de noter que le MTBF est applicable uniquement aux équipements réparables.

III.1.3.2. MTTR (Mean Time To Repair)

Le MTTR, ou Temps Moyen de Réparation, mesure le temps moyen nécessaire pour diagnostiquer et réparer un équipement après une défaillance. Il reflète l'efficacité des opérations de maintenance, incluant le temps de diagnostic, la réparation proprement dite, et les tests de remise en service.

Le MTTR se calcule en divisant le temps total consacré aux réparations sur une période donnée par le nombre total de réparations effectuées durant cette même période. La formule est la suivante :

$$\text{MTTR} = \frac{\text{Temps total de réparation}}{\text{Nombre de réparation}}$$

Le MTTR peut être exprimé en minutes, heures, ou jours, selon le contexte et la criticité de l'équipement.

Un MTTR faible est crucial pour maximiser la disponibilité des équipements et minimiser les interruptions de production. Il indique une capacité de maintenance réactive et efficace, avec des équipes compétentes, des procédures claires, et un accès rapide aux pièces de rechange. Une réduction du MTTR contribue directement à améliorer le taux de disponibilité global.

III.1.3.3. Taux de disponibilité et taux de panne

Taux de disponibilité : Le taux de disponibilité mesure le pourcentage de temps pendant lequel un équipement est opérationnel et prêt à fonctionner par rapport au temps total. Il prend en compte à la fois le MTBF et le MTTR, et reflète la performance globale de la maintenance.

$$\text{Taux de disponibilité} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} = \frac{\text{Temps de fonctionnement}}{\text{Temps total}}$$

Taux de panne : Le taux de panne mesure la fréquence des défaillances d'un équipement sur une période donnée. Il est l'inverse du MTBF et peut être exprimé en nombre de pannes par heure, jour, mois ou année.

$$\text{Taux de panne} = \frac{1}{\text{MTBF}} = \frac{\text{Nombre de pannes}}{\text{Temps total de fonctionnement}}$$

III.1.3.4. Importance et utilisation des KPI :

Ces indicateurs sont essentiels pour optimiser la maintenance, améliorer la fiabilité des équipements, assurer la continuité des opérations, et réduire les coûts. Ils permettent de :

Suivre l'évolution des performances : Les KPI permettent de suivre l'évolution des performances de la maintenance au fil du temps, d'identifier les tendances, et de mesurer l'impact des améliorations.

Comparer les performances : Les KPI permettent de comparer les performances de différents équipements, services de maintenance, ou sites de production.

Identifier les axes d'amélioration : Les KPI permettent d'identifier les points faibles et les axes d'amélioration des opérations de maintenance.

Prendre des décisions éclairées : Les KPI fournissent des données objectives pour prendre des décisions éclairées concernant les stratégies de maintenance, les investissements, et l'allocation des ressources.

En conclusion, le suivi et l'analyse des KPI de maintenance sont indispensables pour optimiser les opérations de maintenance, améliorer la fiabilité des équipements, et assurer la performance globale des installations industrielles. L'analyse des pannes et des causes profondes (Root Cause Analysis) est une étape essentielle pour comprendre les origines des défaillances et mettre en place des actions correctives efficaces.

III.2. Analyse des pannes et des causes profondes

L'analyse des pannes et des causes profondes est une compétence essentielle pour les ingénieurs en maintenance industrielle, en particulier dans le secteur pétrolier. Elle permet d'identifier, d'analyser et de résoudre les défaillances des équipements de manière systématique, contribuant ainsi à améliorer la fiabilité et la sécurité des opérations. [8]

III.2.1. Principes Fondamentaux de l'Analyse des Pannes

L'analyse des pannes repose sur l'identification des symptômes observés lors d'une défaillance et la recherche des causes sous-jacentes. Les principes fondamentaux incluent :

III.2.1.1. Collecte de Données :

La première étape consiste à rassembler des informations pertinentes telles que les relevés de température, les niveaux de pression, les vibrations, et les journaux de maintenance. Ces données sont cruciales pour comprendre le contexte de la panne.

III.2.1.2. Analyse des Données :

Une fois les données collectées, elles doivent être examinées pour identifier des tendances, des anomalies et des corrélations. Des outils tels que les logiciels de gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO) et les systèmes de surveillance en temps réel sont souvent utilisés pour cette analyse.

III.2.1.3. Identification des Causes Profondes :

L'objectif est de dépasser les causes immédiates pour identifier les causes profondes qui ont conduit à la panne. Cela peut nécessiter l'utilisation de techniques telles que le diagramme d'Ishikawa ou l'analyse des 5 Pourquoi.

III.2.2. Outils et Techniques d'Analyse des Causes Profondes

Plusieurs outils et techniques sont couramment utilisés pour analyser les causes profondes des pannes :

III.2.2.1. Diagramme d'Ishikawa :

Aussi connu sous le nom de diagramme l'arête de poisson (figure III.1), cet outil permet de visualiser les causes potentielles d'un problème en les catégorisant (méthodes, matériaux, machines, main-d'œuvre, mesures, environnement).

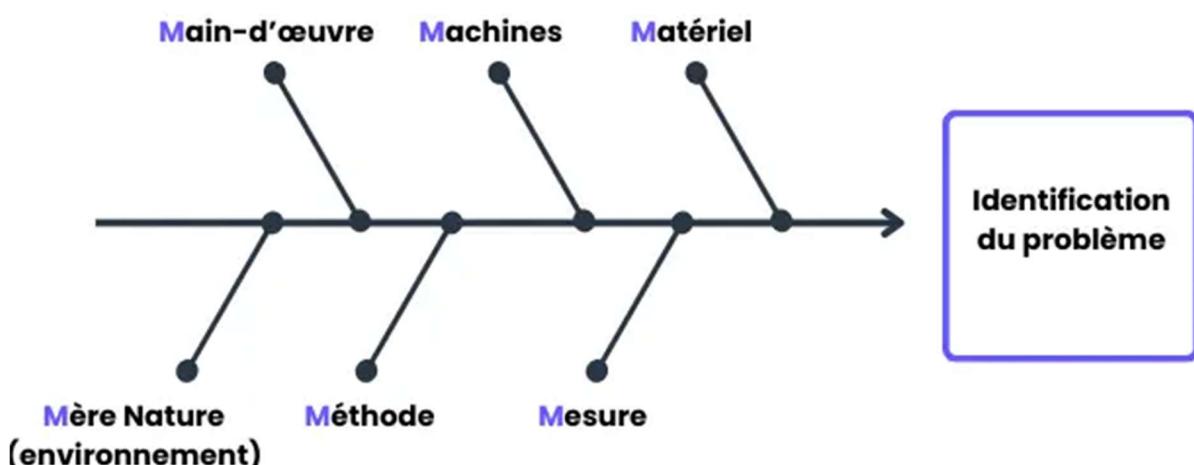


Figure III.1. : diagramme d'Ishikawa

III.2.2.1.1 Étapes pour créer un diagramme d'Ishikawa

a. Définir le problème :

- Identifiez clairement le problème ou l'effet que vous souhaitez analyser ;
- Écrivez le problème dans une boîte à l'extrémité droite du diagramme.

b. Identifier les catégories de causes :

- Les catégories courantes incluent les 6M : Matériel, Méthode, Main-d'œuvre, Mesure, Milieu, et Machine ;

- Vous pouvez également utiliser d'autres catégories pertinentes pour votre contexte spécifique.

c. Brainstorming des causes potentielles :

- Pour chaque catégorie, réfléchissez aux causes potentielles qui pourraient contribuer au problème ;
- Notez ces causes sur les branches correspondantes du diagramme.

d. Analyser les causes secondaires :

- Pour chaque cause principale, identifiez les causes secondaires ou sous-causes ;
- Notez ces sous-causes sur des branches secondaires.

e. Révision et validation :

- Passez en revue le diagramme avec l'équipe pour vous assurer que toutes les causes potentielles ont été identifiées ;
- Validez les causes avec des données ou des preuves si possibles.

Exemple pratique : Analyse des pannes d'une partie du produit qui n'est pas en bonne taille illustré en figure III.2.

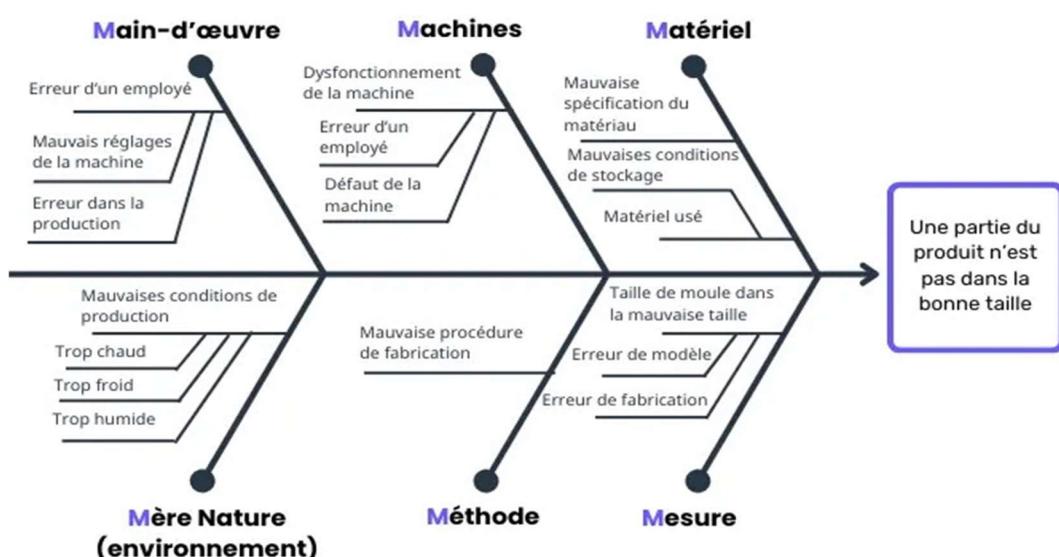


Figure III.2. : exemple de diagramme d'Ishikawa

III.2.2.2. Analyse des 5 Pourquoi

Cette technique consiste à poser la question "pourquoi" cinq fois de suite pour identifier la cause racine d'un problème. Elle est simple mais efficace pour aller au-delà des causes superficielles.

III.2.2.3. AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité)

Similaire à la FMEA (Failure Modes and Effects Analysis), l'AMDEC est souvent utilisée dans l'industrie pour évaluer les risques et la criticité des défaillances dans les processus de production et de conception. Elle met un accent particulier sur la criticité des défaillances et est utilisée pour se conformer à des normes spécifiques.

III.2.2.3.1. Étapes de la Méthode AMDEC

a. Définition du Périmètre

- Identifier le système ou l'équipement à analyser.
- Définir les limites de l'analyse.

b. Identification des Fonctions

- Lister les fonctions principales et secondaires de l'équipement.
- Décrire les performances attendues pour chaque fonction.

c. Identification des Modes de Défaillance

- Pour chaque fonction, identifier les modes de défaillance potentiels.
- Décrire les causes possibles de chaque mode de défaillance.

d. Évaluation des Effets

- Déterminer les effets de chaque mode de défaillance sur le système, l'équipement ou le processus.
- Évaluer la gravité de ces effets.

e. Évaluation de la Criticité

- Utiliser une matrice de criticité pour évaluer la criticité de chaque mode de défaillance.

- La criticité est généralement évaluée en fonction de la gravité, de la fréquence d'occurrence et de la détectabilité.

f. Mise en Place des Actions Correctives

- Proposer des actions correctives pour réduire la criticité des modes de défaillance.
- Planifier et mettre en œuvre ces actions.

g. Suivi et Réévaluation

- Suivre l'efficacité des actions correctives.
- Réévaluer régulièrement l'AMDEC pour s'assurer qu'elle reste pertinente et efficace.

III.2.3. Transition vers les Stratégies de Maintenance Proactive

Une fois les causes profondes identifiées, des actions correctives doivent être mises en œuvre pour résoudre les pannes. Ces actions peuvent inclure des réparations, des remplacements de composants, des ajustements de paramètres, et des modifications de procédures. Il est essentiel de suivre et d'évaluer l'efficacité de ces actions pour s'assurer que les pannes sont résolues de manière durable.

