

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Mohamed Cherif
Messaadia de Souk Ahras en



جامعة محمد الشريف مساعدي
سوق اهراس

FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE

présenté pour l'obtention du diplôme de Master

Analyse des causes Profondes de défaillance d'une chaîne de production

Fillière

Electromecanique

SPÉCIALITÉ

MAINTENANCE INDUSTRIELLE

Par

Chiahi Hamza/Benbenour khalel

Encadré par : Lakehal Abdelaziz

Mme Khammar Farida

M. Lakehal Abdelaziz

Mme Ghedjati Khadrouja

MCA Présidente

Pro Encadreur

MCB Examinatrice

Année universitaire 2025/2026

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir donné la force, la patience et la capacité de mener ce travail à son terme.

J'adresse mes sincères remerciements à mon encadreur, **M. le Professeur Lakehal Abdelaziz**, pour ses précieux conseils, sa disponibilité, son accompagnement et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je tiens également à remercier les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi au Département de Génie Mécanique pour son soutien et pour avoir mis à ma disposition un environnement favorable à la réalisation de ce projet.

Enfin, j'exprime ma profonde gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail et m'ont apporté leur aide, leurs encouragements et leur soutien tout au long de ce parcours.

Dédicace

Du fond du cœur, nous dédions ce modeste travail :

À nos chers parents, pour leur amour, leurs sacrifices, leurs encouragements et leur soutien constant tout au long de notre parcours. Nous leur exprimons notre profonde gratitude et leur souhaitons santé, bonheur et longue vie.

À la mémoire de la chère maman de l'une d'entre nous, qui restera à jamais présente dans nos cœurs. Que Dieu l'accueille dans Son immense miséricorde et lui accorde une place dans Son vaste Paradis. Qu'elle repose en paix.

À nos frères et sœurs, pour leur affection, leur compréhension et leurs encouragements.

À nos familles, pour leur confiance, leur soutien et leurs prières.

À nos amis(es), pour leur présence, leurs conseils et leur soutien moral durant toutes ces années d'études.

Enfin, nous dédions ce mémoire à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Résumé

Ce projet porte sur l'analyse des défaillances industrielles à travers une démarche systématique d'analyse des causes racines (RCFA). Après avoir posé les concepts fondamentaux de la défaillance (modes, causes, mécanismes, conséquences) et présenté la pyramide de la fiabilité, nous détaillons les outils méthodologiques tels que les 5 Pourquoi, l'arbre des causes, le diagramme d'Ishikawa (5M), l'AMDEC et l'arbre de défaillance (FTA). L'étude de cas est réalisée au sein de l'ENAP (unité de Souk-Ahras) sur un compresseur Atlas Copco GA 110, identifié comme critique par une analyse de Pareto. À partir des données de la GMAO, nous calculons les indicateurs de fiabilité (MTBF, MTTR, disponibilité) et menons une AMDEC puis une analyse RCFA pour remonter aux causes racines physiques, humaines et systémiques. Les actions correctives proposées visent à améliorer la disponibilité de l'équipement, réduire les coûts du cycle de vie et contribuer à une organisation apprenante.

Mots-clés : Défaillance, RCFA, Fiabilité, AMDEC, Arbre de défaillance, MTBF / MTTR, Compresseur, ENAP, Causes racines, Organisation apprenante

Abstract

This project focuses on industrial failure analysis through a systematic Root Cause Failure Analysis (RCFA) approach. After establishing the fundamental concepts of failure (modes, causes, mechanisms, consequences) and presenting the reliability pyramid, we detail methodological tools such as the 5 Whys, the Logic Tree, the Ishikawa diagram (5M), FMECA, and Fault Tree Analysis (FTA). The case study is conducted at ENAP (Souk-Ahras unit) on an Atlas Copco GA 110 compressor, identified as critical through a Pareto analysis. Using CMMS data, we calculate reliability indicators (MTBF, MTTR, availability) and perform an FMECA followed by an RCFA to trace back to physical, human, and latent root causes. The proposed corrective actions aim to improve equipment availability, reduce life cycle costs, and contribute to a learning organization.

Keywords : Failure, RCFA, Reliability, FMECA, Fault Tree Analysis, MTBF/MTTR, Compressor, ENAP, Root causes, Learning organization.

الملخص

يركز هذا المشروع على تحليل الأعطال الصناعية من خلال منهجية منظمة تعتمد على تحليل الأسباب الجذرية للأعطال (RCFA). بعد عرض المفاهيم الأساسية للعطل مثل أنماط الأعطال وأسبابها وآلياتها وعواقبها، بالإضافة إلى مفهوم هرم الموثوقية، تم التطرق إلى مجموعة من الأدوات المنهجية مثل طريقة "لماذا الخمسة"، شجرة الأسباب، مخطط إيشيكاوا (5M)، تحليل أنماط وأثار وحرجية الأعطال (AMDEC)، وكذلك شجرة الأعطال (FTA).

تمت دراسة حالة داخل المؤسسة الوطنية الجزائرية للدهانات (ENAP - وحدة سوق أهراس) على ضاغط من نوع أطلس كوبكو GA 110، والذي تم تحديده كجهاز حرج اعتمادًا على تحليل باريتو. وباعتماد على بيانات نظام التسيير المحسوب للصيانة (GMAO)، تم حساب مؤشرات الموثوقية (MTBF، MTTR، التوفر)، ثم إجراء تحليل AMDEC متبوعًا بمنهجية RCFA لتحديد الأسباب الجذرية المادية والبشرية والتنظيمية.

تهدف الإجراءات التصحيحية المقترحة إلى تحسين توفر المعدات، وتقليل تكاليف دورة الحياة، والمساهمة في بناء منظمة متعلمة.

الكلمات المفتاحية: العطل، RCFA، الموثوقية، AMDEC، شجرة الأعطال، MTBF/MTTR، ضاغط، ENAP، الأسباب الجذرية، منظمة متعلمة.

Table des matières

1	Concepts fondamentaux de la défaillance	2
1.1	Anatomie d’une défaillance	2
1.1.1	Définitions et concepts de base	2
1.1.2	Les Modes de défaillance	3
1.1.3	Causes de défaillance	3
1.1.4	Le mécanisme de défaillance	4
1.1.5	Les conséquences de la défaillance	8
1.2	La pyramide de la fiabilité : la relation entre les petits incidents et les pannes majeures	8
1.2.1	Origine et idée de la pyramide	8
1.2.2	Le RCFA comme outil de « descente » dans la pyramide	9
1.3	Les défis du RCFA (Root Cause Failure Analysis)	9
1.3.1	L’enjeu de la disponibilité : pour une fiabilité maximale	9
1.3.2	L’enjeu HSE	10
1.3.3	L’enjeu économique : la diminution du coût du cycle de vie (LCC)	10
1.3.4	Synthèse : la constitution d’une organisation apprenante	11
2	Méthodologie et Outils du RCFA	12
2.1	Les étapes du processus d’investigation	12
2.1.1	Phase de préservation (Collecte des preuves : les 5P)	12
2.1.2	Phase d’analyse (Remonter la chaîne de causalité)	15
2.1.3	Phase de remédiation (Actions correctives)	17
2.2	Analyse des 3 niveaux de causes	18
2.2.1	Les racines physiques (Physical Roots)	18
2.2.2	Causes humaines (Human Roots)	19
2.2.3	Causes racines / systémiques (Latent Roots)	20
2.3	Boîte à outils techniques de l’analyse RCFA	21
2.3.1	La méthode des “5 Pourquoi” (5 Whys)	21
2.3.2	L’Arbre des Causes (Logic Tree)	24
2.4	Le diagramme d’Ishikawa	26
2.4.1	Les 5 axes d’investigation (Règle des 5M)	26
2.4.2	Complémentarité avec l’Arbre des Causes	27
2.5	Méthode AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité)	28
2.5.1	Objectifs de la méthode AMDEC	28

2.5.2	Typologie de l'AMDEC	29
2.5.3	Démarche méthodologique de l'AMDEC	29
2.5.4	Évaluation de la criticité	30
2.5.5	Plan d'actions et exploitation des résultats	30
2.5.6	Avantages et limites de l'AMDEC	30
2.6	Définition et fondements de l'arbre de défaillance (Fault Tree Analysis – FTA)	31
2.6.1	Structure logique et représentation graphique	31
2.6.2	Portes logiques et formalisation mathématique	32
2.6.3	Notion de coupes minimales (Minimal Cut Sets)	32
2.6.4	Modélisation probabiliste et lois de défaillance	32
2.6.5	Indicateurs de performance et métriques de fiabilité	33
2.6.6	Concept d'événement initiateur	33
2.6.7	Domaines d'application	34
2.7	Conclusion	35
3	Présentation de l'Entreprise et Analyse de Pareto des Défaillances	36
3.1	Présentation de l'Entreprise Nationale Algérienne de Peintures (ENAP) . .	36
3.1.1	Historique	36
3.1.2	Objet social	36
3.2	Présentation de l'UPSA (Unité de Production de Souk-Ahras)	37
3.2.1	Situation géographique	37
3.2.2	Description générale	37
3.2.3	Fiche technique de l'entreprise	38
3.2.4	Quelques statistiques de l'année 2020	39
3.3	Définition et origine du principe de Pareto	39
3.4	Objectifs de l'analyse de Pareto en maintenance industrielle	40
3.4.1	Éviter la dispersion des efforts de maintenance	40
3.4.2	Identifier les composants critiques	40
3.4.3	Optimiser les coûts et la disponibilité des équipements	41
3.5	Présentation de l'équipement d'étude	41
3.5.1	Fiche d'identification et caractéristiques techniques	41
3.5.2	Description structurelle et fonctionnelle de la machine	42
3.5.3	Justification du choix de la machine	43
3.6	COLLECTE DES DONNÉES ET HISTORIQUE DES DÉFAILLANCES .	45
3.6.1	Extraction des données GMAO	45
3.7	Diagramme de Pareto des défaillances	50
3.7.1	Interprétation du diagramme de Pareto	51
3.7.2	Résultats de l'analyse de Pareto	52

3.8	Conclusion	53
4	Historique technique et contexte industriel du compresseur	55
4.1	Analyse détaillée de l'historique des interventions	56
4.2	Analyse du temps d'arrêt du compresseur	57
4.3	Effet des défaillances sur la chaîne de production	58
4.4	Structuration des données dans la GMAO	60
4.4.1	Arborescence fonctionnelle du compresseur	61
4.5	Analyse des indicateurs de fiabilité	61
4.5.1	Analyse du MTBF	61
4.5.2	Analyse du MTTR	62
4.5.3	Analyse de la disponibilité	63
4.6	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AM- DEC)	63
4.6.1	Principe de la méthode AMDEC	64
4.6.2	Tableau AMDEC du compresseur Atlas Copco GA 110	65
4.6.3	Interprétation des résultats AMDEC	65
4.6.4	Actions correctives proposées après l'AMDEC	66
4.7	Analyse RCFA (Root Cause Failure Analysis)	67

Table des figures

1.1	Concepte de l'anatomie de défaillance	2
1.2	La Courbe P-F	3
1.3	Effet d'usure sur un engrenage	4
1.4	Effet fretting corrosion	5
1.5	Effet de l'écaillage	5
1.6	Grippage d'un talon de vis d'extrusion	6
1.7	Usure par abrasion	6
1.8	Pompe centrifuge détruite par la cavitation	7
1.9	Les trois phases de l'usure mécanique	7
2.1	Les "5 Pourquoi"	23
2.2	L'Arbre des Causes	26
2.3	méthode des 5M d'Ishikawa	28
2.4	Schéma D'un arbre de défaillance	35
3.1	Organigramme structurel de l'ENAP – Unité de Production de Souk Ahras (UPSSA).	38
3.2	Comparaison entre les prévisions et les réalisations de production (en tonnes) par famille de produits de l'ENAP-UPSA durant l'année 2020.	39
3.3	Compresseur d'air industriel à vis lubrifié Atlas Copco GA110 : vue générale de face avec panneau de commande électronique touch.	42
3.4	Vue en coupe du compresseur Atlas Copco GA110 VCD+ illustrant l'architecture des sous-ensembles mécaniques.	44
3.5	Diagramme de Pareto des défaillances des compresseurs Atlas Copco GA110 : classement par temps d'arrêt cumulé et courbe des 80/20 au sein de l'ENAP-UPSA durant la période 2018–2023.	51

Liste des tableaux

2.1	Exemples d'actions de remédiation selon la cause racine	18
3.1	Caractéristiques techniques du compresseur GA 110	41
3.2	Tableau de synthèse des défaillances (Classé par ordre décroissant d'impact)	50
4.1	Historique des interventions de maintenance	57
4.2	AMDEC du compresseur Atlas Copco GA 110	65

Introduction générale

Dans tout environnement industriel, la défaillance d'un équipement n'est jamais un événement isolé ou purement aléatoire. Elle est le plus souvent le symptôme visible d'une chaîne de causes plus profonde, mêlant aspects physiques, humains et organisationnels. La maîtrise de la fiabilité devient alors un levier stratégique pour garantir la sécurité, la disponibilité des machines et la performance économique. C'est dans cette optique que s'inscrit ce projet, dont l'objectif central est de dépasser la simple réparation curative pour adopter une démarche rigoureuse d'analyse des causes racines (RCFA).