La prévention des pannes repose sur des stratégies proactive telles que la maintenance préventive et la maintenance prédictive. La maintenance préventive consiste à effectuer des inspections et des entretiens réguliers pour prévenir les pannes avant qu'elles ne surviennent. La maintenance prédictive, quant à elle, utilise des technologies avancées pour surveiller l'état des équipements en temps réel et prédire les défaillances potentielles.

L'analyse des pannes et des causes profondes est une démarche structurée et essentielle pour améliorer la fiabilité et la performance des équipements industriels. En maîtrisant les outils et les techniques appropriés, les ingénieurs peuvent non seulement résoudre les pannes de manière efficace, mais aussi mettre en place des stratégies de prévention pour minimiser les risques futurs.

III.3. La GMAO : Un Pilote Automatique pour la Maintenance, avec Datastream comme Boussole

Pour qu'une usine fonctionne correctement, il faut surveiller en permanence l'état de tous les équipements, prévoir les réparations, et s'assurer d'avoir les bonnes pièces au bon moment. C'est là qu'intervient la GMAO. [9]

III.3.1. Définition

La GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur), c'est un logiciel qui permet de gérer toute la maintenance d'une entreprise de manière organisée et efficace. C'est comme un tableau de bord qui vous donne une vue d'ensemble de l'état de vos équipements et vous aide à prendre les bonnes décisions. [9]

III.3.2. Pourquoi utiliser une GMAO ?

- **Pour que les machines tombent moins souvent en panne :** La GMAO permet de mieux organiser la maintenance et d'éviter les arrêts imprévus.
- **Pour que les réparations soient plus rapides :** Avec une GMAO, on sait tout de suite quelles sont les pièces à remplacer et comment faire la réparation.
- **Pour dépenser moins d'argent en maintenance :** En évitant les pannes et en optimisant les réparations, on réduit les coûts.
- **Pour ne jamais être à court de pièces détachées :** La GMAO aide à gérer les stocks de pièces de rechange et à éviter les ruptures.
- **Pour respecter les règles de sécurité et de qualité :** La GMAO permet de garder une trace de toutes les interventions et de s'assurer que tout est conforme aux normes.

III.3.3. Comment la GMAO améliore la gestion des équipements et des interventions ?

La GMAO transforme la maintenance en passant d'une approche réactive ("on répare quand ça casse") à une approche proactive ("on anticipe les problèmes").

- **On planifie mieux la maintenance préventive :** Au lieu d'attendre que les machines tombent en panne, on effectue des vérifications et des réparations régulières pour prolonger leur durée de vie.

- **On centralise toutes les informations :** La GMAO regroupe les données techniques, les plans des machines, et l'historique de toutes les interventions. C'est un peu comme si on avait la carte d'identité de chaque équipement.
- **On coordonne mieux les équipes de maintenance :** Avec la GMAO, les équipes savent en temps réel quelles sont les tâches à effectuer et comment les réaliser.
- **On réduit les temps d'arrêt :** Grâce à la GMAO, on peut anticiper les besoins en pièces détachées et en interventions, ce qui permet de remettre les machines en marche plus rapidement.

III.3.4. Avantages spécifiques de la GMAO dans l'industrie pétrolière

Dans l'industrie pétrolière, où la sécurité et la fiabilité sont primordiales, la GMAO apporte des avantages considérables :

1. **Moins d'arrêts imprévus :** En surveillant en permanence l'état des équipements, on peut anticiper les pannes majeures et éviter les interruptions de production.
2. **Des coûts de maintenance optimisés :** La GMAO permet de réduire les dépenses liées aux réparations d'urgence et d'optimiser les achats de pièces de rechange.
3. **Une sécurité renforcée et une conformité garantie :** La GMAO facilite le suivi des inspections réglementaires et aide à respecter les normes de sécurité (ISO 55000, API 570, etc.).
4. **Une gestion efficace des ressources :** Grâce à une planification optimisée, on peut répartir les tâches de manière efficace et limiter les interventions d'urgence coûteuses.

III.3.5. Des exemples concrets

Voici quelques exemples de résultats obtenus grâce à la GMAO dans l'industrie pétrolière :

- **Exemple 1 :** Une entreprise pétrolière a réduit de **30 %** les interventions correctives en améliorant la planification de la maintenance préventive et conditionnelle.
- **Exemple 2 :** La mise en place d'une GMAO a permis de réduire de **20 %** le coût des pièces de rechange, en optimisant les niveaux de stock et en évitant les achats en urgence.
- **Exemple 3 :** Sur une installation de séparation et compression, la GMAO a contribué à réduire de **15 %** les arrêts imprévus, grâce à un suivi précis des indicateurs de performance des équipements.

III.3.6. Les fonctionnalités clés d'une GMAO

Une GMAO performante offre un ensemble de fonctionnalités essentielles pour optimiser la gestion de la maintenance :

- **Gestion des équipements** : Pour suivre l'état de chaque machine, connaître son historique, et anticiper les problèmes. Le tableau III.1 récapitule avantages et fonctionnalités :

Fonctionnalités	Avantages
Gestion des équipements	Permet de dresser une arborescence complète des équipements et de suivre leur état en temps réel, réduisant ainsi les interruptions de production
Planification des interventions	Optimise l'affectation des ressources matérielles et humaines, garantissant que les bonnes personnes sont affectées aux bonnes tâches
Suivi des stocks	Centralise les données sur les pièces de rechange et optimise la gestion des achats, générant des économies
Analyse des coûts	Fournit des KPI précis pour analyser les coûts de maintenance, les volumes et fréquences des pannes, aidant à adapter les stratégies de maintenance
Tableaux de bord et KPI	Offrent une vue en temps réel sur la disponibilité des équipements et facilitent la prise de décision
Gestion des achats	Compare automatiquement les conditions d'achat et accélère les prises de décision, générant des économies
Application mobile	Permet aux techniciens de rester informés en temps réel, de planifier des interventions et de gérer des tâches à distance
Suivi des formations et certifications	Assure que l'équipe est toujours à jour et prête à répondre aux exigences techniques
Maintenance prédictive	Anticipe les besoins de maintenance et prévient les pannes, prolongeant la durée de vie des équipements
Sécurité des données	Propose des fonctionnalités de sauvegarde et de récupération des données, avec un cryptage robuste pour protéger contre les cyberattaques

Tableau III.1 : Tableau récapitulatif des fonctionnalités et de leurs avantages.

La GMAO optimise la maintenance industrielle en centralisant les informations et en automatisant les processus, réduisant ainsi les arrêts imprévus et les coûts. Elle améliore la planification, la gestion des stocks, et le respect des normes de sécurité, notamment dans l'industrie pétrolière. Les exemples concrets montrent une réduction significative des interventions correctives et des coûts des pièces de rechange, tout en augmentant la disponibilité des équipements.

III.4. Conclusion

Ce chapitre a exploré l'évolution de la maintenance industrielle, mettant en lumière l'importance de la GMAO. La maintenance est passée d'une approche réactive à des méthodes proactives et prédictives, intégrant des technologies avancées comme l'IoT et l'IA. Cette transition est cruciale pour surveiller les équipements, prévenir les pannes, optimiser les coûts, et respecter les normes de sécurité, notamment dans l'industrie pétrolière.

Les différentes typologies de maintenance, des correctives aux prédictives, montrent la diversité des stratégies pour maximiser l'efficacité et minimiser les interruptions. Les KPI servent de référence pour évaluer l'efficacité des opérations de maintenance. L'analyse des pannes et des causes profondes, avec des outils comme le diagramme d'Ishikawa et l'analyse des 5 Pourquoi, est essentielle pour résoudre les problèmes systématiquement.

La GMAO, avec ses fonctionnalités variées, rationalise les opérations de maintenance, améliorant la disponibilité des équipements et réduisant les coûts. Son adoption dans l'industrie pétrolière démontre des succès tangibles.

Le prochain chapitre abordera la partie pratique avec une étude de cas dans une unité CSC UPSIDNord, illustrant l'implémentation concrète de ces stratégies.

Chapitre IV :

Étude de Cas - Application de

la Méthode AMDEC sur un

Compresseur d'Air à Vis

IV.1 Introduction

Au cœur des opérations du CSC UPSIDE NORD réside un équipement essentiel : le compresseur d'air à vis ZT250 EX. Ce dernier assure l'alimentation en air comprimé des systèmes d'instrumentation complexes et joue un rôle critique dans la production d'azote nécessaire à divers processus industriels. Par conséquent, sa performance et sa fiabilité sont intrinsèquement liées à la continuité et à l'efficience de l'ensemble du site.

Une défaillance, même mineure, du compresseur ZT250 EX peut engendrer des conséquences significatives. Outre les coûts directs associés à la réparation ou au remplacement des pièces, des interruptions de production coûteuses, des retards dans les livraisons et des pertes financières importantes peuvent en résulter. L'impact d'un tel arrêt peut également se traduire par une baisse de la qualité.

Face à ces enjeux, il est impératif d'adopter une approche proactive de la maintenance. C'est dans cette optique que l'analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) est déployée dans cette étude de cas. L'AMDEC se révèle être un outil puissant pour identifier en amont les vulnérabilités potentielles du compresseur, évaluer les risques associés à chaque mode de défaillance et mettre en place des actions correctives ciblées.

En appliquant la méthodologie AMDEC au compresseur ZT250 EX, l'objectif principal de cette étude est triple : minimiser les temps d'arrêt imprévus, optimiser la disponibilité de l'équipement et réduire les coûts de maintenance associés. En identifiant les causes profondes des défaillances et en mettant en œuvre des mesures préventives efficaces, nous visons à améliorer la fiabilité globale du compresseur et à garantir la continuité des opérations du CSC UPSIDE NORD.

IV.2 Établissement de la Criticité

L'étape initiale et fondamentale de l'analyse AMDEC consiste à établir la criticité intrinsèque du compresseur d'air ZT250 EX (désigné UN21-UK-63-401 C) au sein de l'unité de production du CSC UPSIDE NORD. Cette évaluation permet de déterminer l'importance relative du compresseur pour le bon fonctionnement de l'ensemble du système et d'identifier les conséquences potentielles de ses défaillances.

Le Tableau IV.4, présenté plus loin dans ce chapitre, expose l'évaluation de la criticité du compresseur d'air UN21-UK-63-401 C, fruit d'une analyse approfondie de ses fonctions et de son rôle dans la production.

L'évaluation précise de la criticité est essentielle car elle permet une priorisation éclairée des efforts de maintenance. En identifiant les équipements les plus critiques, on peut concentrer les ressources et l'attention sur ceux qui nécessitent une maintenance préventive accrue et des inspections plus fréquentes. De plus, cette évaluation guide la définition des mesures de prévention les plus pertinentes, en adaptant les stratégies de maintenance aux risques spécifiques associés à chaque niveau de criticité.

Pour évaluer la criticité du compresseur, nous avons utilisé les critères de cotation suivants, présentés en détail dans le Tableau IV.1 :

- **P -- Impact sur la Sécurité et/ou l'Environnement** : Ce critère évalue les conséquences potentielles d'une défaillance du compresseur sur la sécurité du personnel, la protection de l'environnement et la conformité aux réglementations en vigueur.
- **I -- Importance (Stratégie, Primaire, Secondaire, De secours)** : Ce critère évalue le rôle du compresseur dans la stratégie de production de l'unité. Un compresseur stratégique ou primaire aura une importance plus élevée qu'un compresseur secondaire ou de secours.
- **E -- État (À réformer, À rénover, Mauvais état, Bon état, Neuf)** : Ce critère évalue l'état général du compresseur, en tenant compte de son âge, de son historique de maintenance et de son usure. Un compresseur en mauvais état ou à réformer aura une importance plus élevée qu'un compresseur neuf ou en bon état.
- **U -- Taux d'utilisation (Saturé, Fort, Moyen, Faible, Très faible)** : Ce critère évalue la fréquence d'utilisation du compresseur. Un compresseur utilisé de manière intensive aura une importance plus élevée qu'un compresseur utilisé occasionnellement.

En fonction du score obtenu pour chaque critère, le niveau de criticité est classé selon l'échelle suivante :

- **0-8: criticité extrême (Very High/Très Haut) A** : Défaillance ayant des conséquences catastrophiques, nécessitant une attention immédiate et des mesures correctives urgentes.

- 8-23: criticité élevée (High/Haut) B** : Défaillance ayant des conséquences significatives, nécessitant une intervention rapide et une planification de maintenance rigoureuse.
- 23-64: criticité modérée (Medium/Moyen) C** : Défaillance ayant des conséquences modérées, nécessitant une planification de maintenance et un suivi régulier.
- 64-256: criticité faible (Low/Faible) D** : Défaillance ayant des conséquences mineures, nécessitant une surveillance et une maintenance de routine.

Le Tableau IV.2 présente les résultats de l'évaluation de la criticité du compresseur d'air UN21-UK-63-401C dans l'unité. Cette évaluation a révélé que le compresseur possède un niveau de **criticité B**, indiquant un niveau de risque élevé qui nécessite une attention particulière en matière de maintenance et de prévention des défaillances. Les détails de cette évaluation, ainsi que les justifications de chaque score, sont présentés dans le tableau suivant.

Critères	cotation				
	0	1	2	3	4
P – Impact sur la Sécurité et/ou l'Environnement	-Risque grave pour le personnel et machine. -Répercussions graves sur l'environnement	-Risque Moyen pour le personnel et machine. -Pollution confinée au site de production	-Risque faible pour le personnel. -Émission, rejets dans les normes	-Risque faible pour la machine seulement. -Retouches possibles	-Aucune incidence mesurable (Aucun Impact)
I – Importance	- Stratégie : pas de délestage sur autre machine, pas de sous-traitance possible	- Important : pas de délestage sur autre machine, mais sous-traitance possible	- Primaire : délestage sur autre machine et sous-traitance possible	- Secondaire	- De secours
E – État	À réformer	À rénover	Mauvais état	Bon état	Neuf
U – Taux d'utilisation	Saturé (100 %)	Fort (~70-99 %)	Moyen (~40-69 %)	Faible (~11-39 %)	Très faible (<10 %)
Valeur de la criticité	Score			Niveau	
0-8	criticité extrême	Very High	Très Haut	A	
8-23	criticité élevé	High	Haut	B	
23-64	criticité modérée	Medium	Moyen	C	
64-256	criticité faible	Low	Faible	D	

Tableau IV.1 : Tableau référence criticité. [10]

N° Repère Equipt	Description	Evaluation de criticité					Niveau de criticité
		Sécurité/Env. 0-4	Importance 0-4	Etat 0-4	Utilisat 0-4	Total $=S \times I \times E \times U$	
UN21-UK-63- 401C	COMPRESSEUR D'AIR C	2	2	3	1	12	B

Tableau IV.2 : Criticité du compresseur d'air dans l'unité UPSIDE NORD

IV.3 Historique des pannes

L'analyse approfondie des pratiques de maintenance au sein du CSC UPSIDE NORD a mis en évidence un nombre significatif d'interventions correctives sur le compresseur d'air ZT250 EX. Ces interventions, bien que nécessaires pour assurer la continuité de la production, entraînent des coûts directs (pièces de rechange, main-d'œuvre) et indirects (temps d'arrêt, perte de production) non négligeables.

Afin d'illustrer l'ampleur de ces interventions et d'identifier les principaux axes d'amélioration, le tableau IV.5 ci-dessous présente un résumé de l'historique des pannes du compresseur ZT250 EX. Cet historique, basé sur les données issues de la GMAO et des rapports de maintenance, met en évidence les modes de défaillance les plus fréquents, leurs causes probables, et leurs impacts sur la production.

Compte tenu de cette situation, une analyse AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) s'avère indispensable. Cette démarche proactive permettra d'identifier les vulnérabilités du compresseur ZT250 EX, d'évaluer les risques associés à chaque mode de défaillance, et de mettre en place des actions correctives ciblées afin de minimiser la fréquence des pannes, de réduire les temps d'arrêt, et d'optimiser les coûts de maintenance.

L'AMDEC, combinée à une analyse des coûts (méthode ABC), fournira une base solide pour la prise de décisions concernant les stratégies de maintenance à adopter.

Le coût indiqué inclut uniquement les coûts directs, tels que le prix des pièces de rechange et le nombre d'heures consacrées à l'opération. Pour les exercices 2023 et 2024, le coût horaire par agent est fixé à 2600 DA.

Chapitre IV : Étude de Cas - Application de la Méthode AMDEC sur un Compresseur d'Air à Vis

Équipement Affecté	Mode de Défaillance	Cause Probable	Temps d'Arrêt (Heures)	Coût de Réparation (DA)	Impact sur la Production	Actions Correctives Mises en Œuvre	Commentaires
Élément HP	Surchauffe et blocage	Colmatage du refroidisseur, vibrations excessives, mauvais graissage	10	1.200.000	arrêt d'un train pendant 2h	Nettoyage du refroidisseur, remplacement du filtre à air, remplacement de l'élément HP, vérification alignement	Nous avons subi trois pertes de l'élément haute pression (HP) en deux ans, alors que la révision générale est prévue tous les cinq ans selon les recommandations du constructeur.
Pompe à Huile	Défaillance Mécanique	Usure	12	400.000	arrêt d'un train pendant 2h	Remplacement de la pompe à huile.	Analyse d'huile a révélé une contamination par des particules abrasives. Érosion de la matière
joint conduites inter-étage	fuite importante d'air	Défaillance des joints	10	100.000	/	Remplacement des joints.	Les fuites d'air au niveau des joints des conduites d'air ont entraîné une perte de performance du compresseur d'air
Flexible d'Huile	Fuite d'Huile	Qualité / Vieillissement du matériau	3	20.000	Réduction de 5%	Remplacement du flexible.	Les défaillances fréquentes des flexible (13 fois pendant 2 ans) ont entraîné des pertes significatives de grandes quantités d'huile.
circuit d'huile	Haute température	portes ouvertes	2	20.000	/	attente refroidissement. exploitation du compresseur avec les portes fermées	L'exploitation du compresseur avec les portes ouvertes, nécessaire pour le contrôle visuel des fuites d'huile, a perturbé la circulation d'air interne, entraînant un refroidissement incomplet.
Filtre à Huile	Colmatage Excessif	Qualité de l'huile non conforme	2	20.000	/	Remplacement du filtre à huile, analyse de l'huile.	Les particules solides détectées dans l'huile, causées par la défaillance des roulements et/ou de la pompe à huile, ont provoqué le colmatage rapide des filtres.

Tableau IV.3 : Historique des pannes

IV.4 Approche AMDEC approfondie et intégration des données historiques (ABC, RPN, criticité)

L'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) est une méthode systématique utilisée pour identifier les défaillances potentielles d'un système, en évaluer les effets et prioriser les actions correctives à entreprendre. Elle est largement utilisée en maintenance préventive pour fiabiliser les équipements industriels.

L'étude AMDEC du compresseur ZT250 EX suit une démarche en quatre étapes. Tout d'abord, l'**initialisation** définit le périmètre, les objectifs et l'équipe de travail. Ensuite, l'**analyse fonctionnelle** identifie les fonctions et les éléments du compresseur. Puis, l'**analyse des défaillances** examine les modes de défaillance, leurs causes et leurs effets. Enfin, **une grille AMDEC** évalue la criticité de chaque défaillance en utilisant les critères de Fréquence, Gravité et Non-Détection, ainsi que l'Impact du Coût ABC et le Ratio Coût-Bénéfice.

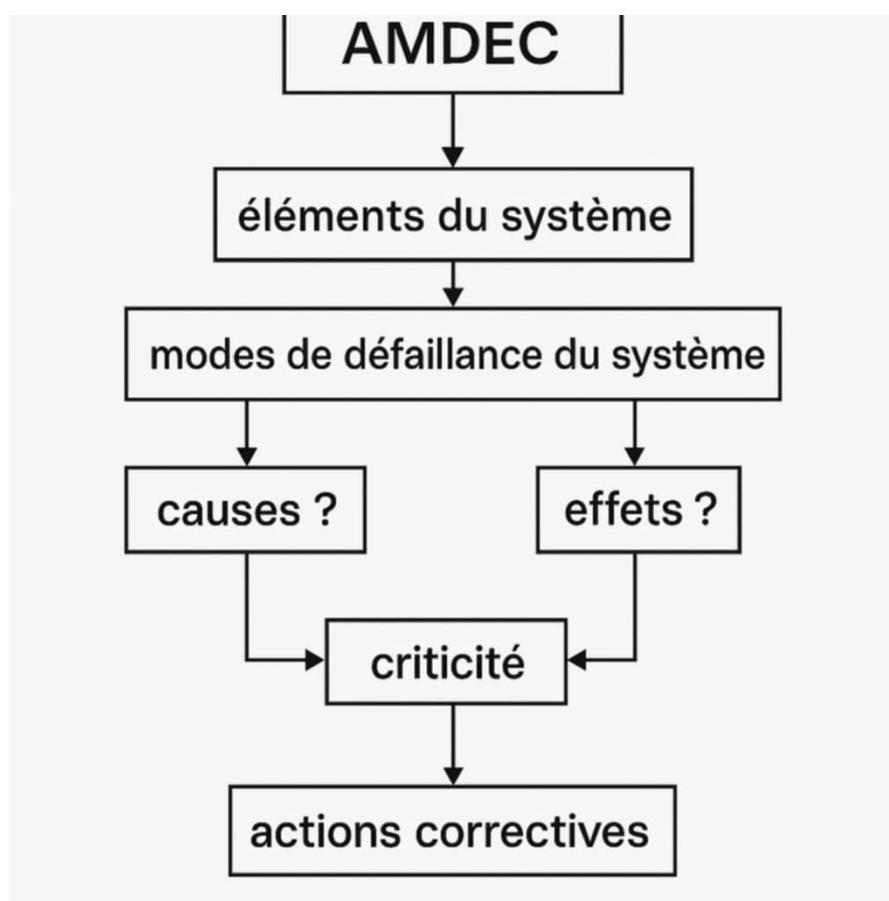


Figure IV.1 : Démarche AMDEC.

IV.4.1 Principaux paramètres de l'AMDEC

- **Fonction :** La fonction prévue du composant ou du système.
- **Mode de Défaillance :** Comment le composant ou le système peut ne pas remplir sa fonction.
- **Cause :** La raison du mode de défaillance. Soyez précis (par exemple, "Défaillance du roulement de la pompe à huile" au lieu de simplement "Défaillance de la pompe à huile").
- **Effet :** La conséquence du mode de défaillance sur le système et les opérations.
- **Contrôles Actuels :** Quelles mesures sont *déjà* en place pour prévenir ou détecter la défaillance.
- **Actions Recommandées :** Actions spécifiques pour réduire la probabilité ou la gravité de la défaillance. Elles doivent être concrètes et réalisables.
 - **Sévérité (S) :** Une évaluation (1-10) de la conséquence *la plus grave* de la défaillance (1 = insignifiant, 10 = catastrophique).
 - **Occurrence (O) :** Une évaluation (1-10) de la *probabilité* de survenue de la défaillance (1 = très improbable, 10 = presque certain). Baser sur les données historiques.
 - **Détection (D) :** Une évaluation (1-10) de la *facilité* avec laquelle la défaillance peut être détectée *avant* qu'elle ne cause un problème majeur (1 = très facile, 10 = très difficile).
 - **RPN (Risk Priority Number) :** $S \times O \times D$. Ce nombre aide à prioriser les actions. Les RPN les plus élevés indiquent les risques les plus importants.
- ✓ **Priorisation des Risques :** Les colonnes Sévérité, Occurrence, Détection et RPN fournissent un cadre pour prioriser les risques et se concentrer sur les problèmes les plus critiques.
- **Impact du Coût ABC (DA) :** L'Impact du Coût ABC (**Activity-Based Costing ou Analyse des Coûts par Activités**), représente le coût total *estimé* qu'engendre la survenue d'un incident (mode de défaillance) *une seule fois*. Il se compose de deux types de coûts : les coûts directs et les coûts indirects.