La première partie de ce travail est consacrée aux concepts fondamentaux de la défaillance. Nous y définissons l'anatomie d'une panne (mode, cause, mécanisme et conséquence) et introduisons la pyramide de la fiabilité, qui relie les micro-incidents quotidiens aux pannes majeures. Nous soulignons également les défis majeurs d'une telle analyse : enjeux de disponibilité, de sécurité (HSE), de réduction du coût du cycle de vie (LCC) et, in fine, la construction d'une organisation apprenante.

La seconde partie détaille la méthodologie et les outils du RCFA. Nous décrivons les trois phases clés de l'investigation (préservation, analyse, remédiation) et l'analyse des trois niveaux de causes : physiques, humaines et systémiques. Un panorama des techniques est présenté : les 5 Pourquoi, l'arbre des causes, le diagramme d'Ishikawa (5M), l'AMDEC (analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité) ainsi que l'arbre de défaillance (FTA) avec ses portes logiques et ses coupes minimales.

Cette approche méthodologique est ensuite appliquée à un cas industriel concret au sein de l'ENAP (Entreprise Nationale Algérienne de Peintures), plus précisément sur l'unité de production de Souk-Ahras (UPSA). Après une présentation de l'entreprise et de ses enjeux, nous réalisons une analyse de Pareto des défaillances à partir des données extraites de la GMAO. Cette analyse permet d'identifier l'équipement le plus critique : un compresseur Atlas Copco GA 110.

Enfin, la dernière partie se focalise sur l'étude approfondie de ce compresseur. À partir de son historique technique, nous calculons des indicateurs de fiabilité (MTBF, MTTR, disponibilité) puis menons successivement une AMDEC pour hiérarchiser les modes de défaillance selon leur criticité, et une analyse RCFA pour remonter jusqu'aux causes racines (latentes). L'objectif final est de proposer des actions correctives ciblées, permettant non seulement de réduire les arrêts de production, mais aussi d'améliorer durablement la performance globale de l'unité industrielle.

Chapitre 1

Concepts fondamentaux de la défaillance

1.1 Anatomie d'une défaillance

L'étude de la défaillance ne se limite pas à l'arrêt d'une machine ; elle implique de comprendre de façon

1.1.1 Définitions et concepts de base

La norme NF EN 13306 définit la défaillance comme l'altération ou la perte par un bien de sa capacité à remplir une fonction requise. Il faut distinguer plusieurs notions. La panne : C'est l'état d'un bien qui ne peut accomplir une fonction requise (état après défaillance)[1].

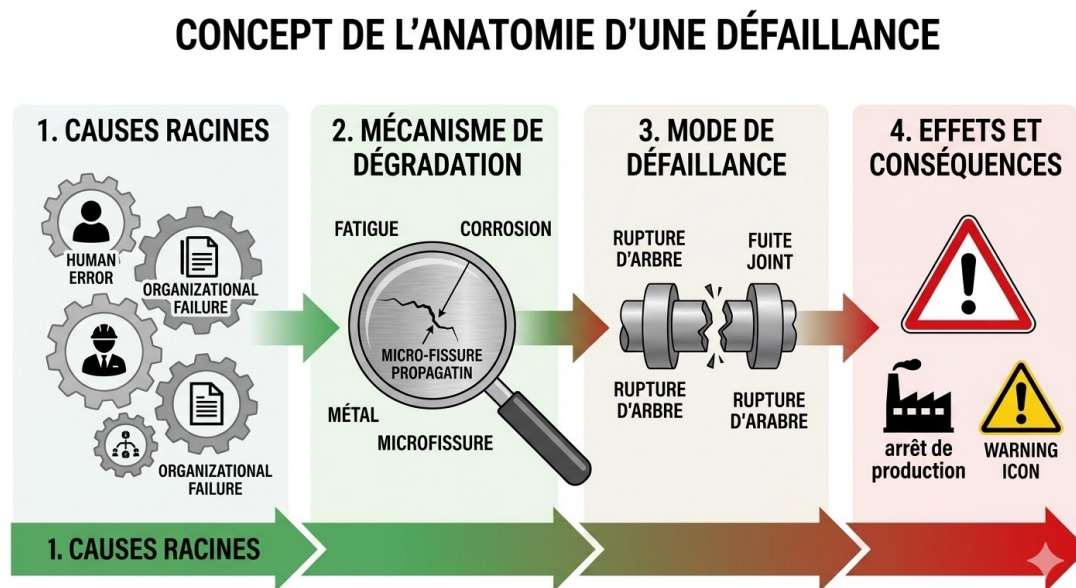


FIGURE 1.1 – Concepte de l'anatomie de défaillance
[2]

- Le défaut : Une anomalie susceptible ou non de provoquer un échec immédiat.
- La fonction demandée : Bien considéré comme nécessaire pour fournir un service donné, fonction ou ensemble de fonctions de ce bien.

1.1.2 Les Modes de défaillance

Le mode de défaillance est la façon dont on constate qu'un bien ne remplit plus sa fonction. C'est l'effet que l'on observe au niveau de l'entité.

— **Classification par manifestation :**

Défaillance soudaine : Apparaît de façon aléatoire (ex : rupture).

Défaillance progressive : Conséquence d'un affaiblissement continu (par exemple, usure, corrosion).

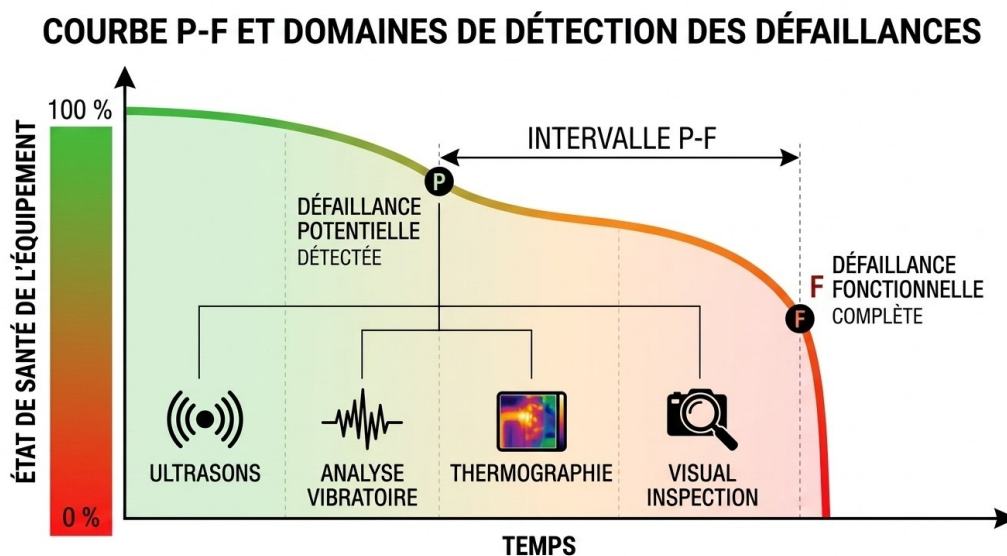


FIGURE 1.2 – La Courbe P-F
[3]

— **Classification selon l'impact :**

Partielle : Le bien fonctionne encore mais les performances sont dégradées.

Total : arrêt complet de la fonction. Exemples courants : rupture, fuite, échauffement excessif, vibration hors tolérance, court-circuit.[4]

1.1.3 Causes de défaillance

C'est l'événement ou le processus physique qui aboutit au mode de défaillance. Pour que le RCFA soit efficace, il faut distinguer trois niveaux de causes :

- **Causes physiques (directes) :** des facteurs matériels tels que la fatigue thermique, la cavitation dans une pompe ou l'érosion.
- **Causes humaines :** erreurs d'opération, mauvais montage ou diagnostic erroné.
- **Causes organisationnelles (racines) :** manque de formation, absence de procédures de graissage, ou choix de pièces de rechange de mauvaise qualité pour des raisons de budget.[4]

1.1.4 Le mécanisme de défaillance

Défaillances qui sont ou ont été causées par des processus physiques, chimiques ou autres.

Défaillances mécaniques liées à l'état de la matière :

Ce sont des défauts existant d'ores et déjà dans les pièces en service, et à l'origine d'initiations de défaillances lorsqu'ils ne sont pas détectés lors des contrôles de qualité. Les défauts peuvent apparaître au cours de l'élaboration de la pièce (forgeage, fonderie, etc.), au cours de la mise en forme de la pièce (usinage, soudures, traitements thermiques, etc.) et au cours du montage (ex : choc sur roulement).

Pannes mécaniques dues à l'usure des surfaces : fatigue et abrasion

- **L'usure** : c'est l'enlèvement progressif de matière à la surface des pièces d'un couple cinématique en glissement relatif.

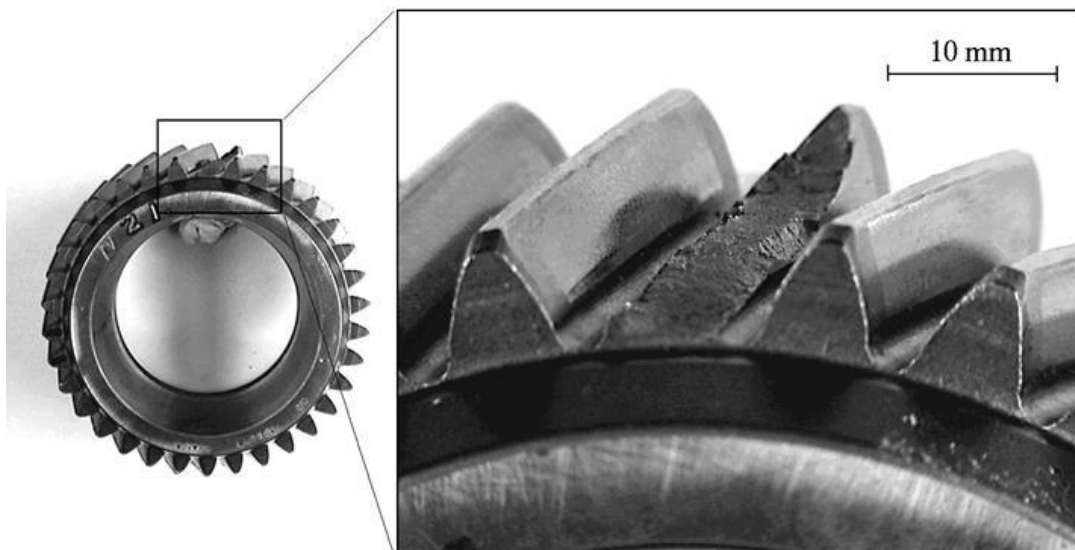


FIGURE 1.3 – Effet d'usure sur un engrenage

[5]

- **La fretting-corrosion** : ou usure par micro débattements est une usure particulière qui apparaît au contact de deux pièces qui restent à l'état statique, mais subissent de petits mouvements oscillants (par exemple des vibrations). C'est ce qui se passe pour les pièces frettées, les clavettes ou les roulements à l'arrêt prolongé.



FIGURE 1.4 – Effet fretting corrosion

- **L'écaillage** : c'est le détachement de « cales » assez grossières par fatigue de contact.



FIGURE 1.5 – Effet de l'écaillage

- **Le grippage** : c'est la soudure de grandes zones de surface de contact, avec déchirure massive de matière.



FIGURE 1.6 – Grippage d'un talon de vis d'extrusion

- **L'abrasion** : c'est l'action d'impuretés ou de déchets (poussières, sable, particules métalliques émises).



FIGURE 1.7 – Usure par abrasion

- **La cavitation** : implosion de microbulles de gaz non condensables sous l'action d'une chute brutale de pression dans un liquide.