Formule Générale : Impact du Coût ABC = Coûts Directs + Coûts Indirects

Coûts directs : Pièces, main-d'œuvre, matériaux pour la réparation.

Coûts indirects : Temps d'arrêt, perte de production, pénalités potentielles, augmentation de la consommation d'énergie (en raison d'inefficacités avant la défaillance complète). Vous mentionnez qu'une défaillance pourrait entraîner des interruptions substantielles avec de lourdes conséquences économiques.

- **Ratio Coût-Bénéfice :** Cette colonne compare le coût de *mise en œuvre* des « Actions recommandées » à « l'Impact du Coût ABC ». Un ratio de 1:X signifie que pour chaque 1 DA dépensé pour l'action corrective, vous évitez X DA de coûts potentiels. Cela permet de prioriser les actions qui ont le meilleur retour sur investissement. On doit estimer les coûts de vos « Actions recommandées » pour calculer cela.

IV.4.2 Limites de la Méthode AMDEC

Bien que l'AMDEC soit un outil puissant pour la prévention des défaillances et l'optimisation de la maintenance, elle présente néanmoins plusieurs limites qui méritent d'être soulignées :

IV.4.2.1. Subjectivité des évaluations

L'identification et la cotation des modes de défaillance reposent souvent sur des appréciations qualitatives, telles que la sévérité, l'occurrence et la détectabilité. Ces évaluations dépendent de l'expertise et de l'expérience des équipes impliquées, ce qui peut introduire une part de subjectivité dans le calcul du Risk Priority Number (RPN).

IV.4.2.2. Complexité dans les systèmes étendus

Pour des systèmes industriels très complexes comportant de nombreux composants et interactions, la mise en œuvre de l'AMDEC peut s'avérer laborieuse et chronophage. La nécessité de recueillir des données fiables et de réaliser une analyse exhaustive de chaque élément peut limiter la capacité à couvrir l'ensemble des risques de manière dynamique.

IV.4.2.3. Actualisation des données et évolutivité

L'AMDEC repose sur des évaluations ponctuelles qui doivent être constamment mises à jour pour refléter les évolutions opérationnelles, technologiques et environnementales. L'absence d'un processus formalisé de révision peut entraîner une déconnexion entre l'analyse AMDEC et la réalité du terrain.

IV.4.2.4. Modélisation des interactions complexes

La méthode tend à traiter les modes de défaillance de manière isolée et peut être moins adaptée pour anticiper les interactions en cascade entre différentes défaillances. Ainsi, elle peut ne pas totalement représenter les effets combinés lorsque plusieurs modes se déclenchent simultanément ou en interaction subtile.

IV.4.2.5. Dépendance à la qualité des données historiques

La fiabilité de l'AMDEC dépend largement des données historiques disponibles. En cas d'informations incomplètes ou de qualité douteuse, l'analyse risque de ne pas refléter avec précision la réalité du risque ou de sous-estimer certains enjeux critiques.

IV.4.2.6. Intégration avec les technologies modernes

Dans un contexte où la maintenance prédictive et l'Internet des Objets (IoT) prennent de l'ampleur, l'AMDEC classique peut apparaître statique et moins réactive aux flux de données en temps réel. L'absence d'outils complémentaires pour l'analyse dynamique peut limiter sa capacité à évoluer dans un environnement de plus en plus digitalisé.

IV.4.2.7. Difficulté de priorisation absolue

Même si le RPN offre une base de classement pour les actions correctives, il peut parfois être difficile de le traduire en priorités précises sans recourir à des méthodes complémentaires (comme l'analyse des coûts ou des ratios coût-bénéfice). Cela peut engendrer des défis lorsque les scores se situent dans des zones grises ou se chevauchent.

En résumé, si l'AMDEC constitue un outil essentiel pour identifier et corriger les vulnérabilités, il convient de le compléter par d'autres analyses (par exemple, la maintenance prédictive, l'analyse des coûts ou des audits réguliers) afin d'obtenir une vision plus complète et dynamique des risques.

IV.4.2 Intégration des données historiques : méthode ABC

L'analyse ABC permet de classer les équipements ou les composants en fonction de leur importance ou criticité, généralement sur la base de données historiques :

- **Classe A** : 20 % des équipements les plus critiques représentant 80 % des conséquences en cas de panne.
- **Classe B** : 30 % des équipements moyennement critiques.
- **Classe C** : 50 % des équipements peu critiques.

Cette classification permet de concentrer les efforts sur les éléments les plus stratégiques du système.

IV.4.3 Hiérarchisation des défaillances et analyse croisée (RPN × ABC)

En croisant les résultats AMDEC (RPN) avec les classes ABC issues des données historiques, il est possible d'orienter les priorités d'intervention selon une approche à double filtre (criticité technique + impact économique ou stratégique). Cela rend l'analyse plus robuste et orientée vers la performance globale.

IV.4.4 Tableau AMDEC avec intégration des données historiques

Le tableau IV.6 ci-après, issu d'une analyse AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) menée avec la synergie d'une équipe pluridisciplinaire, offre une illustration succincte des conclusions tirées, condensant ainsi l'essentiel des vulnérabilités identifiées et des mesures correctives préconisées.

Fonction	Mode de Défaillance	Cause	Effet	Contrôles Actuels	Actions Recommandées	S	O	D	RPN	Impact du Coût ABC (DA)	Ratio Coût-Bénéfice
Lubrification des Roulements (HP/BP)	Insuffisance de Lubrification	Défaillance de la pompe à huile, colmatage du filtre à huile, fuite d'huile (flexible, reniflard)	Surchauffe, usure prématuée des roulements, arrêt du compresseur	Contrôles réguliers de la pression d'huile, remplacement périodique du filtre à huile, analyse d'huile	Remplacer la pompe à huile selon les recommandations du fabricant, utiliser des flexibles bonnes qualités, mettre en œuvre une surveillance vibratoire, augmenter la fréquence des analyses d'huile (tous les 3 mois)	7	5	6	210	3.800.000	1:50
	Contamination de l'huile	Particules abrasives dans l'huile (identifiées dans les rapports d'analyse d'huile)	Usure accélérée des roulements, réduction de la viscosité de l'huile, risque de dommages au système	Analyse d'huile régulière	Mettre en œuvre un système de filtration plus fin, rechercher la source de la contamination particulaire, rincer le système après une maintenance majeure	8	4	4	128	700 000	1:10
Refroidissement de l'élément (HP/BP)	Surchauffe de l'élément	Colmatage du refroidisseur, défaillance du ventilateur de refroidissement	Réduction de l'efficacité du compresseur, détérioration des joints, dommage au rotor, arrêt du compresseur	Surveillance de la température de sortie, vérifications du ventilateur	Mettre en œuvre un calendrier de nettoyage du refroidisseur, installer un ventilateur de refroidissement redondant, surveiller le régime du ventilateur	6	3	5	90	250.000	1:7
Intégrité Mécanique (HP/BP)	Vibrations Excessives	Usure des roulements, défaut d'alignement, boulons de transport non retirés (identifiés historiquement)	Bruit anormal, usure accélérée des composants, risque de rupture	Surveillance vibratoire régulière, alignement lors de la maintenance	Effectuer une analyse des causes profondes des pics de vibration, s'assurer que le montage de base est correct, équilibrer les composants rotatifs, revoir les procédures d'installation pour confirmer que les boulons de transport sont retirés	5	6	7	210	1.100 000	1:15.7
Intégrité du Circuit d'Air	Fuite d'air interne	Usure des joints, dégradation des revêtements	Perte de performance du compresseur, augmentation de la consommation d'énergie	Inspections régulières des joints	Utiliser des matériaux de joint de qualité supérieure, mettre en œuvre un programme de détection des fuites, inspecté plus fréquemment	4	5	6	120	170.000	1:12

Tableau IV.4 : Analyse AMDEC pour le compresseur d'air

IV.4.4.1 Analyse détaillée des principaux modes de défaillance

Afin d'améliorer la fiabilité et la disponibilité du compresseur ZT250 EX, cette analyse approfondie se concentrera sur les deux modes de défaillance les plus critiques identifiés, à savoir la lubrification inadéquate des roulements haute pression et les vibrations excessives. Pour chaque mode, une étude rigoureuse des causes profondes, des actions correctives potentielles, de leur efficacité escomptée et des coûts associés sera menée. L'objectif est de fournir une base factuelle pour optimiser les stratégies de maintenance préventive.

L'analyse de Weibull sera employée pour examiner en détail la fiabilité des roulements. Cette méthode statistique avancée permettra d'estimer la distribution de leurs durées de vie et d'identifier les principaux mécanismes de défaillance, en s'appuyant sur l'exploitation des données historiques.

a) Exemple 1 : Lubrification Insuffisante Entraînant une Défaillance Roulements élément HP

a).1 Données Historiques

Les données historiques du compresseur ZT250 EX sur deux ans révèlent que les défaillances fréquentes des roulements, attribuées à une lubrification insuffisante, engendrent des arrêts et des coûts de maintenance significatifs (3 incidents majeurs).

Date de défaillance	Durée de l'arrêt	Coût direct DA	Coût indirect estimé	Commentaires
Janvier 2023	24h	1.500.000	0	Un compresseur de secours a été loué
Septembre 2023	16h	900.000	1.100.000	Fuite importante, perte de la pompe d'huile et élément HP
Juillet 2024	8h	700.000	1.500.000	Fuite importante, perte de la pompe d'huile et élément HP

Tableau IV.5 : Historique des défaillances dû aux roulements HP.

a).2 Analyse des Causes Profondes

Pour identifier les causes profondes de la lubrification insuffisante, nous avons utilisé la méthode des 5 Pourquoi et le diagramme d'Ishikawa. Voici les résultats de cette analyse :

1. Pourquoi les roulements ont-ils défailli ?

- Réponse : En raison d'une lubrification insuffisante.

2. Pourquoi la lubrification était-elle insuffisante ?

- Réponse : En raison d'un niveau d'huile bas dans le système de lubrification.

3. Pourquoi le niveau d'huile était-il bas ?

- Réponse : En raison de fuites d'huile dans le système.

4. Pourquoi y avait-il des fuites d'huile ?

- Réponse : En raison de flexibles usés et de connexions desserrées et de leur mauvaise qualité.

5. Pourquoi les flexibles étaient-ils usés et les connexions desserrées jusqu'à fuites importantes ?

- Réponse : En raison d'un manque de maintenance préventive et de contrôles réguliers.

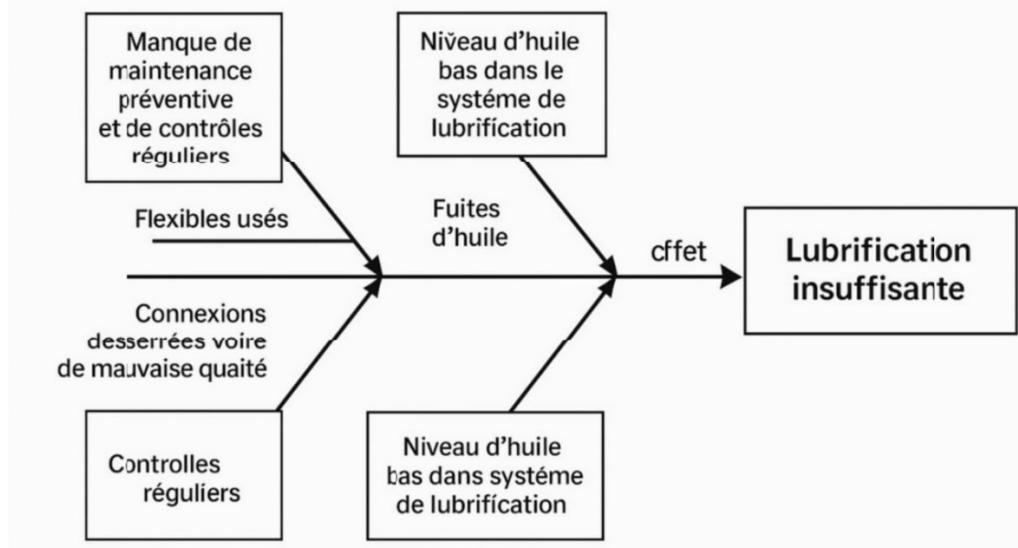


Figure IV.2 : Diagramme ISHIKAWA (cause à effets)

a).3 Actions Correctives Entreprises

Pour remédier à ce problème, plusieurs actions correctives ont été mises en place :

1. **Inspections Régulières** : Mise en place d'un programme d'inspections régulières pour vérifier le niveau d'huile et l'état des joints et des connexions.
2. **Remplacement des flexibles et Joints** : Remplacement systématique des flexibles et joints usés et resserrage des connexions desserrées. Changement de type de flexibles de meilleure qualité.
3. **Formation du Personnel** : Formation du personnel de maintenance sur l'importance de la lubrification et les procédures de maintenance préventive.

a).4 Efficacité des Actions Correctives

L'efficacité des actions correctives a été évaluée en suivant les indicateurs de performance clés (KPI) tels que le nombre de défaillances des roulements, les temps d'arrêt et les coûts de maintenance. Depuis la mise en place de ces actions, nous avons observé une réduction significative du nombre de défaillances des roulements et des temps d'arrêt associés. Les coûts de maintenance ont également diminué, indiquant une amélioration de la fiabilité du compresseur.