FIGURE 1.8 – Pompe centrifuge détruite par la cavitation

- **L'érosion** : c'est l'arrachage de matière par l'impact d'un fluide ou de particules solides en suspension, ou par des phénomènes électriques (arcs).
- **Fatigue** : c'est quand une pièce a perdu toute résistance sous l'effet d'efforts alternés et répétés.
- **Fatigue thermique** : fatigue produite par des contraintes thermiques.
- **Frottement et usure** : dès lors que deux surfaces en contact ont un mouvement relatif, ce phénomène est inévitable.

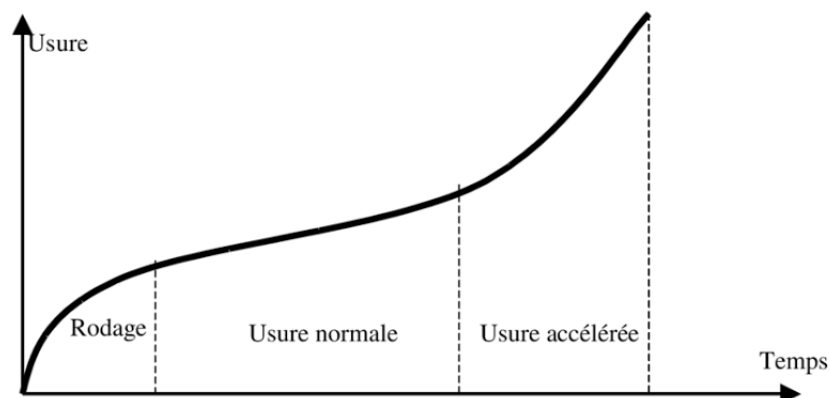


FIGURE 1.9 – Les trois phases de l'usure mécanique

1.1.5 Les conséquences de la défaillance

L'effet décrit les conséquences de la défaillance sur l'environnement, la sécurité, la production ou le bien lui-même.

- **Conséquences pour la production** : temps d'arrêt (downtime), perte de cadence, non-qualité des produits.
- **Conséquences économiques** : frais de réparation (main-d'œuvre et pièces), perte de chiffre d'affaires.
- **Conséquences pour la sécurité et l'environnement** : risque d'incendie, de pollution, de blessures du personnel (point critique pour les normes HSE en Algérie)[6].

1.2 La pyramide de la fiabilité : la relation entre les petits incidents et les pannes majeures

1.2.1 Origine et idée de la pyramide

La pyramide de la fiabilité est une reprise industrielle de la pyramide des accidents de Frank Bird. En maintenance industrielle, elle s'appuie sur l'idée statistique qu'une panne catastrophique est rarement un événement isolé. Elle est presque toujours le point culminant d'une série d'anomalies non traitées.

On peut diviser cette pyramide en quatre niveaux principaux, du plus fréquent (la base) au plus rare (le sommet) :

- **La base : les anomalies et les signaux faibles** **Définition** : fuites légères, vibrations anormales, échauffements modérés ou non-observance des règles de graissage. **Impact** : généralement invisibles dans les indicateurs de production immédiats, mais ils constituent la dégradation initiale des composants.
- **Niveau 2 : incidents mineurs et arrêts brefs** **Définition** : panne de quelques minutes (réarmement d'un disjoncteur, changement d'un capteur bouché). **Impact** : perturbent la production sans endommager gravement le matériel.
- **Niveau 3 : pannes importantes** **Définition** : panne nécessitant le remplacement de pièces critiques ou une intervention de plusieurs heures. **Impact** : influence directe sur le MTTR (temps moyen de réparation) et la disponibilité de l'unité.
- **Le sommet : la grande défaillance (catastrophe)** **Définition** : panne moteur, explosion, arrêt prolongé de l'usine. **Impact** : coûts de réparation élevés, risques graves pour la sécurité et l'environnement.

1.2.2 Le RCFA comme outil de « descente » dans la pyramide

C'est ici que votre sujet prend toute sa signification. Le RCFA (Root Cause Failure Analysis) permet d'interrompre ce cercle :

- **Analyse proactive** : plutôt que d'attendre le sommet de la pyramide, le RCFA peut être appliqué aux incidents répétitifs du niveau 2 afin d'éviter leur évolution vers le niveau 4.
- **Détection des causes cachées** : le RCFA cherche à comprendre pourquoi les inspections de maintenance préventive n'ont pas détecté les « signaux faibles ».

1.3 Les défis du RCFA (Root Cause Failure Analysis)

Mettre en œuvre le RCFA dans un service de maintenance ne se limite pas à résoudre des problèmes techniques. C'est un enjeu stratégique majeur, qui a un impact sur la performance globale de l'entreprise. Ces enjeux se déclinent autour de trois piliers : la disponibilité des équipements, la sécurité des biens et des personnes, et l'optimisation économique à travers le cycle de vie.

1.3.1 L'enjeu de la disponibilité : pour une fiabilité maximale

La disponibilité correspond au rapport entre le temps de marche requis et le temps de marche effective. Le RCFA agit directement sur les leviers de la performance opérationnelle :

- **Suppression de la répétition** : le RCFA vise la cause racine au lieu de traiter uniquement le symptôme comme le fait le dépannage traditionnel. En éliminant la source du problème, on évite les arrêts répétés et on stabilise la ligne de production.
- **Amélioration du MTBF (temps moyen entre pannes)** : En rendant les composants et les procédés d'assemblage plus fiables, le RCFA allonge l'intervalle moyen entre deux pannes. C'est le paramètre essentiel qui conditionne la réussite d'une démarche d'analyse de défaillance.
- **Réduction du MTTR (temps moyen de réparation)** : Grâce à la capitalisation des connaissances issues des analyses précédentes, les équipes de diagnostic peuvent intervenir plus rapidement. On répare plus efficacement une défaillance dont on connaît les causes.
- **Optimisation du TRS (Taux de Rendement Synthétique)** : En réduisant les arrêts non prévus, l'entreprise augmente sa capacité de production, ce qui lui permet de répondre aux commandes clients sans délais inattendus.

1.3.2 L'enjeu HSE

Dans le cadre d'un environnement industriel contemporain, la gestion des risques occupe une place centrale. Le RCFA est un outil de prévention essentiel à la sécurité.

- **Diminution de l'exposition au danger** : Les statistiques indiquent que la plupart des accidents du travail ont lieu lors des interventions de maintenance corrective urgentes. En diminuant le nombre d'avaries, on réduit mécaniquement le temps d'exposition des techniciens aux risques mécaniques ou électriques.
- **Prévention des désastres majeurs** : Le RCFA permet d'analyser les « signaux faibles » ou les incidents mineurs (base de la pyramide de Bird). En traitant ces incidents, on évite l'accumulation de conditions pouvant conduire à un accident grave ou à une explosion.
- **Intégrité écologique** : Le mauvais fonctionnement d'une machine peut provoquer des fuites de fluides toxiques, des émissions de gaz ou des pollutions de sols.

Le RCFA permet de concevoir des systèmes d'étanchéité et de contrôle plus robustes pour protéger l'écosystème autour de l'usine.

Climat social et confiance : Une machine fiable réduit le stress des opérateurs. L'analyse des causes apporte une transparence qui favorise une culture de responsabilisation plutôt qu'une recherche de coupables.

1.3.3 L'enjeu économique : la diminution du coût du cycle de vie (LCC)

Le facteur financier est souvent la principale motivation pour la mise en place d'un RCFA. Il s'agit de passer d'une logique de coût à une logique d'investissement.

- **Réduction des coûts directs de maintenance** :
 - **Consommables** : Les pièces ne sont plus remplacées au hasard. Chaque intervention est justifiée par une analyse technique.
 - **Travail** : Réduction significative du nombre d'heures supplémentaires liées aux interventions urgentes (nuit, week-end).
- **Réduction des pertes d'exploitation** : Une heure d'arrêt peut coûter plusieurs milliers d'euros. En améliorant la disponibilité des équipements, le RCFA permet de préserver la marge brute de l'entreprise.
- **Prolongation de la durée de vie des actifs** : Une machine dont les causes de défaillance sont traitées (vibrations, désalignement, lubrification inadéquate, etc.)

peut durer de 20% à 30% plus longtemps que prévu, ce qui retarde les investissements lourds.

- **Optimisation des stocks de pièces détachées :** Une meilleure connaissance de la fiabilité des composants permet d'ajuster les stocks au plus juste, libérant ainsi de la trésorerie.

1.3.4 Synthèse : la constitution d'une organisation apprenante

Le RCFA a également un impact organisationnel majeur. Il transforme le service maintenance en un centre d'expertise capable de :

- **Capitaliser le retour d'expérience (REX) :** Chaque panne analysée devient une leçon apprise, intégrée dans la mémoire de l'entreprise.
- **Concevoir pour la fiabilité (Design for Reliability) :** Les résultats du RCFA permettent d'éviter les erreurs de conception lors de l'acquisition de nouveaux équipements, en s'inscrivant dans une logique d'amélioration continue (cycle PDCA).

Chapitre 2

Méthodologie et Outils du RCFA

La RCFA (Root Cause Failure Analysis) est une approche structurée utilisée en maintenance pour identifier les causes profondes d'une défaillance, plutôt que de traiter uniquement ses symptômes. Elle vise à améliorer la fiabilité des équipements et à éviter la récurrence des pannes. La méthodologie repose sur la collecte de données, l'analyse causale et la mise en œuvre d'actions correctives durables. Parmi les outils utilisés figurent le diagramme d'Ishikawa, les 5 Pourquoi et l'analyse AMDEC. Ainsi, le RCFA constitue un levier essentiel pour l'optimisation de la maintenance industrielle et la performance des systèmes.

2.1 Les étapes du processus d'investigation

Le processus d'investigation dans le cadre du Root Cause Failure Analysis (RCFA) est une démarche structurée visant à identifier les causes profondes d'une défaillance industrielle afin d'éviter sa répétition. Ce processus ne se limite pas à la réparation de l'équipement défaillant, mais repose sur une analyse systématique des faits, des données et des conditions ayant conduit à l'incident.

La première étape de ce processus est la phase de préservation des preuves, qui constitue une base essentielle pour garantir la fiabilité de toute l'investigation.

Le processus RCFA comprend trois phases principales : la préservation des preuves, l'analyse des données et la remédiation. La phase de préservation consiste à sécuriser immédiatement toutes les preuves liées à l'incident afin d'éviter toute perte d'information. Elle est suivie de la phase de remédiation, qui vise à mettre en œuvre des actions correctives et préventives pour éliminer la cause racine et éviter la répétition de la défaillance.

2.1.1 Phase de préservation (Collecte des preuves : les 5P)

La phase de préservation constitue la première étape du processus d'investigation dans le cadre du Root Cause Failure Analysis (RCFA). Elle intervient immédiatement après la survenue d'un incident ou d'un quasi-accident et vise à garantir l'intégrité des preuves physiques, documentaires et contextuelles avant toute intervention de maintenance ou de remise en service. Cette étape est fondamentale car toute modification de l'état initial du

système peut entraîner une perte d'informations critiques et compromettre la fiabilité de l'analyse des causes racines. [7]

Dans cette phase, la zone de l'incident est d'abord sécurisée afin d'éviter toute perturbation supplémentaire. Ensuite, toutes les données pertinentes sont collectées et conservées dans leur état initial. Cette collecte inclut les composants mécaniques impliqués, la configuration exacte du système au moment de la défaillance, ainsi que les documents techniques associés tels que les procédures de maintenance, les rapports d'inspection et les analyses de risques. Les témoignages des opérateurs et des techniciens sont également recueillis afin de reconstituer la chronologie précise des événements.

Une fois cette orientation effectuée, la collecte des preuves est généralement structurée selon le modèle des 5P (Parts, Position, Paper, People, Paradigms). Cette approche permet d'assurer une couverture exhaustive des informations nécessaires à l'analyse. Elle est largement utilisée dans les méthodologies modernes de RCFA et de fiabilité industrielle, notamment dans les environnements à haut risque où la précision de l'analyse est essentielle. [7]

Pièces

La catégorie Parts concerne l'ensemble des éléments physiques impliqués directement ou indirectement dans l'incident. Cela inclut non seulement la pièce défaillante, mais également tous les composants associés pouvant avoir contribué à la défaillance.

L'objectif principal est de préserver l'intégrité matérielle du système avant toute réparation ou remplacement. Les pièces doivent être conservées dans leur état exact au moment de l'incident, sans modification ni manipulation excessive.

Dans une analyse RCFA, l'examen des pièces permet notamment :

- d'identifier les modes de défaillance (rupture, usure, déformation),
- de détecter des traces physiques (marques d'impact, frottement),
- de comparer les pièces défaillantes avec les pièces fonctionnelles.

Position

La Position correspond à la documentation précise de l'état spatial et mécanique des équipements au moment de l'incident. Cette étape est cruciale car la configuration géométrique d'un système peut expliquer une défaillance.

Elle inclut :

- la position exacte des équipements (avant et après incident),
- la relation entre les composants mobiles et fixes,

- l’orientation et l’alignement des systèmes mécaniques.

Cette information est généralement capturée par des photographies, vidéos, schémas ou relevés techniques réalisés immédiatement après l’incident. Elle permet ensuite de reconstituer la scène d’origine et de comprendre les interactions mécaniques ayant conduit à la défaillance.

Documents

La catégorie Paper regroupe l’ensemble des documents techniques, organisationnels et réglementaires liés au système étudié.

Elle comprend notamment :

- les manuels d’exploitation et de maintenance,
- les procédures opératoires standards (SOP),
- les rapports d’inspection et de contrôle,
- les analyses de risques (comme les JSA – Job Safety Analysis),
- les historiques de maintenance et d’intervention.

L’analyse de ces documents permet de comparer le fonctionnement réel du système avec le fonctionnement théorique attendu, et d’identifier d’éventuels écarts entre les procédures et la pratique terrain.

Personnes

La dimension People concerne la collecte des informations issues des acteurs humains impliqués dans l’incident.

Cela inclut :

- les opérateurs présents lors de l’événement.
- les techniciens de maintenance.
- les ingénieurs responsables de l’inspection ou de la conception.

Les entretiens réalisés permettent de :

- reconstituer la chronologie précise des événements.
- comprendre les actions effectuées avant, pendant et après l’incident.
- identifier d’éventuelles erreurs humaines ou ambiguïtés dans les procédures.

Cette étape est essentielle car elle apporte une dimension contextuelle que les données techniques seules ne peuvent pas fournir.

Paradigmes

La catégorie Paradigms est souvent la plus complexe, car elle concerne les hypothèses implicites, croyances organisationnelles et biais cognitifs influençant la perception de l'incident.

Elle peut inclure :

- la croyance que “les systèmes de sécurité sont toujours fiables”.
- la normalisation de certains écarts (“cela a toujours fonctionné ainsi”).
- la sous-estimation de certains risques techniques.
- les habitudes opérationnelles non remises en question.

L'analyse des paradigmes permet de mettre en évidence des causes organisationnelles profondes, souvent invisibles dans une analyse purement technique, mais déterminantes dans la récurrence des défaillances.[8]

2.1.2 Phase d'analyse (Remonter la chaîne de causalité)

La phase d'analyse dans une démarche de RCFA (Root Cause Failure Analysis) constitue le cœur du processus d'investigation, car elle vise à reconstruire de manière rigoureuse la chaîne de causalité ayant conduit à l'événement indésirable. Elle s'appuie sur les données collectées lors de la phase de préservation et consiste à organiser ces informations de façon logique et chronologique afin de comprendre le déroulement exact des faits. L'objectif n'est pas d'identifier un responsable, mais de mettre en évidence les défaillances du système dans son ensemble.[9]

Cette phase débute généralement par la reconstitution du scénario de l'incident, en établissant une ligne de temps précise des événements. Chaque fait est analysé pour déterminer les relations de cause à effet, en évitant les suppositions non fondées. L'utilisation d'outils structurés tels que la méthode des 5 Pourquoi permet de remonter progressivement des causes apparentes vers les causes racines. De même, le diagramme d'Ishikawa (ou diagramme en arêtes de poisson) facilite la classification des causes selon différentes catégories comme les méthodes, les machines, la main-d'œuvre, les matières et l'environnement.

L'analyse peut également s'appuyer sur des outils plus avancés comme l'arbre de défaillance (FTA), qui permet de modéliser les enchaînements logiques entre les défaillances techniques et organisationnelles. Cette approche systémique permet de visualiser les interactions entre plusieurs facteurs contributifs et de ne pas se limiter à une cause unique. En effet, les événements indésirables résultent souvent de la combinaison de causes physiques (panne matérielle), humaines (erreur ou négligence) et systémiques (défaillance organisationnelle ou absence de procédure).

Une attention particulière est portée à la validation des causes identifiées, en s’assurant qu’elles sont étayées par des preuves concrètes et vérifiables. L’analyse doit rester objective, factuelle et reproductible. Enfin, cette phase se conclut par l’identification des causes racines, c’est-à-dire celles qui, si elles sont corrigées, permettront d’éviter la réapparition du problème. Elle constitue ainsi une étape essentielle pour orienter efficacement la phase suivante de remédiation et de mise en œuvre des actions correctives.

Approche méthodologique de l’analyse

La phase d’analyse dans une démarche de RCFA consiste à reconstruire de manière rigoureuse la chaîne de causalité ayant conduit à un événement indésirable, en reliant logiquement et chronologiquement les faits observés. Elle repose sur les données collectées lors de la phase de préservation et vise à comprendre précisément le “comment” et le “pourquoi” de la défaillance. L’objectif n’est pas de désigner un responsable, mais d’identifier les failles du système global (technique, humain et organisationnel).

Dans un premier temps, l’analyste établit une chronologie détaillée des événements, permettant de visualiser la succession des faits. Chaque événement est ensuite examiné afin de déterminer ses causes immédiates et ses liens avec les autres événements. Cette démarche évite les jugements hâtifs et favorise une analyse basée sur des preuves tangibles. Des outils comme la méthode des 5 Pourquoi permettent d’approfondir progressivement l’analyse en remontant des causes visibles vers les causes profondes.

Par ailleurs, le diagramme d’Ishikawa est utilisé pour structurer les causes selon différentes catégories (méthodes, machines, main-d’œuvre, matières, milieu), ce qui facilite une vision globale du problème. Dans les cas complexes, l’arbre de défaillance (FTA) permet de modéliser les enchaînements logiques entre plusieurs défaillances et de mettre en évidence les interactions entre différents facteurs. Cette approche systémique montre que les incidents résultent souvent de la combinaison de plusieurs causes interdépendantes.

Un point essentiel de cette phase est la validation des causes identifiées, qui doivent être vérifiées à partir de données fiables (rapports, mesures, témoignages). L’analyse doit rester objective, rigoureuse et reproductible. Elle aboutit finalement à l’identification des causes racines, c’est-à-dire celles dont la suppression permettrait d’éviter la réapparition du problème. [10]

Exemple : panne d’un moteur industriel

Un moteur s’arrête brusquement dans une chaîne de production.

- **Événement** : arrêt du moteur
- **Pourquoi 1 ?** → Le moteur a surchauffé

- **Pourquoi 2 ?** → Le système de refroidissement ne fonctionnait pas correctement
- **Pourquoi 3 ?** → Le ventilateur de refroidissement était défectueux
- **Pourquoi 4 ?** → Le ventilateur n'a pas été remplacé à temps
- **Pourquoi 5 ?** → Il n'existe pas de programme de maintenance préventive clair

Dans ce cas, la cause immédiate est la surchauffe (cause physique), la cause intermédiaire est la défaillance du ventilateur, mais la cause racine est organisationnelle : l'absence de procédure de maintenance préventive.

Ainsi, la phase d'analyse permet de dépasser les causes apparentes pour identifier les véritables origines du problème, garantissant des actions correctives efficaces et durables.

2.1.3 Phase de remédiation (Actions correctives)

C'est la phase d'action et d'amélioration continue.

Typologie des actions de remédiation

Pour qu'une remédiation soit efficace, elle doit agir sur trois niveaux distincts :

- **Actions immédiates (curatives)** : Rétablir le service ou réparer l'équipement (ex : remplacer un roulement cassé).
- **Actions correctives (préventives)** : S'attaquer à la cause racine technique (ex : modifier le système de lubrification).
- **Actions systémiques (organisationnelles)** : Modifier les processus ou la culture qui ont permis à la défaillance d'arriver (ex : réviser les procédures de formation ou les cycles de maintenance). [11]

Le processus de mise en œuvre

Pour transformer l'analyse en résultats, la phase de remédiation suit généralement ce cycle :

A. Sélection des solutions (Critères SMART) Toutes les idées de correction ne sont pas applicables. Chaque action doit être validée selon :

- **Faisabilité** : A-t-on les ressources techniques et financières ?
- **Impact** : L'action élimine-t-elle réellement la cause racine ?
- **Non-régression** : L'action crée-t-elle un nouveau risque ailleurs ?

B. Plan d'action détaillé Il est indispensable de nommer un responsable pour chaque tâche et de définir un échéancier précis. Sans responsable identifié, le rapport RCFA risque de rester lettre morte.

C. Validation et suivi (Vérification de l'efficacité) La remédiation ne s'arrête pas à l'installation d'une nouvelle pièce ou d'un nouveau logiciel. Il faut définir un indicateur de performance (KPI) pour vérifier, après 3 ou 6 mois, que la défaillance n'est pas réapparue. [12]

Exemples d'actions selon la cause identifiée

Cause racine	Action de remédiation
Erreur humaine	Automatisation du processus ou installation de détrompeurs (Poka-Yoke).
Défaut de conception	Modification des plans techniques ou changement de matériaux.
Procédure obsolète	Mise à jour du mode opératoire et session de formation pour les équipes.
Sous-dimensionnement	Remplacement par un équipement aux capacités supérieures.

TABLE 2.1 – Exemples d'actions de remédiation selon la cause racine

Les facteurs clés de succès

- **L'institutionnalisation** : Pour que la remédiation soit pérenne, les changements doivent être documentés dans la base de connaissances de l'organisation (Standard Operating Procedures - SOP).
- **La boucle de rétroaction** : Si l'action corrective échoue, il faut revenir à l'étape d'analyse. Cela signifie que la véritable cause racine n'avait peut-être pas été correctement identifiée.

2.2 Analyse des 3 niveaux de causes

L'analyse consiste à descendre le long d'une chaîne logique pour découvrir les facteurs cachés. On utilise souvent l'analogie de l'iceberg ou du modèle de causalité linéaire. [13]

2.2.1 Les racines physiques (Physical Roots)

C'est le niveau le plus "facile" à identifier car il est tangible. C'est la réponse à la question : "Comment l'équipement a-t-il failli ?". Ce sont des phénomènes liés aux lois de la physique et de la chimie.

- **Caractéristiques** : ruptures, corrosion, surchauffe, court-circuit, cavitation.
- **Investigation** : utilisation de la métallurgie, de l'analyse d'huile ou de la thermographie.
- **Limitation** : s'arrêter à ce niveau garantit que la panne se reproduira, car on ne traite que le symptôme.

Les causes physiques constituent le premier niveau d'analyse dans une démarche de Root Cause Failure Analysis (RCFA). Elles décrivent la réalité matérielle de la défaillance, c'est-à-dire le mécanisme par lequel un composant ou un équipement perd progressivement ou brutalement sa capacité à assurer sa fonction. Cette analyse repose sur des bases scientifiques issues de la physique, de la chimie et de la résistance des matériaux (RDM).

Sur le plan technique, ces causes physiques se traduisent par différents mécanismes de rupture. Parmi les plus fréquents figure la rupture de fatigue. Elle apparaît lorsqu'un matériau est soumis à des contraintes cycliques répétées, même si ces contraintes restent inférieures à sa limite de résistance statique. Avec le temps, ces sollicitations entraînent l'apparition de microfissures internes, invisibles à l'œil nu, qui se propagent progressivement jusqu'à provoquer une rupture brutale.

Ce phénomène est particulièrement critique dans les éléments soumis à des vibrations ou à des rotations continues (arbres, axes, roulements). À cela s'ajoutent d'autres causes comme la surcharge, l'usure, la corrosion, les contraintes thermiques et l'érosion. [14]

L'identification de ces causes repose sur des méthodes de diagnostic spécifiques :

- examen du faciès de rupture .
- analyse d'huile .
- thermographie infrarouge .
- contrôles non destructifs.

2.2.2 Causes humaines (Human Roots)

- **Caractéristiques** : erreur de diagnostic, mauvais réglage, oubli d'une étape de maintenance, surcharge de la machine.
- **Note importante** : on ne parle pas de "faute", mais de "décision inappropriée".
L'objectif est de comprendre pourquoi l'humain a pensé bien faire à ce moment-là.