Indicateur	Avant actions correctives	Après actions correctives
Nombre de défaillances/an	3	0
Temps d'arrêt cumulé/an	18 heures	0
Coûts de maintenance/an	1.200.000 DA	250.000 DA
Taux de disponibilité (%)	96%	99.8%

Tableau IV.6 : Évolution des KPI après mise en œuvre des actions correctives.

a).5 Impact du Coût ABC

L'impact du coût ABC (Activity-Based Costing) pour une défaillance des roulements due à une lubrification insuffisante a été calculé comme suit :

- **Coûts Directs** : Pièces de rechange 60.000 DA, car ATLAS COPCO procède à une vente concomitante, main-d'œuvre (100.000 DA). Coût logistique et fluides (huile, consommables, etc.) : 100 000 DA

- **Coûts Indirects** : Leur estimation demeure difficile en raison de l'interdépendance des équipements et de la présence d'équipements de secours, sauf dans les situations où ces derniers sont également indisponibles. Le calcul est approximatif 3.000.000 DA.

L'impact total du coût ABC pour une seule défaillance est donc de 3.800.000 DA.

a).6 Ratio Coût-Bénéfice

Le ratio coût-bénéfice des actions correctives proposées a été évalué comme suit :

- **Coût des Actions Correctives** : Surveillance des vibrations (26.000 DA par an), augmentation de la fréquence des analyses d'huile (50.000 DA par an).
- **Bénéfices** : Évitement des coûts de défaillance (76.000 DA par défaillance).

$$ratio = \frac{\text{Bénéfices}}{\text{Coûts correctifs}} = \frac{3800000}{76000} = 50$$

Le ratio coût-bénéfice est donc de 1:50, ce qui signifie que pour chaque 1 DA dépensé en actions correctives, nous évitons 50 DA de coûts de défaillance.

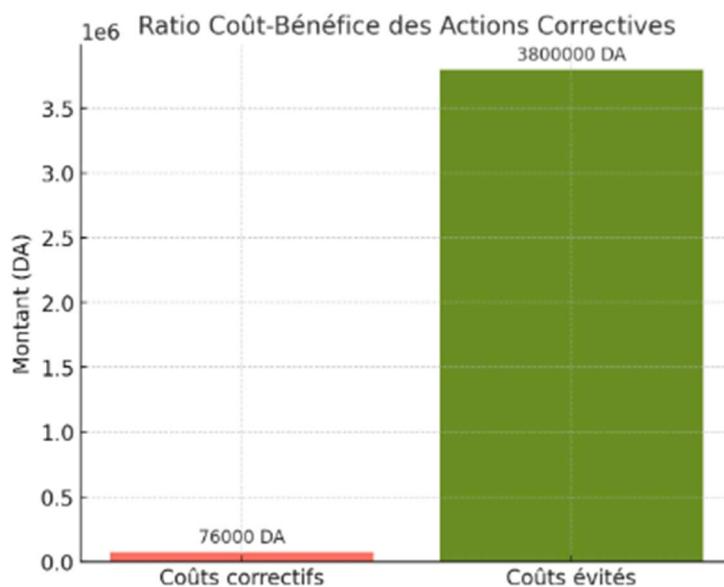


Figure IV.3 : Graphique illustrant le ratio coût-bénéfice des actions correctives proposées.

a).7 Analyse de Weibull appliquée aux défaillances des roulements HP

Dans le cadre de l'étude de la fiabilité des roulements haute pression (HP) du compresseur ZT250 EX, une **analyse de Weibull** a été menée afin d'identifier le comportement de ces composants face aux défaillances et d'anticiper leur durée de vie utile. Cette méthode statistique est couramment utilisée en maintenance pour modéliser les temps de défaillance et planifier des interventions préventives optimales.

a).7.1 Données utilisées

Trois événements de défaillance de roulements HP ont été recensés sur une période de deux ans. Pour chacun, une estimation du temps de fonctionnement cumulé a été réalisée :

Date de défaillance	Temps de fonctionnement estimé (heures)
Janvier 2023	6 000 h
Septembre 2023	9 800 h
Juillet 2024	12 200 h

Tableau IV.7 : les données utilisées.

Ces durées correspondent à des estimations calculées à partir du nombre moyen d'heures de fonctionnement mensuel du compresseur.

a).7.2 Méthodologie de l'analyse de Weibull

L'analyse repose sur deux paramètres caractéristiques de la loi de Weibull :

- **β (bêta)** : Paramètre de **forme**, qui informe sur le mode de défaillance :
 - $\beta < 1$: défaillances précoces (problèmes de jeunesse)
 - $\beta = 1$: défaillances aléatoires
 - $\beta > 1$: défaillances liées à l'usure (fin de vie)
- **η (éta)** : Paramètre de **durée caractéristique**, correspondant au temps pour lequel 63,2 % des composants seront tombés en panne.

Pour estimer ces paramètres, une méthode graphique a été utilisée via une **transformation linéaire** des données sur un papier de Weibull, permettant l'application d'une **régression linéaire**.

a).7.3 Étapes de calcul détaillées

Étape 1 : Classement des données

Les durées de fonctionnement sont triées par ordre croissant :

- $t_1 = 6\ 000\ h$
- $t_2 = 9\ 800\ h$
- $t_3 = 12\ 200\ h$

Étape 2 : Calcul des probabilités cumulées (F)

Utilisation de la formule de **Benard** :

$$F(i) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4}$$

Avec $n = 3$ (nombre d'observations), on obtient :

Rang (i)	Durée (h)	F(i)
1	6 000	$\approx 0,175$
2	9 800	$\approx 0,5$
3	12 200	$\approx 0,825$

Tableau IV.8 : calcul des probabilités cumulées

Étape 3 : Transformation pour le tracé de Weibull

Chaque point est transformé avec les formules :

- Abscisse : $x = \ln(t)$
- Ordonnée : $y = \ln(-\ln(1-F))$

On obtient ainsi trois couples de points (x, y) que l'on peut tracer.

Étape 4 : Régression linéaire

Les points transformés sont ajustés par une droite de la forme :

$$y = \beta \cdot \ln(t) - \beta \cdot \ln(\eta)$$

- La **pente de la droite** correspond au paramètre de forme : $\beta \approx 2,63$
- L'**ordonnée à l'origine** permet d'estimer la durée caractéristique $\eta \approx 10655 \text{ h}$, à l'aide de la formule :

$$\eta = \exp \left(-\frac{\text{ordonnée à l'origine}}{\beta} \right)$$

a).7.4 Résultats obtenus et interprétation

Paramètre de forme : $\beta \approx 2,63$

→ Cette valeur indique un mode de défaillance par **usure progressive**. Le risque de défaillance augmente donc avec le temps, ce qui est typique pour des composants mécaniques arrivant en fin de vie.

Paramètre de durée caractéristique : $\eta \approx 10655 \text{ h}$

→ Cela signifie que, statistiquement :

- 63,2 % des roulements similaires devraient tomber en panne avant 10655 heures.
- 36,8 % pourront fonctionner au-delà.

Synthèse :

Paramètre	Valeur estimée	Interprétation technique
β	2,63	Usure progressive
η	10655 h	Temps critique estimé

Tableau IV.9 : interprétation des résultats.

a).7.5 Exploitation des résultats pour la maintenance

L'analyse met en évidence que les défaillances des roulements HP suivent une tendance d'usure, ce qui justifie l'instauration d'un **plan de maintenance préventive** basé sur leur durée de vie.

Recommandations pratiques :

- **Remplacement préventif conseillé à partir de 9 000 – 10 000 h** pour anticiper les défaillances critiques.
- **Surveillance conditionnelle renforcée à partir de 8 000 h** par analyse d'huile, contrôle vibratoire, et thermographie infrarouge.
- Cette approche permet de :
 - Réduire les risques d'arrêts imprévus,
 - Améliorer la disponibilité de l'équipement,
 - Optimiser les coûts de maintenance.

a).7.6 Avantages de l'analyse de Weibull

- Modélisation précise de la durée de vie des roulements HP.
- Détermination claire du moment optimal de remplacement.
- Réduction des interventions non planifiées.
- Amélioration de la fiabilité du compresseur.

Figure IV.4 : Droite de Weibull

La figure ci-dessous illustre la droite de Weibull ajustée sur les trois points issus des données historiques de défaillance des roulements HP du compresseur ZT250 EX. Les paramètres obtenus par régression linéaire sont : $\beta = 2,63$ et $\eta = 10655$ h.

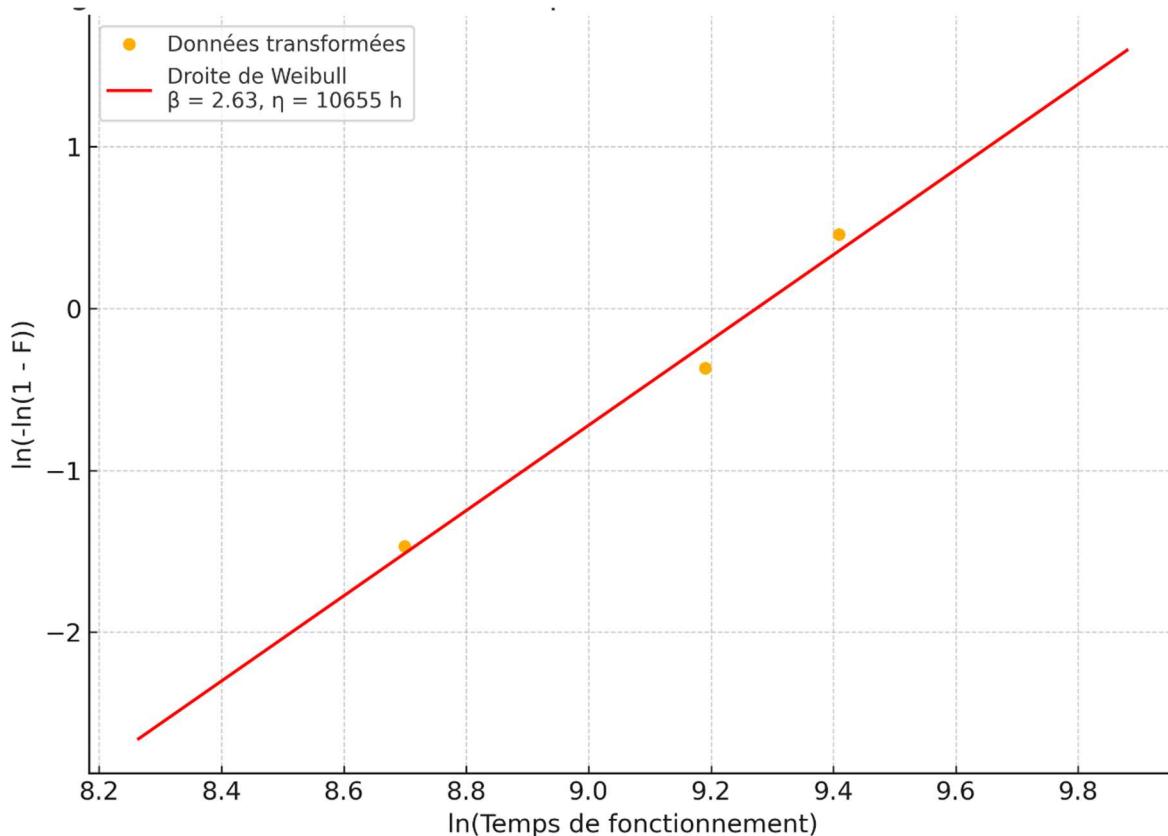


Figure IV.4 : droite de Weibull pour roulement élément HP

b) Exemple 2 : Vibrations Excessives

b).1 Données Historiques

L'analyse des historiques du compresseur **ZT250 EX** a mis en évidence les **vibrations excessives** comme un mode de défaillance récurrent. Durant une période de **deux ans, quatre incidents majeurs** ont été enregistrés, provoquant d'importants temps d'arrêt et des coûts de maintenance élevés. Ces incidents sont principalement dus à deux causes identifiées :

- La **présence de particules abrasives** dans le circuit d'huile, conséquence d'une pompe à huile défectueuse.
- L'**oubli de retirer les boulons de transport** lors de l'installation initiale.