Les causes humaines correspondent aux facteurs liés à l'intervention de l'opérateur dans un système industriel. Elles traduisent souvent une interaction entre l'opérateur, les procédures, les outils et l'environnement de travail.

Elles peuvent apparaître lors de l'exploitation, de la maintenance ou du montage. Elles incluent :

- erreurs d'exécution .
- non-respect des instructions .
- problèmes de communication .
- manque de formation .
- mauvaise interprétation des documents techniques.[15]

Exemple : erreur de montage L'erreur de montage survient lorsqu'un opérateur assemble incorrectement un composant en raison d'une mauvaise compréhension, d'un manque d'attention ou d'une formation insuffisante.

Manifestations :

- inversion de pièces .
- mauvais serrage .
- oubli d'un composant .
- mauvaise orientation d'un élément.

Conséquences :

- dysfonctionnement immédiat .
- usure prématurée .
- arrêt de production .
- risque de sécurité.

Analyse RCFA :

L'erreur ne doit pas être vue comme une faute, mais comme le résultat de causes sous-jacentes :

- procédure insuffisante .
- manque de formation .
- supervision inadéquate .
- documentation ambiguë.

2.2.3 Causes racines / systémiques (Latent Roots)

- **Caractéristiques** : procédure inexistante, manque de formation, pièces de mauvaise qualité, outils inadaptés, pression de production.
- **Impact** : agir à ce niveau est le plus efficace, car cela élimine plusieurs causes humaines potentielles.

Les causes systémiques correspondent aux défaillances liées au fonctionnement global de l'organisation. Elles sont considérées comme des causes profondes car elles proviennent du système de management et non d'un individu ou d'un équipement.

Elles traduisent des problèmes liés aux processus, aux règles internes, à la communication ou à la documentation. Elles influencent indirectement les comportements humains et les performances techniques. [14]

Exemple : absence de procédure Cette situation survient lorsque les opérateurs ne disposent pas de documents clairs pour exécuter une tâche.

Manifestations :

- absence de procédure écrite .
- instructions incomplètes .
- manque de communication .
- documentation difficile d'accès.

Conséquences :

- variation des pratiques .
- augmentation des erreurs humaines .
- baisse de qualité .
- incidents récurrents.

Analyse RCFA :

Cette cause révèle une faiblesse du système de gestion et doit être traitée comme une cause racine :

- formalisation des procédures .
- mise à jour des documents .
- amélioration de la communication .
- mise en place de formations.

2.3 Boîte à outils techniques de l'analyse RCFA

2.3.1 La méthode des “5 Pourquoi” (5 Whys)

La méthode des 5 Pourquoi constitue une technique d'investigation qualitative itérative, largement utilisée dans les démarches de Root Cause Failure Analysis (RCFA) pour amorcer la compréhension d'un incident avant toute analyse approfondie.

Sur le plan méthodologique, elle repose sur une logique de causalité séquentielle : à partir d'un événement indésirable (défaillance, non-conformité, incident), on pose successivement la question « Pourquoi ? » afin de remonter progressivement la chaîne causale. Chaque réponse devient alors la base de la question suivante. En pratique, le nombre « 5 » n'est

pas strict : il peut être inférieur ou supérieur selon la complexité du problème, l'objectif étant d'atteindre une cause racine plausible, c'est-à-dire une cause fondamentale dont la suppression empêcherait la récurrence du problème. [16]

Rôle dans le processus RCFA Dans la phase amont du processus d'investigation (notamment la phase de préservation et de collecte des preuves), cette méthode joue un rôle exploratoire et heuristique plutôt que conclusif. Elle permet :

- d'identifier rapidement les premières pistes causales sans mobiliser des outils complexes .
- de structurer la réflexion initiale de l'équipe d'investigation .
- de formuler des hypothèses de travail guidant la collecte de données pertinentes (documents, enregistrements, témoignages, paramètres techniques, etc.) .
- de mettre en évidence les zones critiques du système (procédures, équipements, facteurs humains, environnement) nécessitant une analyse approfondie.

Limites de la méthode Cependant, son utilisation présente des limites importantes qu'il convient de maîtriser dans un cadre professionnel :

- dépendance à la qualité des connaissances et à l'objectivité des participants .
- risque de biais cognitifs (simplification excessive, causalité linéaire dans des systèmes complexes) .
- incapacité à valider seule une cause racine de manière rigoureuse.

Complémentarité avec d'autres outils Dans une démarche RCFA structurée (notamment dans les secteurs réglementés comme l'industrie pharmaceutique), la méthode des 5 Pourquoi est généralement utilisée en complément d'autres outils analytiques :

- diagramme d'Ishikawa .
- arbre des causes (logic tree) .
- analyse des barrières.

Synthèse En synthèse, la méthode des 5 Pourquoi agit comme un outil de cadrage initial : elle oriente l'investigation, facilite la compréhension rapide du problème et prépare une analyse plus systématique et documentée, sans se substituer à celle-ci.

5 Whys for Root Cause Analysis (RCA)

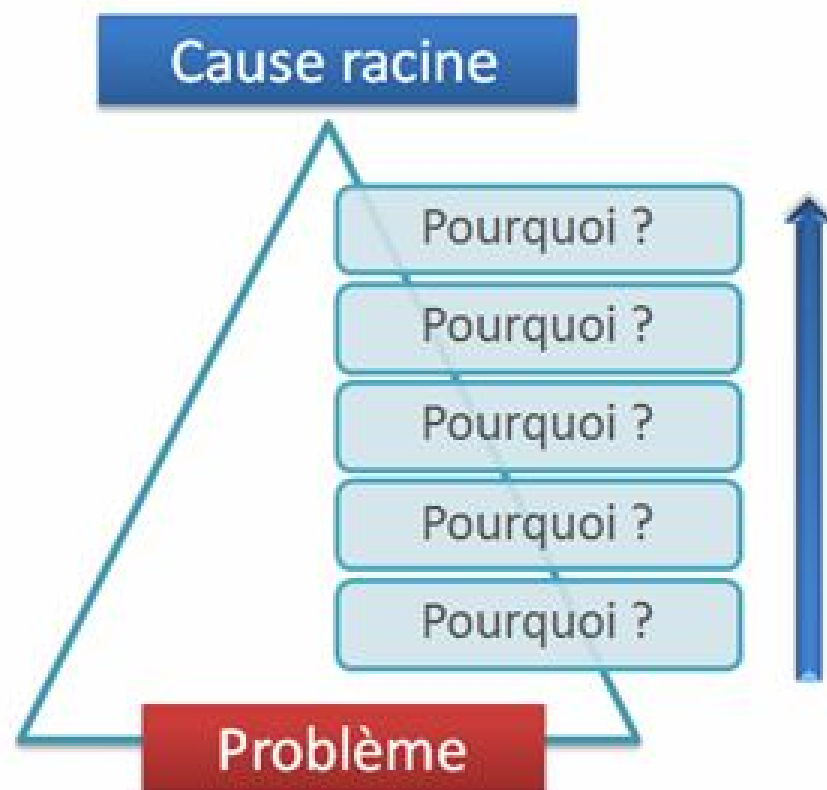


FIGURE 2.1 – Les "5 Pourquoi"

2.3.2 L'Arbre des Causes (Logic Tree)

L'Arbre des Causes, également appelé *Logic Tree* dans la méthodologie RCFA, est un outil de modélisation graphique et déductif utilisé pour analyser la genèse d'un événement indésirable. Il permet de décomposer de manière systématique un incident en remontant des effets visibles vers les causes profondes.

Selon la norme IEC 62740, cet outil repose sur une logique de nécessité et de suffisance, garantissant que chaque lien établi entre deux faits est prouvé par des preuves tangibles recueillies sur le terrain.

L'application de l'Arbre des Causes dans une démarche de Root Cause Failure Analysis (RCFA) repose sur un ensemble de règles rigoureuses visant à garantir la validité et la fiabilité de l'analyse causale. [17]

Règles méthodologiques de l'Arbre des Causes

1. Règle de factualité

L'analyse doit être fondée exclusivement sur des faits vérifiables, observables et traçables. Toute interprétation, hypothèse ou jugement doit être exclu à ce stade. Chaque élément intégré dans l'arbre doit pouvoir être justifié par une source fiable (rapport, donnée système, observation terrain, témoignage).

2. Règle de non-interprétation initiale

Il est impératif de ne pas introduire de relation causale non démontrée. L'analyse doit décrire ce qui s'est produit avant d'expliquer pourquoi cela s'est produit. Cela permet d'éviter les biais cognitifs et les conclusions prématurées.

3. Règle de causalité logique

Chaque lien entre deux éléments doit répondre à la question :

« **Ce fait était-il nécessaire ou suffisant pour produire l'événement suivant ?** »

Deux types de relations doivent être distingués :

- Relation **ET** : plusieurs conditions nécessaires simultanément ;
- Relation **OU** : une seule condition suffisante.

La cohérence logique de ces relations doit être systématiquement vérifiée.

4. Règle d'exhaustivité

L'arbre doit intégrer l'ensemble des causes contributives identifiées, sans se limiter à une seule chaîne causale. Un événement peut résulter de plusieurs facteurs combinés (techniques, humains, organisationnels, environnementaux).

5. Règle de décomposition progressive

Chaque cause identifiée doit être analysée à son tour afin de remonter vers des causes plus profondes. La décomposition doit se poursuivre jusqu'à atteindre un niveau où :

- la cause est fondamentale,
- elle est actionnable,
- elle permet de prévenir la récurrence.

6. Règle de traçabilité

L'ensemble du raisonnement doit être documenté et traçable. Chaque étape de construction de l'arbre doit pouvoir être auditée, notamment dans les environnements réglementés (ex : industrie pharmaceutique, normes GMP).

7. Règle de cohérence temporelle

Les relations causales doivent respecter la chronologie réelle des événements. Une cause ne peut être positionnée que si elle est antérieure à l'effet qu'elle génère.

8. Règle de validation collective

L'Arbre des Causes doit être construit et validé par une équipe pluridisciplinaire (maintenance, production, qualité, ingénierie). Cela permet de réduire les biais individuels et d'assurer une vision globale du système.

9. Règle d'orientation vers l'action

L'objectif final n'est pas uniquement l'analyse, mais la mise en œuvre d'actions correctives pertinentes. Les causes racines identifiées doivent être :

- maîtrisables,
- corrigeables,
- mesurables en termes d'impact.

10. Règle de simplicité maîtrisée

Bien que l'arbre puisse devenir complexe, il doit rester lisible, structuré et compréhensible par les parties prenantes. Une complexité excessive sans valeur analytique doit être évitée. [8]

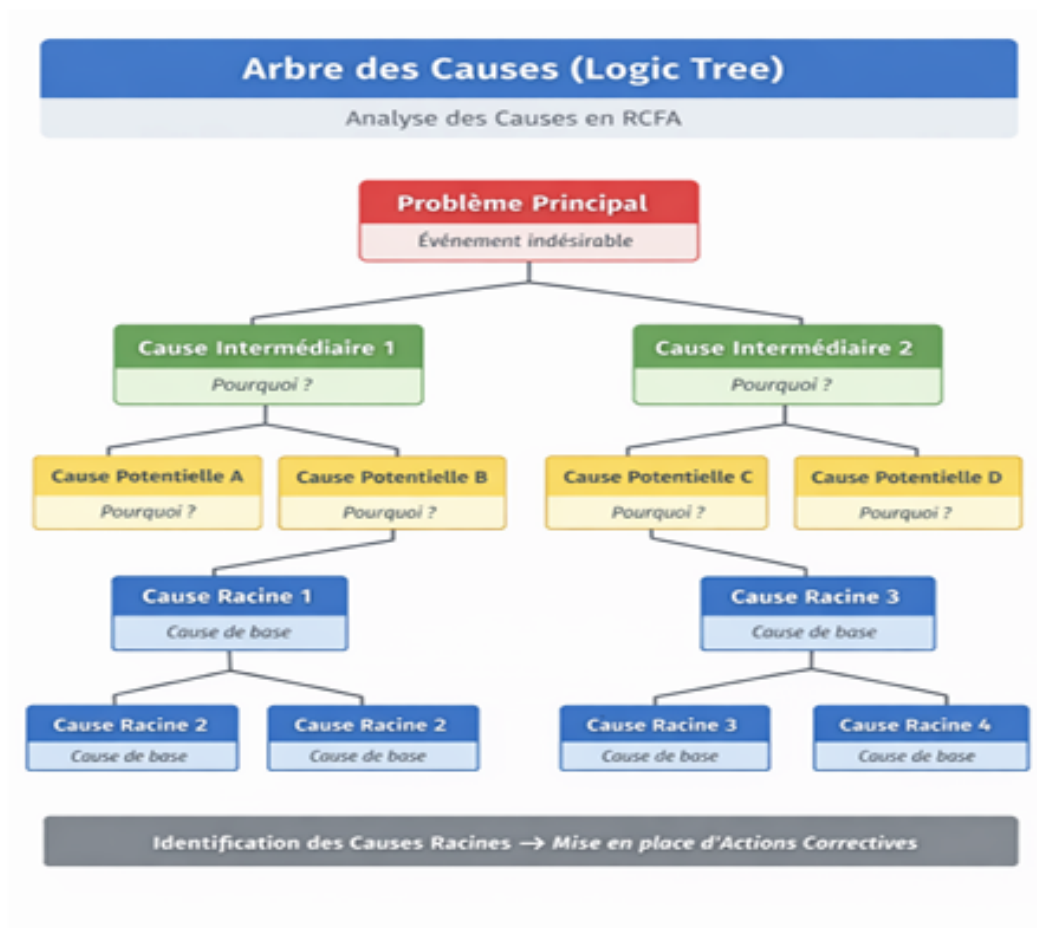


FIGURE 2.2 – L'Arbre des Causes

2.4 Le diagramme d'Ishikawa

Le diagramme d'Ishikawa, également appelé diagramme en arêtes de poisson, est un outil de structuration qui permet de classer l'ensemble des causes potentielles d'un problème en grandes familles. Dans une analyse RCFA, son rôle n'est pas de prouver la cause, mais de garantir l'exhaustivité de l'enquête : il incite l'investigateur à analyser au-delà de la simple défaillance technique. [18]

2.4.1 Les 5 axes d'investigation (Règle des 5M)

Pour remonter à la source d'une défaillance industrielle, la RCFA préconise d'analyser systématiquement cinq familles de causes. La méthode des 5M constitue un outil d'analyse permettant de structurer et de classer les facteurs susceptibles d'être à l'origine d'un problème.

Elle est largement utilisée dans les démarches de qualité, d'amélioration continue et d'analyse des défaillances, notamment dans le cadre du Root Cause Failure Analysis (RCFA).

Cette méthode repose sur une approche systémique selon laquelle un dysfonctionnement ne résulte pas d'une cause unique, mais d'un ensemble de facteurs interdépendants. Elle permet ainsi d'assurer une analyse globale en évitant les omissions.

Les cinq catégories de la méthode des 5M

- **Main-d'œuvre (Man)** : facteurs humains tels que les compétences, la formation, les erreurs ou le non-respect des procédures.
- **Méthodes (Method)** : procédures, instructions de travail, organisation et standardisation des processus.
- **Machines (Machine)** : équipements, leur état, leur maintenance et leur fiabilité.
- **Matières (Material)** : qualité des matières premières, conformité et conditions de stockage.
- **Milieu (Environment)** : conditions environnementales et organisationnelles (température, bruit, ergonomie, conditions de travail).

Intérêt dans une démarche d'analyse La méthode des 5M permet de :

- structurer l'identification des causes potentielles ;
- garantir une analyse exhaustive ;
- faciliter le travail de réflexion collective ;
- servir de base à d'autres outils comme le diagramme d'Ishikawa ou l'Arbre des Causes.

[19]

2.4.2 Complémentarité avec l'Arbre des Causes

Il est important de souligner que le diagramme d'Ishikawa et l'Arbre des Causes sont des outils complémentaires dans une démarche RCFA :

1. **Diagramme d'Ishikawa (phase de brainstorming)** : permet de recenser l'ensemble des causes potentielles (approche large et exploratoire).
2. **Arbre des Causes (phase de validation)** : permet de vérifier, à l'aide de preuves concrètes, quelles causes sont réellement liées à l'incident.

Ainsi, l'Ishikawa permet d'identifier les pistes, tandis que l'Arbre des Causes permet de valider les relations causales et d'aboutir à des conclusions fiables.

MÉTHODE DES 5M DE L'ISHIKAWA (DIAGRAMME EN ARÊTES DE POISSON)

ANALYSE QUALITATIVE DES CAUSES RACINES

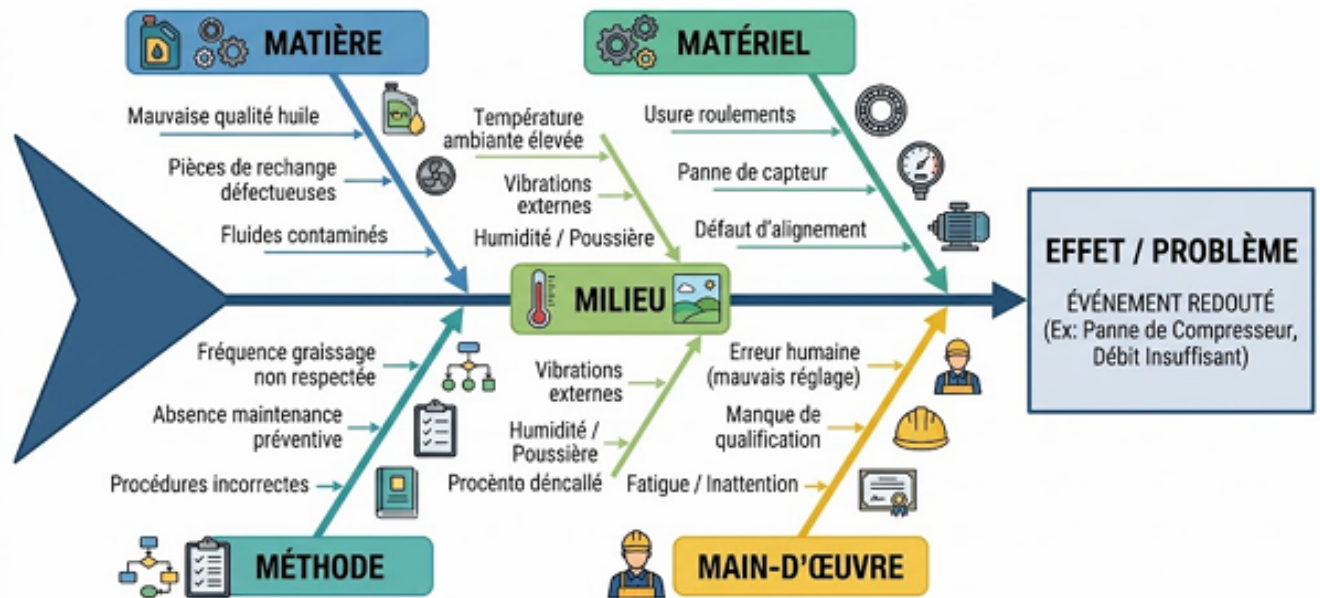


FIGURE 2.3 – méthode des 5M d'Ishikawa

2.5 Méthode AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité)

L'AMDEC (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis – FMECA) est une méthode structurée d'analyse préventive des risques visant à identifier de manière systématique les défaillances potentielles d'un système, à en analyser les causes et les effets, et à évaluer leur criticité afin de prioriser les actions d'amélioration. Elle constitue un outil fondamental en ingénierie de la fiabilité, en maintenance industrielle et en gestion des risques.

Contrairement aux approches correctives, l'AMDEC adopte une démarche proactive (préventive) en anticipant les défaillances avant leur apparition. Elle repose sur une logique inductive (causes → effets), ce qui la distingue des méthodes déductives comme l'arbre de défaillance (FTA).

2.5.1 Objectifs de la méthode AMDEC

Les principaux objectifs de l'AMDEC sont :

- Identifier de manière exhaustive les modes de défaillance possibles d'un système,
- Analyser les mécanismes de dégradation ou de dysfonctionnement,
- Évaluer les conséquences sur la sécurité, la qualité, les coûts et la disponibilité,

- Hiérarchiser les risques selon leur criticité,
- Définir et prioriser les actions correctives et préventives.

Ainsi, l'AMDEC contribue directement à l'amélioration de la fiabilité, de la maintenabilité et de la sécurité des systèmes industriels.

2.5.2 Typologie de l'AMDEC

On distingue plusieurs types d'AMDEC selon le niveau d'analyse :

- **AMDEC Produit** : amélioration de la fiabilité dès la phase de conception.
- **AMDEC Processus** : analyse des défaillances liées aux procédés de fabrication.
- **AMDEC Moyen / Machine** : amélioration de la disponibilité et de la sécurité des équipements.
- **AMDEC Organisationnelle** : analyse des systèmes humains et organisationnels.

2.5.3 Démarche méthodologique de l'AMDEC

1. Définition du périmètre d'étude

- Délimitation du système (machine, ligne de production, processus).
- Identification des fonctions principales et secondaires.
- Décomposition en sous-systèmes et composants.

2. Analyse fonctionnelle

- Définition des fonctions attendues,
- Identification des critères de performance.
- Mise en évidence des interactions entre composants.

3. Identification des modes de défaillance Un mode de défaillance correspond à la manière dont une fonction peut être altérée :

- Perte totale de fonction (arrêt complet).
- Dégradation partielle (performance insuffisante).
- Fonctionnement intempestif.

4. Recherche des causes de défaillance Les causes peuvent être :

- **Internes** : défaut de conception, usure, fatigue des matériaux,
- **Externes** : conditions environnementales, erreurs humaines, interactions système.

5. Analyse des effets Les effets sont évalués à différents niveaux :

- Niveau local (composant),
- Niveau système (machine),
- Niveau global (production, sécurité, environnement).

Les effets peuvent inclure : arrêt de production, non-conformité du produit, risque pour les opérateurs ou impact environnemental. [20]

2.5.4 Évaluation de la criticité

L'AMDEC introduit une quantification du risque à travers l'indice de criticité :

$$C = F \times G \times ND$$

où :

- **F (Fréquence)** : probabilité d'apparition de la défaillance.
- **G (Gravité)** : importance des conséquences.
- **ND (Non-détection)** : probabilité de non-détection avant occurrence.

Plus la criticité est élevée, plus la défaillance est prioritaire. Cette approche permet une hiérarchisation rationnelle des risques, essentielle pour la prise de décision.

2.5.5 Plan d'actions et exploitation des résultats

Une fois la criticité évaluée, des actions sont mises en place :

- **Actions préventives** : réduction de la fréquence (maintenance préventive, amélioration de la conception).
- **Actions correctives** : élimination des causes racines,
- **Actions de détection** : mise en place de systèmes de contrôle ou d'alarme.
- **Actions de protection** : réduction de la gravité (sécurité, redondance).

2.5.6 Avantages et limites de l'AMDEC

Avantages

- Méthode structurée et systématique.
- Anticipation des risques.
- Aide à la décision.
- Amélioration de la fiabilité et de la sécurité.

Limites

- Méthode longue et coûteuse en temps.
- Dépend fortement de l'expertise des analystes.
- Difficulté d'estimation de certains paramètres (ND).
- Complexité élevée pour les systèmes étendus.

2.6 Définition et fondements de l'arbre de défaillance (Fault Tree Analysis – FTA)

L'arbre de défaillance (FTA) est une méthode d'analyse déductive développée initialement dans les années 1960 par la société Bell Telephone Laboratories pour l'évaluation de la sûreté des systèmes complexes. Elle repose sur une logique booléenne permettant de modéliser les relations causales entre différentes défaillances.

Le principe consiste à partir d'un événement redouté (Top Event) et à remonter de manière systématique vers ses causes potentielles en décomposant le système en événements intermédiaires et en événements élémentaires (basic events). [21]

Cette approche est dite :

- **Top-down** (descendante).
- **déductive**, car elle cherche à expliquer pourquoi une défaillance globale peut se produire.

2.6.1 Structure logique et représentation graphique

L'arbre de défaillance se présente sous forme d'un diagramme arborescent structuré autour de trois éléments fondamentaux :

a. L'événement sommet (Top Event) Il représente la défaillance globale du système étudié (ex : arrêt d'une chaîne de production, perte de confinement, panne critique).

b. Les événements intermédiaires Ils résultent de la combinaison logique de plusieurs causes et permettent de structurer l'analyse.

c. Les événements élémentaires Ce sont les causes de base, généralement non décomposables (ex : rupture mécanique, erreur humaine, défaut de conception).

2.6.2 Portes logiques et formalisation mathématique

Les relations entre événements sont modélisées par des portes logiques issues de l'algèbre booléenne :

Porte ET (AND) L'événement de sortie se produit uniquement si tous les événements d'entrée surviennent simultanément. → Modélise des dépendances strictes.