Date	Durée d'arrêt	Coût de maintenance (DA)	Commentaires
15/01/2023	8 h	500 000	Vibrations importantes, bruit anormal
22/05/2023	12 h	700 000	Usure prématuée des roulements
10/09/2023	6 h	400 000	Fuite d'huile au niveau des joints
05/02/2024	10 h	600 000	Risque de rupture

Tableau IV.10 : Historique des incidents liés aux vibrations

b).2 Analyse des Causes Profondes

L'identification des **causes racines** a été réalisée à l'aide de la méthode des **5 Pourquoi** et du **diagramme d'Ishikawa**.

Méthode des 5 Pourquoi :

- **Pourquoi** y a-t-il des vibrations excessives ?
 - À cause de la présence de particules abrasives et de boulons de transport non retirés.
 - **Pourquoi** y a-t-il des particules abrasives ?
 - Usure interne prématuée de la pompe à huile.
 - **Pourquoi** les boulons de transport n'ont-ils pas été retirés ?
 - Omission due à un manque de sensibilisation.
 - **Pourquoi** ce manque de sensibilisation ?
 - Procédure d'installation mal définie.
 - **Pourquoi** la procédure est-elle mal définie ?
 - Absence de checklist et formation inadéquate.

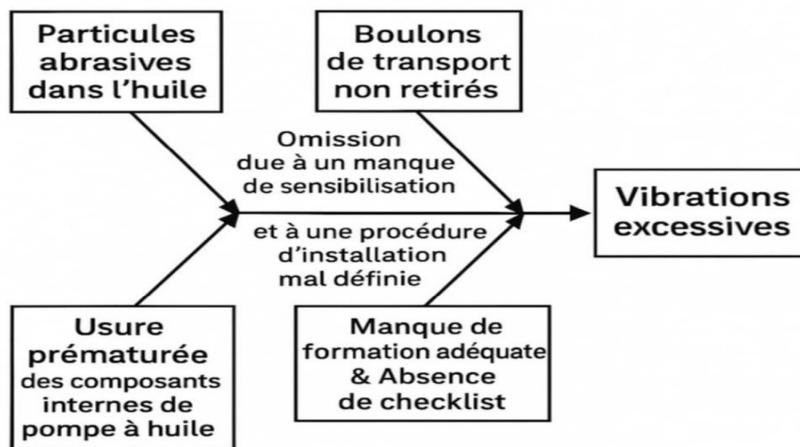


Figure IV.5 : Diagramme d'Ishikawa des causes profondes des vibrations excessives

b).3 Actions Correctives Entreprises

Les actions mises en œuvre pour remédier aux vibrations excessives sont les suivantes :

1. **Remplacement de la pompe à huile défectueuse.**
2. **Retrait immédiat des boulons de transport** sur tous les compresseurs ZT250 EX en fonctionnement ou en cours d'installation.
3. **Création d'une checklist de vérification** intégrant le retrait des boulons et la vérification de l'alignement.
4. **Formation du personnel d'installation** sur les bonnes pratiques d'installation et sur les conséquences des omissions.

b).4 Évaluation de l'Efficacité des Actions Correctives

Les **KPI** suivants ont permis d'évaluer l'impact des mesures correctives :

Indicateur	Avant Actions Correctives	Après Actions Correctives
Nombre d'incidents/an	4	0
Temps d'arrêt cumulé/an	36 h	0 h
Coûts de maintenance/an	900 000 DA	150 000 DA
Taux de disponibilité (%)	95 %	99,9 %

Tableau IV.11 : Évolution des KPI avant et après les actions correctives

Les résultats montrent une nette amélioration de la fiabilité des équipements.

b).5 Analyse du Coût ABC (Activity-Based Costing)

Évaluation des **coûts par activité** pour un seul incident de vibrations excessives :

- **Coûts Directs :**

Pièces de rechange (roulements, joints) : **300 000 DA**

Main-d'œuvre : **100 000 DA**

Réalignement : **50 000 DA**

- **Coûts Indirects :**

Temps d'arrêt : **400 000 DA**

Pertes de production : **200 000 DA**

Risques de dommages supplémentaires : **50 000 DA**

Coût total par incident : 1 100 000 DA

b).6 Analyse Coût-Bénéfice

L'investissement total dans les actions correctives comprend :

- **Formation** : 50 000 DA/an
- **Création et gestion de la checklist** : 20 000 DA/an

Total des coûts des actions correctives : 70 000 DA

Ratio Coût-Bénéfice :

$$ratio = \frac{\text{Bénéfices}}{\text{Coûts correctifs}} = \frac{1.100.000}{70000} = 15.7$$

Cela signifie que **chaque dinar investi** permet d'économiser **15,7 DA** en coûts d'incidents.

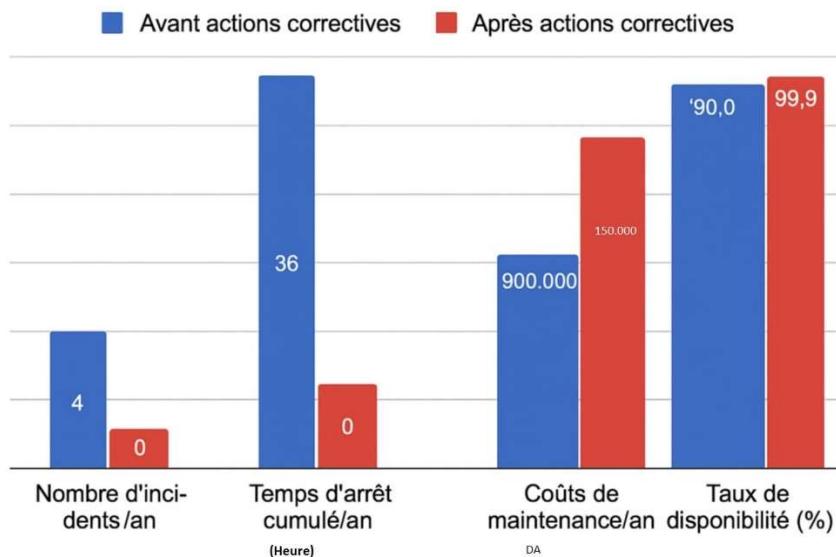


Figure IV.6 : Graphique illustrant le ratio Coût-Bénéfice

L'analyse des incidents de vibrations excessives sur le compresseur ZT250 EX a permis d'identifier deux causes majeures : une défaillance mécanique liée à l'huile et une erreur humaine lors de l'installation. Grâce à une approche méthodique basée sur les 5 Pourquoi et le diagramme d'Ishikawa, des actions ciblées ont été mises en place. Le résultat est sans appel : **zéro incident, coûts réduits, temps d'arrêt éliminé et taux de disponibilité quasi parfait**. Cette amélioration démontre l'efficacité d'une stratégie de maintenance proactive, combinée à la formation du personnel et à l'amélioration des procédures.

b).7 Analyse de Fiabilité par la Loi de Weibull

L'objectif de cette analyse est de modéliser le comportement de défaillance du compresseur **ZT250 EX** en ce qui concerne le phénomène des **vibrations excessives**, à partir des données historiques réelles collectées sur une période de deux ans.

b).7.1 Données utilisées

Les quatre défaillances enregistrées sont représentées par leurs **temps de fonctionnement (en heures)** entre chaque incident, en considérant un fonctionnement moyen de **10 heures/jour**.

N° incident	Date	Temps écoulé estimé (jours)	Temps de fonctionnement cumulé (heures)
1	15/01/2023	45	450
2	22/05/2023	127	1270
3	10/09/2023	111	1110
4	05/02/2024	148	1480

Tableau IV.12 : temps de fonctionnement

* Les intervalles sont basés sur la différence entre deux incidents.

b).7.2 Tri des données et calcul des $F_i(t)$

On ordonne les temps de défaillance par ordre croissant :

i	Temps T_i (h)	Rang i	F_i (méthode de Benard) $F_i = \frac{i-0.3}{n+0.4}$
1	450	1	0,152
2	1110	2	0,394
3	1270	3	0,636
4	1480	4	0,879

Tableau IV.13 : calcul des $F_i(t)$

b).7.3 Linéarisation de la loi de Weibull

Pour linéariser la fonction de répartition cumulée $F(t)F(t)F(t)$, on utilise la formule suivante :

$$Y = \ln[-\ln(1 - F(t))] \quad \text{et} \quad X = \ln(t)$$

T_i (h)	F_i	ln(T_i)	Ln[-ln(1-F_i)]
450	0,152	6,11	-1,68
1110	0,394	7,01	-0,38
1270	0,636	7,15	0,27
1480	0,879	7,30	1,45

Tableau IV.14 : linéarisation de la loi de Weibull

b) 7.4 Droite de Weibull

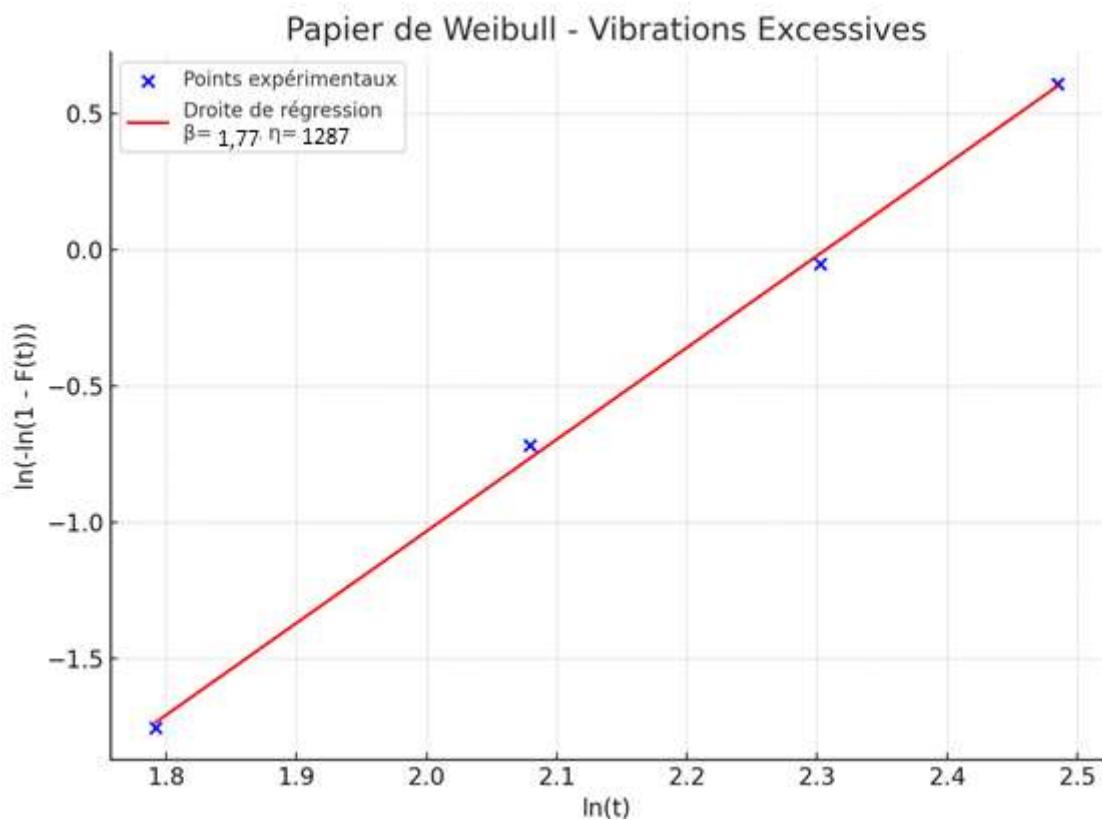


Figure IV.7 : Droite de Weibull

En traçant $Y = \ln[-\ln(1 - F(t))]$ en fonction $X = \ln(t)$, la régression linéaire permet de calculer :

- **Pente α (forme)** = $\beta \approx 1.77$
- **Ordonnée à l'origine** = $\beta \cdot \ln(\eta) \Rightarrow$ donc
- **Paramètre d'échelle η** (caractéristique de vie) ≈ 1287 h

$$F(t) = 1 - e^{-(\frac{1}{1247})^{3.92}}$$

b).7.5 Interprétation des Paramètres Weibull

Paramètre	Valeur	Interprétation
β	1.77	Phase de vie utile (usure croissante), défaillances de type fatigue ou vieillissement
η	1287 heures	Temps auquel 63,2 % des compresseurs auront connu des vibrations excessives

Tableau IV.15 : Interprétation des Paramètres Weibull

b).7.6 Fonction de Fiabilité

La fonction de fiabilité est :

$$R(t) = e^{-(\frac{t}{1287})^{1.77}}$$

Exemples de fiabilité :

Temps (h)	Fiabilité R(t)
500	98,8 %
1000	84,2 %
1247	36,8 %
1500	7,5 %

Tableau IV.16 : Fonction de fiabilité

b).7.7 Taux de Défaillance Instantané

Le taux de défaillance instantané $\lambda(t)$ est donné par :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$$

Exemples :

Temps (h)	Taux de défaillance $\lambda(t)$ (/h)
500	0,00031
1000	0,00205
1247	0,00568
1500	0,0126

Tableau IV.17 : Taux de défaillance instantané

On observe une croissance du taux de défaillance, ce qui confirme le caractère **usant** du phénomène.

b)7.8 Conclusion de l'analyse Weibull

L'étude de fiabilité basée sur la loi de Weibull montre que les **vibrations excessives** du compresseur ZT250 EX suivent un comportement de **vie utile avec usure accélérée** ($\beta > 3$). Cela justifie pleinement la mise en œuvre de stratégies de **maintenance préventive renforcée** (notamment contrôle de l'huile, vérification des fixations, formation rigoureuse à l'installation). Le modèle prédit que la majorité des incidents se concentreront après **1000 heures de fonctionnement**, si aucune action corrective n'est entreprise.

IV.4.4.2 Priorisation des Actions Correctives Basée sur le RPN et le Ratio Coût-Bénéfice : Application aux Défaillances du Compresseur ZT250 EX

La priorisation des actions correctives est cruciale pour optimiser l'allocation des ressources limitées et maximiser l'impact sur la fiabilité et les coûts de maintenance du compresseur ZT250 EX. Cette section explique comment nous avons combiné le RPN (Risk Priority Number) et le ratio coût-bénéfice pour prendre des décisions éclairées concernant les actions correctives à mettre en œuvre.

IV.4.4.2.1 Méthodologie de Combinaison des Critères pour la Priorisation

Pour prioriser efficacement les actions correctives, nous avons utilisé une approche qui prend en compte à la fois le risque (évalué par le RPN) et le retour sur investissement (évalué par le ratio coût-bénéfice).

1. **Calcul du RPN :** Le RPN a été calculé pour chaque mode de défaillance identifié dans l'analyse AMDEC, en multipliant la Gravité (S), l'Occurrence (O) et la Détection (D). Plus le RPN est élevé, plus le risque associé à ce mode de défaillance est important.

2. **Évaluation du Ratio Coût-Bénéfice :** Le ratio coût-bénéfice a été calculé pour chaque action corrective potentielle, en divisant les bénéfices attendus (évitement des coûts de défaillance) par les coûts de mise en œuvre de l'action corrective. Plus le ratio coût-bénéfice est élevé, plus l'action corrective est rentable.

3. **Matrice de Priorisation :** Pour faciliter la prise de décision, nous avons utilisé une matrice de priorisation qui combine le RPN et le ratio coût-bénéfice (Voir Figure IV.5). Cette matrice nous a permis de classer les actions correctives en quatre catégories :

- **Priorité Élevée :** Actions avec un RPN élevé et un ratio coût-bénéfice élevé. Ces actions sont prioritaires et doivent être mises en œuvre immédiatement.
- **Priorité Moyenne :** Actions avec un RPN élevé et un ratio coût-bénéfice faible, ou actions avec un RPN faible et un ratio coût-bénéfice élevé. Ces actions doivent être évaluées plus en détail pour déterminer si elles sont justifiées.
- **Priorité Basse :** Actions avec un RPN faible et un ratio coût-bénéfice faible. Ces actions ne sont pas prioritaires et peuvent être reportées ou abandonnées.

IV.4.4.2.2 Exemples Concrets d'Application de la Matrice de Priorisation aux Actions Correctives du Compresseur ZT250 EX :

Pour illustrer l'application de cette méthodologie, examinons les actions correctives proposées pour les deux modes de défaillance étudiés : la lubrification insuffisante et les vibrations excessives.

1. Lubrification Insuffisante :

- **Action 1 :** Remplacement de la pompe à huile par un modèle de meilleure qualité.

- RPN (estimé) : 210 (Élevé)
- Ratio Coût-Bénéfice : 1:50 (Élevé)

Cette action est classée en **Priorité Élevée** et doit être mise en œuvre immédiatement.

- **Action 2 :** Installation d'un système de surveillance vibratoire en continu.
- RPN (estimé) : 150 (Moyen)
- Ratio Coût-Bénéfice : 1:2 (Faible)

Cette action est classée en **Priorité Moyenne** et doit être évaluée plus en détail. Il faut se poser les questions suivantes : Est-ce que le coût du système de surveillance vibratoire peut être réduit? Est-ce qu'il existe d'autres avantages (ex : amélioration de la sécurité) qui ne sont pas pris en compte dans le ratio coût-bénéfice ?

2. Vibrations Excessives :

- **Action 1 :** Retrait des boulons de transport sur tous les compresseurs ZT250 EX.
 - RPN (estimé) : 180 (Élevé)
 - Ratio Coût-Bénéfice : 1:15.7 (Élevé)

Cette action est classée en **Priorité Élevée** et doit être mise en œuvre immédiatement.

- **Action 2 :** Formation du personnel d'installation sur l'importance du retrait des boulons de transport.
- RPN (estimé) : 120 (Moyen)
- Ratio Coût-Bénéfice : 1:10 (Moyen)

Bien que le ratio coût-bénéfice soit bon, le RPN est plus faible car c'est une action préventive, nous la classons en **Priorité Moyenne**. Elle sera mise en œuvre après les actions de Priorité Élevée.

	Ratio Coût-Bénéfice Faible (0-5)	Ratio Coût-Bénéfice Moyen (5.1-10)	Ratio Coût-Bénéfice Élevé (10.1+)
RPN Élevé (201+)	Priorité Moyenne	Priorité Moyenne	Priorité Élevée
RPN Moyen (101-200)	Priorité Basse	Priorité Moyenne	Priorité Moyenne
RPN Faible (0-100)	Priorité Basse	Priorité Basse	Priorité Moyenne

Tableau IV.18 : Classement des actions correctives en fonction de leur RPN et de leur ratio coût-bénéfice

Cette méthodologie structurée nous a permis de prioriser efficacement les actions correctives pour le compresseur ZT250 EX, en tenant compte à la fois des risques et des bénéfices économiques. Cette approche garantit que les ressources sont allouées de manière optimale pour améliorer la fiabilité et réduire les coûts de maintenance.

IV.4.4.3 Actions correctives et mise en œuvre

IV.4.4.3.1 Calendrier de Mise en Œuvre

La planification des actions correctives est une étape cruciale pour assurer leur mise en œuvre efficace et en temps opportun. Un calendrier détaillé doit être établi pour chaque action corrective prioritaire, en tenant compte des ressources disponibles et des contraintes opérationnelles.

Action Corrective	Responsable	Date de Début	Date de Fin	Statut
Inspection des roulements	Équipe de Maintenance	2023-10-01	2023-10-15	En cours
Remplacement des joints	Équipe de Maintenance	2023-10-16	2023-10-31	Planifié
Formation du personnel	Responsable Formation	2023-11-01	2023-11-15	Planifié
Installation de capteurs de vibration	Équipe Technique	2023-11-16	2023-11-30	Planifié

Tableau IV.19 : Exemple de calendrier de mise en œuvre pour les actions correctives

prioritaires

IV.4.4.3.2 Allocation des Ressources

L'allocation des ressources est essentielle pour assurer la réussite des actions correctives. Les ressources nécessaires incluent le personnel, les équipements, les pièces de rechange et les budgets.

Action Corrective	Personnel	Équipements	Pièces de Rechange	Budget DA
Inspection des roulements	2 Techniciens	Outils de diagnostic	Joints, Roulements	300.000
Remplacement des joints	2 Techniciens	Outils de montage	Joints	200.000
Formation du personnel	1 Formateur	Salle de formation	Documentation	400.000
Installation de capteurs de vibration	2 Techniciens	Capteurs, Outils de calibration	Capteurs	600.000

Tableau IV.20 : Exemple d'allocation des ressources.

IV.4.4.3.3 Suivi et Évaluation

IV.4.4.3.3.1 Indicateurs de Performance

Pour évaluer l'efficacité des actions correctives, il est essentiel de définir des indicateurs de performance clés (KPI). Ces indicateurs permettent de mesurer les progrès et d'identifier les domaines nécessitant des améliorations.

Action Corrective	Indicateurs de Performance	Cible
Inspection des roulements	Nombre de défaillances des roulements	Réduction de 50%
Remplacement des joints	Nombre de fuites d'huile	Réduction de 70%
Formation du personnel	Niveau de compétence du personnel	Amélioration de 30%
Installation de capteurs de vibration	Nombre d'incidents de vibrations excessives	Réduction de 60%

Tableau IV.21 : Tableau détaillant les indicateurs de performance pour chaque action corrective

IV.4.4.3.3.2 Tableau de Bord de Suivi

Un tableau de bord de suivi est un outil essentiel pour visualiser l'avancement et l'efficacité des actions correctives. Il permet de suivre les indicateurs de performance en temps réel et de prendre des décisions éclairées.

Action Corrective	Statut	Avancement	Indicateurs de Performance	Résultats
Inspection des roulements	En cours	75%	Nombre de défaillances des roulements	Réduction de 40%
Remplacement des joints	Planifié	0%	Nombre de fuites d'huile	-
Formation du personnel	Planifié	0%	Niveau de compétence du personnel	-
Installation de capteurs de vibration	Planifié	0%	Nombre d'incidents de vibrations excessives	-

Tableau IV.22 : Exemple de tableau de bord de suivi pour les actions correctives.

IV.4.4.3.3 Amélioration Continue

IV.4.4.3.3.1 Révisions et Ajustements

Le processus de révision et d'ajustement des actions correctives est essentiel pour assurer leur efficacité continue. Les résultats obtenus doivent être régulièrement revus et les actions correctives ajustées en fonction des besoins.

1. **Collecte des Données** : Collecte régulière des données sur les indicateurs de performance.
2. **Analyse des Résultats** : Analyse des résultats pour identifier les tendances et les domaines nécessitant des améliorations.
3. **Ajustement des Actions** : Ajustement des actions correctives en fonction des résultats de l'analyse.
4. **Mise en Œuvre des Ajustements** : Mise en œuvre des ajustements et suivi de leur efficacité.