Porte OU (OR) L'événement de sortie se produit si au moins un événement d'entrée survient. → Représente des causes alternatives.

Porte K/N (vote logique) Le système échoue si K composants sur N sont défectueux. → Utilisée pour modéliser la redondance partielle (ex : systèmes de sécurité).

Ces portes permettent de traduire le système réel en modèle logique calculable, facilitant l'analyse probabiliste.

2.6.3 Notion de coupes minimales (Minimal Cut Sets)

Une coupe minimale est définie comme le plus petit ensemble d'événements élémentaires dont la combinaison entraîne l'événement redouté.

Elle constitue un indicateur clé pour :

- identifier les points critiques du système.
- hiérarchiser les risques.
- orienter les actions de maintenance ou de prévention.

Plus une coupe minimale est probable, plus elle représente une vulnérabilité majeure.

2.6.4 Modélisation probabiliste et lois de défaillance

Contrairement à une représentation purement qualitative, la FTA permet une quantification du risque en intégrant des lois probabilistes.

a. Loi exponentielle Utilisée lorsque le taux de défaillance est constant :

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Elle est adaptée aux composants électroniques ou à la phase de vie utile, où λ représente le taux de défaillance.

b. Loi de Weibull Plus flexible, elle permet de modéliser :

- la phase de jeunesse (défauts précoces).
- la phase d'usure (vieillessement).

Elle est largement utilisée en maintenance industrielle et en fiabilité.

c. Événements dormants Ils concernent des défaillances non détectées immédiatement (ex : systèmes de secours). Leur prise en compte est essentielle dans les systèmes de sécurité critiques.

2.6.5 Indicateurs de performance et métriques de fiabilité

L'analyse par arbre de défaillance permet de calculer plusieurs indicateurs essentiels :

- **Fiabilité** : probabilité que le système fonctionne sans panne sur un intervalle donné,
- **Indisponibilité** : probabilité que le système soit défaillant à un instant donné,
- **Fréquence de défaillance** : fréquence d'occurrence de l'événement redouté.

Ces indicateurs permettent :

- d'évaluer la performance globale.
- de comparer différentes architectures.
- d'optimiser les politiques de maintenance.

2.6.6 Concept d'événement initiateur

Dans une approche couplée avec l'arbre d'événements (Event Tree Analysis), l'événement initiateur représente la cause déclenchante après défaillance des barrières de protection.

Il permet de distinguer :

- l'état de vulnérabilité (décrit par l'arbre de défaillance).
- le déclenchement effectif de l'accident.

Cette distinction est essentielle dans les analyses de sûreté des industries à haut risque.

2.6.7 Domaines d'application

La FTA est largement utilisée dans les secteurs critiques :

- Aéronautique : certification des systèmes de sécurité,
- Industrie pétrolière et gazière : analyse des risques majeurs.
- Nucléaire : évaluation probabiliste de sûreté.
- Industrie de process : continuité de production et prévention des accidents.

[22]

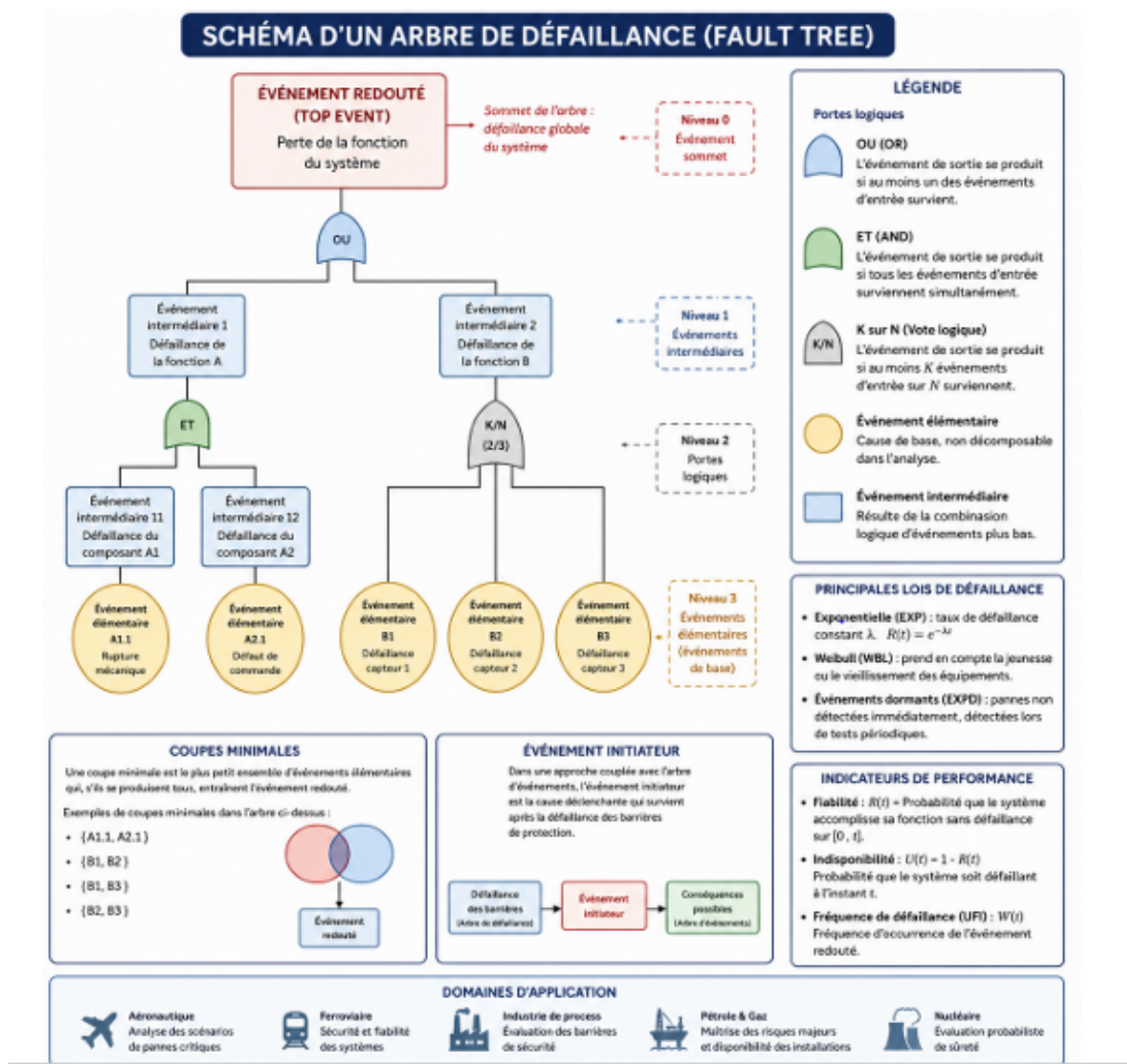


FIGURE 2.4 – Schéma D'un arbre de défaillance

2.7 Conclusion

Les méthodologies et outils du RCFA permettent d'identifier et d'analyser les causes profondes des défaillances de manière structurée. L'utilisation combinée des 5 Pourquoi, du diagramme d'Ishikawa et de l'arbre de défaillance (FTA) offre une analyse systémique des problèmes. L'intégration de la méthode AMDEC renforce cette approche en évaluant les risques de manière préventive et en hiérarchisant les défaillances. Cette complémentarité facilite la mise en place d'actions correctives efficaces et durables. Elle permet également de réduire la récurrence des incidents et d'améliorer la fiabilité des systèmes. Ainsi, le RCFA constitue un outil essentiel d'amélioration continue et de maîtrise des risques industriels.

Chapitre 3

Présentation de l'Entreprise et Analyse de Pareto des Défaillances

3.1 Présentation de l'Entreprise Nationale Algérienne de Peintures (ENAP)

3.1.1 Historique

L'ENAP est une importante entreprise nationale dont le siège se trouve à Lakhdaria (Algérie), fondée suite à la restructuration de la SNIC (Société Nationale des Industries Chimiques) selon le secteur d'activités. L'entreprise est dotée d'équipements ultramodernes et d'un personnel hautement qualifié. L'effectif total de l'entreprise s'élève à environ 1789 agents.[23].

L'ENAP a été transformée en SPA en mars 1990 avec un capital social de 100 millions de DA.

3.1.2 Objet social

L'entreprise publique économique ENAP a pour objet de gérer, exploiter et développer les activités de production et de commercialisation de :

- peintures .
- vernis .
- encres et émulsions .
- résines .
- colles et dérivés.

D'une manière générale, l'entreprise réalise toutes les opérations industrielles, commerciales, financières, mobilières ou immobilières pouvant se rattacher directement ou indirectement à son objet social ou susceptibles d'en favoriser l'extension et le développement.

L'entreprise ENAP est constituée de :

- Direction Générale à Lakhdaria ;

- Complexe de production de Lakhdaria ;
- Unité peinture d'Oued Smar .
- Unité peinture de Chéraga .
- Unité peinture d'Oran .
- Complexe de production de Sig .
- Complexe de production de Souk Ahras .
- Unité Commerciale Alger (UCA) .
- Unité Commerciale Est (UCE).

La distribution des produits « grand public et droguerie » s'effectue principalement par les unités commerciales UCA et UCE ainsi que par les distributeurs conventionnés à raison de 79 %. Les commandes spécifiques des clients industriels sont directement prises en charge par les unités de production de l'ENAP à raison de 21 %.

3.2 Présentation de l'UPSA (Unité de Production de Souk-Ahras)

3.2.1 Situation géographique

L'unité de Souk-Ahras est située à l'est du pays, à proximité de la frontière tunisienne, dans la zone industrielle sur la route menant vers Annaba. Cette position géographique offre plusieurs avantages logistiques grâce à la facilité d'écoulement des produits par voie terrestre, maritime et ferroviaire sur une distance d'environ 100 km.

Avec l'unité de Sig située à l'ouest du pays, cette implantation permet une répartition équilibrée des flux de distribution des produits fabriqués à travers le territoire national.[23].

3.2.2 Description générale

L'unité de Souk-Ahras a été créée en 1984 avec une capacité moyenne de production de 20 000 tonnes/an. Elle avait pour objectif de créer des débouchés économiques et de couvrir les besoins nationaux en matière de peintures, notamment dans les régions considérées comme défavorisées.

Cette entreprise produit plusieurs types de peintures destinées principalement au secteur du bâtiment et à diverses applications industrielles :

- peintures industrielles diverses (automobiles, aviation et électroménagers) .
- peintures marines .

- peintures de retouche pour carrosserie, matériel agricole et ferroviaire.

L'ENAP de Souk-Ahras est dirigée par un directeur d'unité et structurée en cinq sections appelées départements.

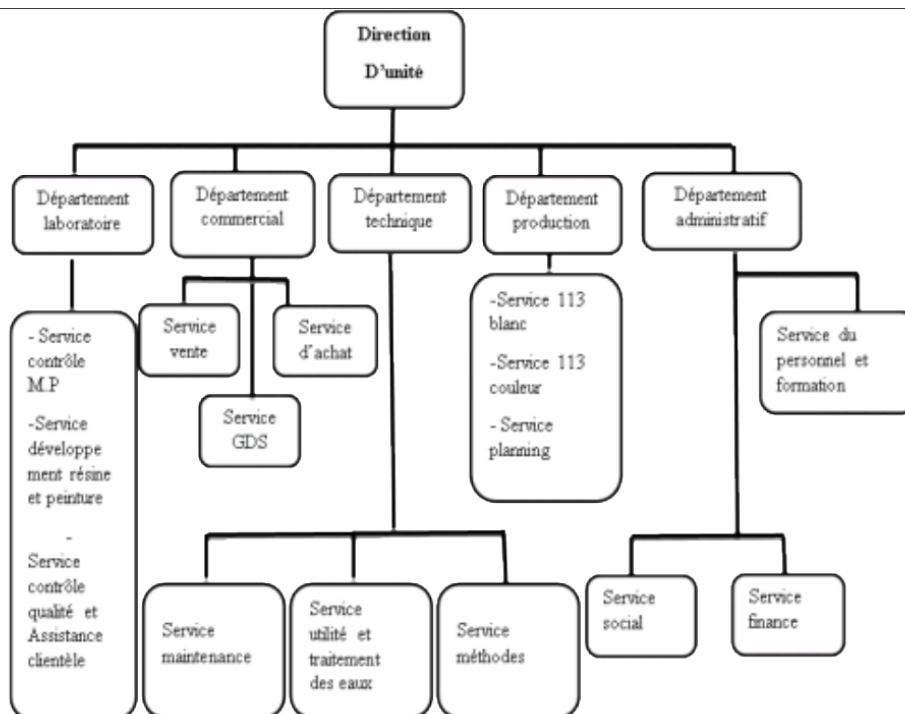


FIGURE 3.1 – Organigramme structurel de l'ENAP – Unité de Production de Souk Ahras (UPSSA).