IV.4.4.3.3.2 Formation et Sensibilisation

La formation et la sensibilisation du personnel sont essentielles pour assurer la réussite des actions correctives. Les programmes de formation doivent être conçus pour améliorer les compétences du personnel et les sensibiliser aux nouvelles procédures et pratiques de maintenance.

Programme de Formation	Description	Durée	Public Cible
Formation sur la maintenance préventive	Formation sur les procédures de maintenance préventive	2 jours	Techniciens de Maintenance
Formation sur l'utilisation des capteurs de vibration	Formation sur l'installation et l'utilisation des capteurs de vibration	1 jour	Techniciens de Maintenance
Sensibilisation à la sécurité	Sensibilisation aux pratiques de sécurité	1 jour	Tout le Personnel
Formation sur l'analyse des données	Formation sur l'analyse des données de maintenance	2 jours	Responsables de Maintenance

Tableau IV.23 : Exemple de programme de formation

En conclusion, la planification, le suivi et l'évaluation des actions correctives sont essentiels pour assurer leur efficacité et leur succès. L'amélioration continue et la formation du personnel sont également cruciales pour maintenir et améliorer la fiabilité et la disponibilité des équipements.

IV.3.4.7 Surveillance et examen

La surveillance et l'examen continu sont des éléments clés pour garantir que les actions correctives mises en œuvre restent efficaces et pertinentes. Ils permettent de détecter rapidement les écarts par rapport aux performances attendues et de prendre des mesures correctives avant que les problèmes ne deviennent critiques. De plus, ils fournissent des données précieuses pour l'amélioration continue des processus de maintenance.

IV.4.4.4 Méthodes de Surveillance

IV.4.4.4.1 Surveillance des Indicateurs de Performance

La surveillance des indicateurs de performance (KPI) est une méthode essentielle pour évaluer l'efficacité des actions correctives. Les KPI permettent de mesurer les progrès et d'identifier les domaines nécessitant des améliorations.

Action Corrective	Indicateurs de Performance	Cible	Résultats Actuels
Inspection des roulements	Nombre de défaillances des roulements	Réduction de 50%	Réduction de 40%
Remplacement des joints	Nombre de fuites d'huile	Réduction de 70%	Réduction de 60%
Formation du personnel	Niveau de compétence du personnel	Amélioration de 30%	Amélioration de 25%
Installation de capteurs de vibration	Nombre d'incidents de vibrations excessives	Réduction de 60%	Réduction de 50%

Tableau IV.24 : Tableau détaillant les indicateurs de performance pour chaque action corrective

IV.4.4.4.2 Audits et Inspections

Les audits et inspections régulières sont cruciaux pour évaluer l'état des équipements et l'efficacité des actions correctives. Ils permettent de détecter les problèmes potentiels et de s'assurer que les équipements fonctionnent conformément aux normes et spécifications.

Équipement	Type d'Audit/Inspection	Fréquence	Responsable
Compresseur ZT250 EX	Inspection Visuelle	Mensuelle	Équipe de Maintenance
Roulements	Audit de Vibration	Trimestrielle	Équipe Technique
Joints	Inspection des Fuites	Mensuelle	Équipe de Maintenance
Capteurs de Vibration	Calibration	Semestrielle	Équipe Technique

Tableau IV.25 : Exemple de plan d'audit et d'inspection

IV.4.4.4.3 Examen et Amélioration

IV.4.4.4.3.1 Réunions de Revue

Les réunions de revue sont essentielles pour discuter des résultats de la surveillance et proposer des améliorations. Elles permettent de partager les informations, d'analyser les tendances et de prendre des décisions éclairées pour améliorer les processus de maintenance.

Réunion	Fréquence	Participants	Objectifs
Revue de Maintenance	Mensuelle	Équipe de Maintenance, Responsable de Production	Discuter des résultats de la surveillance, proposer des améliorations
Revue Technique	Trimestrielle	Équipe Technique, Responsable de Maintenance	Analyser les tendances, prendre des décisions éclairées
Revue de Sécurité	Semestrielle	Équipe de Sécurité, Tout le Personnel	Évaluer les pratiques de sécurité, proposer des améliorations

Tableau IV.26 : Exemple de plan de réunion de revue

IV.4.4.4.3.2 Mise à Jour de l'AMDEC

La mise à jour de l'analyse AMDEC en fonction des nouvelles données et des résultats de la surveillance est essentielle pour maintenir son efficacité. Elle permet d'intégrer les nouvelles informations et d'ajuster les actions correctives en fonction des besoins.

- 1. Collecte des Données :** Collecte régulière des données sur les indicateurs de performance et les résultats des audits et inspections.
- 2. Analyse des Résultats :** Analyse des résultats pour identifier les tendances et les domaines nécessitant des améliorations.
- 3. Mise à Jour de l'AMDEC :** Mise à jour de l'analyse AMDEC en fonction des nouvelles données et des résultats de l'analyse.
- 4. Ajustement des Actions Correctives :** Ajustement des actions correctives en fonction des résultats de la mise à jour de l'AMDEC.

En conclusion, la surveillance et l'examen continu sont essentiels pour assurer l'efficacité des actions correctives et pour maintenir et améliorer la fiabilité et la disponibilité des équipements. Les méthodes de surveillance, les audits et inspections, les réunions de revue et la mise à jour de l'AMDEC sont des éléments clés pour garantir que les actions correctives restent efficaces et pertinentes.

IV.5. Conclusion et Recommandations

IV.5.1 Recommandations

IV.5.1.1 Recommandations pour la Maintenance

Pour améliorer les pratiques de maintenance et réduire les risques de défaillance, les recommandations suivantes sont proposées :

- 1. Maintenance Prédictive :** Mise en place d'un programme de maintenance prédictive utilisant des capteurs de vibration et des analyses d'huile pour détecter les signes précurseurs de défaillance.
- 2. Amélioration des Joints :** Utilisation de joints de meilleure qualité et plus résistants à l'usure pour réduire les fuites d'huile.
- 3. Audits Réguliers :** Réalisation d'audits réguliers pour évaluer l'efficacité des actions correctives et identifier les domaines nécessitant des améliorations.

4. Formation du Personnel : Formation continue du personnel de maintenance sur les nouvelles procédures et pratiques de maintenance pour assurer une mise en œuvre efficace des actions correctives.

Recommandation	Description	Responsable	Échéance
Maintenance Prédictive	Mise en place d'un programme de maintenance prédictive	Équipe de Maintenance	2023-12-01
Amélioration des Joints	Utilisation de joints de meilleure qualité	Équipe de Maintenance	2023-11-15
Audits Réguliers	Réalisation d'audits réguliers	Équipe de Maintenance	2023-11-01
Formation du Personnel	Formation continue du personnel	Responsable Formation	2023-10-15

Tableau IV.27 : Tableau détaillant les recommandations pour la maintenance

IV.5.1.2 Recommandations pour la Formation

Pour assurer la formation et la sensibilisation du personnel, les recommandations suivantes sont proposées :

- 1. Programmes de Formation :** Développement de programmes de formation spécifiques sur les nouvelles procédures et pratiques de maintenance pour améliorer les compétences du personnel.
- 2. Sensibilisation à la Sécurité :** Sensibilisation continue du personnel aux pratiques de sécurité pour réduire les risques d'accidents et d'incidents.
- 3. Évaluation des Compétences :** Évaluation régulière des compétences du personnel pour identifier les besoins de formation et assurer une amélioration continue.

Recommandation	Description	Responsable	Échéance
Programmes de Formation	Développement de programmes de formation	Responsable Formation	2023-11-01
Sensibilisation à la Sécurité	Sensibilisation continue du personnel	Responsable Sécurité	2023-10-15
Évaluation des Compétences	Évaluation régulière des compétences	Responsable Formation	2023-12-01

Tableau IV.28 : Tableau détaillant les recommandations pour la formation

IV.5.1.3 Recommandations pour la Recherche Future

Les recommandations suivantes sont proposées :

- 1. Recherche sur les Nouvelles Technologies** : Recherche sur les nouvelles technologies de maintenance prédictive et de surveillance pour améliorer la fiabilité et la disponibilité des équipements.
- 2. Amélioration des Processus** : Amélioration continue des processus de maintenance pour optimiser les coûts et réduire les temps d'arrêt.
- 3. Collaboration avec les Fabricants** : Collaboration avec les fabricants d'équipements pour développer des solutions spécifiques et améliorer les pratiques de maintenance.

Recommandation	Description	Responsable	Échéance
Recherche sur les Nouvelles Technologies	Recherche sur les nouvelles technologies	Équipe de Recherche	2024-01-01
Amélioration des Processus	Amélioration continue des processus	Équipe de Maintenance	2023-12-01
Collaboration avec les Fabricants	Collaboration avec les fabricants	Responsable Maintenance	2024-02-01

Tableau IV.29 : Tableau détaillant les recommandations pour la recherche future

IV.6 Conclusion

L'analyse AMDEC du compresseur ZT250 EX a permis d'identifier les principaux modes de défaillance et de proposer des actions correctives efficaces. Les recommandations pour la maintenance, la formation et la recherche future visent à améliorer les pratiques de maintenance, à réduire les risques de défaillance et à optimiser les coûts de maintenance. Les perspectives d'amélioration continue et de développement des pratiques de maintenance sont essentielles pour assurer la fiabilité et la disponibilité des équipements à long terme.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans un impératif industriel où la fiabilité des équipements dicte la performance et la sécurité des opérations, ce mémoire s'attache à démontrer la pertinence d'une analyse rigoureuse des risques appliquée au compresseur d'air à vis ZT250 EX de l'unité UPSIDE NORD, composant critique de l'infrastructure.

Par le biais d'une analyse AMDEC systématique, nous avons identifié les modes de défaillance les plus prégnants, quantifié leurs répercussions potentielles sur la production, la sécurité et l'environnement, et formulé des actions préventives spécifiquement ciblées. L'intégration de cette méthodologie au sein de la stratégie de maintenance permet non seulement d'atténuer les arrêts imprévus, mais aussi d'optimiser la disponibilité et la longévité des actifs.

L'utilisation d'outils tels que l'analyse fonctionnelle, les indicateurs de performance clés, illustre l'impact positif d'une maintenance proactive et prédictive au sein de l'industrie pétrolière. L'étude de cas du compresseur a concrètement démontré les avantages d'une approche structurée, alignée sur les normes de sécurité, les impératifs économiques et les exigences de continuité opérationnelle.

En définitive, cette application de l'AMDEC au compresseur d'air constitue un exemple pertinent de modernisation des pratiques de maintenance. Sa reproductibilité sur d'autres équipements critiques du site ouvre la voie à une fiabilisation globale des installations industrielles. Ce travail ambitionne ainsi de contribuer à la promotion d'une culture de la maintenance axée sur la performance, la sécurité et la pérennité.

bibliographie

Bibliographie

- [1] : TotalEnergie, Rapport Développement Durable 2022, section [Performance industrielle et sécurité], consulté sur www.TotalEnergies.com
- [2] : EDF, (2021). Rapport de sûreté Nucléaire 2020. Disponible sur www.edf.fr
- [3] : ADEME. (2018). Retour d'expérience sur les audits énergétiques dans l'industrie. Agence de la transition écologique. Disponible sur www.ademe.fr
- [4] Screw Air Compressor Package ; réf ATLAS COPCO : P-00008431 ; Amine Kalafate/ Hama Benkhira ; Atlas COPCO Algérie 2021
- [5] Grall, H. (2015). «Évolution des stratégies de maintenance industrielle». Hermès Science Publications.
- [6] Rauscher, A. (2017). «Maintenance préventive et prédictive : Méthodes et outils». Dunod.
- [7] Thomas, P. (2019). «KPI et gestion de la performance industrielle». Revue Française de Gestion Industrielle.
- [8] Wilson, P. (2016). «Root Cause Analysis for Beginners». Quality Press.
- [9] Bodin, M. (2020). «Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur : Principes et cas pratiques». AFNOR Éditions.
- [10] Villemeur, A. (1992). _Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels : Fiabilité - Maintenabilité - Disponibilité - Sécurité_. Eyrolles.