3.2.3 Fiche technique de l'entreprise

- **ENAP** : Entreprise Nationale des Peintures .
- **Complexe Peintures** : Unité de Souk-Ahras .

Capacité de production :

- Peintures industrielles : 14 000 tonnes/an .
- Peintures bâtiment : 26 000 tonnes/an.
- Superficie totale : 13 hectares dont 3 hectares couverts .
- Nombre d'employés : 344 agents répartis comme suit :
 - 178 permanents .
 - 82 contractuels .
 - 84 dans le cadre du CTA.

3.2.4 Quelques statistiques de l'année 2020

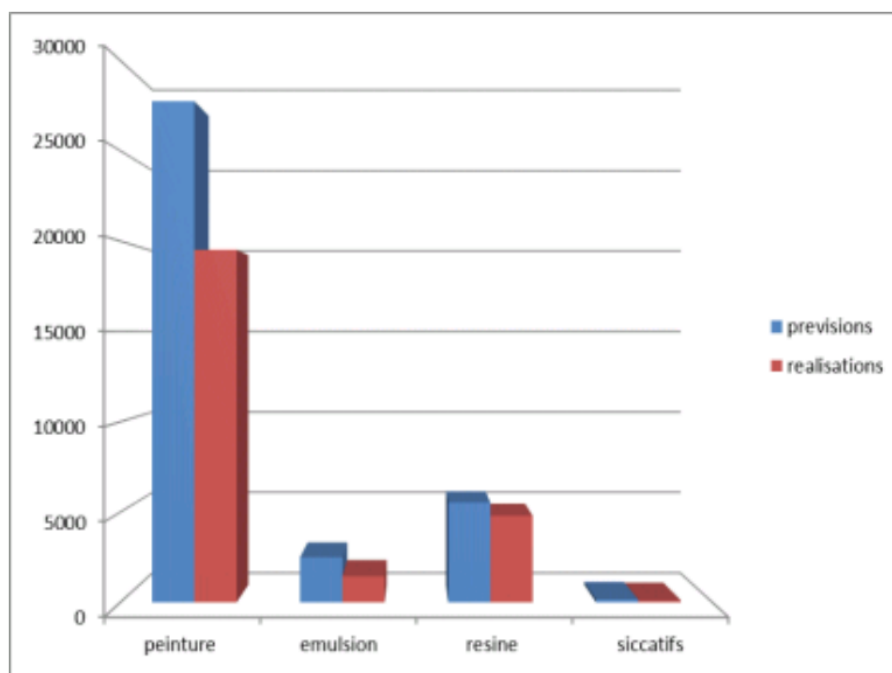


FIGURE 3.2 – Comparaison entre les prévisions et les réalisations de production (en tonnes) par famille de produits de l'ENAP-UPSA durant l'année 2020.

La capacité de production est toujours liée au nombre d'équipes mises en œuvres. On remarque que la production est toujours inférieure aux prévisions et cela peut être dû aux nombreuses pertes lors de la production.

3.3 Définition et origine du principe de Pareto

L'analyse de Pareto, également appelée règle des 80/20, constitue un outil statistique et décisionnel largement utilisé dans les domaines de la qualité, de la maintenance industrielle et du management des performances.

Ce principe trouve son origine dans les travaux de l'économiste italien Vilfredo Pareto qui observa qu'une faible proportion de la population détenait la majorité des richesses.

Par la suite, Joseph Juran adapta ce concept au domaine industriel en démontrant qu'une minorité de causes est responsable de la majorité des dysfonctionnements observés.

Dans le domaine de la maintenance industrielle, le principe de Pareto stipule qu'environ 20 % des causes de défaillance génèrent près de 80 % des conséquences opérationnelles telles que :

- les temps d'arrêt de production ;

- les coûts de réparation .
- les pertes énergétiques .
- les dégradations de qualité .
- les indisponibilités des équipements.

Ainsi, l'analyse de Pareto permet d'identifier les équipements, composants ou types de pannes ayant l'impact le plus critique sur la performance globale du système industriel.[24].

3.4 Objectifs de l'analyse de Pareto en maintenance industrielle

L'analyse de Pareto constitue un outil essentiel pour la gestion stratégique des opérations de maintenance. Son objectif principal est de hiérarchiser les problèmes afin d'orienter les ressources vers les défaillances les plus pénalisantes.

Les principaux objectifs de cette méthode sont les suivants :

3.4.1 Éviter la dispersion des efforts de maintenance

Dans un environnement industriel complexe, les équipes de maintenance sont confrontées à une multitude de pannes de gravité variable. L'analyse de Pareto démontre qu'il n'est pas pertinent de traiter toutes les défaillances avec le même niveau de priorité. Elle permet ainsi de concentrer les efforts sur les causes réellement critiques.

3.4.2 Identifier les composants critiques

Cette méthode met en évidence les équipements ou organes responsables de la majorité des arrêts et des coûts de maintenance. Les éléments identifiés deviennent alors des cibles prioritaires pour les études de fiabilité, les analyses RCFA et les programmes de maintenance préventive.

Dans le cas des compresseurs industriels, les composants critiques peuvent être :

- les roulements principaux .
- le bloc vis .
- les engrenages d'entraînement .
- le système de lubrification .
- le flector d'accouplement.

3.4.3 Optimiser les coûts et la disponibilité des équipements

En éliminant les causes majeures de défaillance, l'entreprise améliore directement :

- la disponibilité opérationnelle .
- le rendement des installations .
- la durée de vie des composants .
- la réduction des coûts correctifs .
- la continuité de production.

L'analyse de Pareto constitue donc un outil d'aide à la décision permettant d'obtenir un retour sur investissement élevé à travers des actions ciblées et rationnelles.

3.5 Présentation de l'équipement d'étude

3.5.1 Fiche d'identification et caractéristiques techniques

L'équipement principal retenu dans le cadre de cette étude est un compresseur d'air industriel volumétrique rotatif à vis lubrifié de marque Atlas Copco, modèle GA 110.

L'unité de production de Souk-Ahras exploite deux unités identiques désignées :

- Compresseur N°1 .
- Compresseur N°2.

afin d'assurer l'alimentation continue en air comprimé des différentes utilités industrielles du site.

Les principales caractéristiques techniques relevées à partir des plaques signalétiques et de la documentation constructeur sont présentées ci-après :

TABLE 3.1 – Caractéristiques techniques du compresseur GA 110

Désignation	Valeur technique
Type d'équipement	Compresseur d'air stationnaire lubrifié
Marque / Modèle	ATLAS COPCO / GA 110
Numéros de série	APF146680 / APF146681
Puissance nominale moteur	122 kW
Puissance utile au bloc vis	110 kW
Pression maximale de service	10 bar
Vitesse de rotation nominale	1489 tr/min
Alimentation électrique	380 V – Triphasé – 50 Hz
Système de commande	Elektronikon Touch
Compteur horaire relevé	37 751 heures

3.5.2 Description structurelle et fonctionnelle de la machine

Le compresseur Atlas Copco GA110 fonctionne selon le principe de la compression volumétrique rotative à vis lubrifiée. Son architecture mécanique s'organise principalement autour de trois sous-ensembles essentiels.[25]



FIGURE 3.3 – Compresseur d'air industriel à vis lubrifié Atlas Copco GA110 : vue générale de face avec panneau de commande électronique touch.

Le bloc compresseur(élément à vis)

Le bloc compresseur constitue l'organe principal de production d'air comprimé. Il est composé de deux rotors hélicoïdaux asymétriques imbriqués : un rotor mâle à quatre lobes et un rotor femelle à six cannelures. Lors de la rotation synchrone des deux arbres, l'air aspiré est piégé entre les profils des vis puis acheminé progressivement vers la chambre de refoulement. La réduction continue du volume interne entraîne une augmentation progressive de la pression jusqu'à l'évacuation de l'air comprimé. Cette technologie présente plusieurs avantages industriels, notamment :

- une compression continue sans pulsation importante .
- un faible niveau vibratoire .
- faible niveau vibratoire .
- une meilleure stabilité de pression pour les réseaux industriels.

L'ensemble d'entraînement et de transmission

La transmission de la puissance mécanique est assurée par un moteur électrique de 122 kW relié au bloc vis par un système d'accouplement direct équipé d'un flector élastique flexible. Ce sous-ensemble joue un rôle critique dans la fiabilité globale du compresseur puisque tout désalignement géométrique entre les arbres peut provoquer :

- des vibrations excessives .
- une surcharge des roulements .
- l'usure prématurée des engrenages .
- la détérioration du flector .
- des échauffements anormaux.

L'alignement dynamique de l'arbre moteur et de l'arbre d'attaque représente ainsi une condition essentielle pour assurer la longévité des composants mécaniques du système de transmission.

Le circuit thermo-hydraulique de lubrification

Le compresseur utilise un circuit d'huile sous pression assurant simultanément plusieurs fonctions fondamentales :

- l'étanchéité dynamique entre les profils des vis .
- la lubrification hydrodynamique des roulements et paliers .
- le refroidissement des éléments mécaniques soumis aux fortes charges thermiques.

Au cours du processus de compression, l'huile se mélange à l'air comprimé afin d'absorber l'énergie thermique générée. Le mélange diphasique (air + huile) est ensuite dirigé vers un séparateur vertical dans lequel l'huile est récupérée, filtrée puis refroidie à travers un radiateur avant d'être réinjectée dans le circuit. Le maintien de la qualité de l'huile, de son débit et de sa température constitue un paramètre déterminant pour garantir la stabilité thermique et la disponibilité opérationnelle de la machine.

3.5.3 Justification du choix de la machine

Le choix des compresseurs GA 110 comme objet d'étude est motivé par leur caractère hautement stratégique au sein de l'unité industrielle de Souk Ahras. Ces équipements représentent un maillon essentiel dans l'alimentation en air comprimé des installations de production, ce qui leur confère une forte criticité fonctionnelle et énergétique.

L'analyse de l'historique de maintenance a mis en évidence une fréquence importante de

défaillances mécaniques affectant principalement le système de transmission et le bloc d'attaque. Parmi les pannes observées figurent :

- cisaillement des pignons .
- usure des arbres .
- la destruction des roulements à rouleaux de type NJ .
- la détérioration du flector d'accouplement .
- l'apparition d'échauffements critiques dépassant 120°C a 130°C.

Ces défaillances entraînent des arrêts imprévus, une diminution de la disponibilité opérationnelle ainsi qu'une augmentation des coûts de maintenance corrective.

Dans ce contexte, les compresseurs GA 110 constituent un cas d'étude pertinent pour l'application des outils d'analyse de fiabilité et de maintenance industrielle, notamment l'AMDEC, l'analyse Pareto et la méthode RCFA (Root Cause Failure Analysis), afin d'identifier les causes profondes des dégradations observées et de proposer un plan d'action de maintenance préventive adapté.



FIGURE 3.4 – Vue en coupe du compresseur Atlas Copco GA110 VSD+ illustrant l'architecture des sous-ensembles mécaniques.

3.6 COLLECTE DES DONNÉES ET HISTORIQUE DES DÉFAILLANCES

La pertinence d’une étude de fiabilité et de maintenance dépend directement de la qualité, de la cohérence et de la précision des données collectées. Dans le cadre de cette étude portant sur les compresseurs Atlas Copco GA 110 exploités au sein de l’ENAP de Souk Ahras, la démarche de collecte des informations s’est appuyée sur une approche croisée reposant sur trois sources complémentaires :

- l’extraction des données issues de la GMAO .
- l’analyse des rapports d’intervention physiques .
- les entretiens semi-directifs et les observations réalisées sur le terrain.

Cette triangulation des données a permis de garantir une meilleure fiabilité des informations exploitées dans l’analyse AMDEC, le diagramme de Pareto et l’étude RCFA.

3.6.1 Extraction des données GMAO

La Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO) constitue la principale base de données numérique de l’usine. Elle centralise les historiques d’exploitation et de maintenance des équipements industriels.

L’exploitation de cette base a permis d’obtenir plusieurs indicateurs techniques importants concernant les compresseurs GA 110, notamment :

- les codes de défaillances enregistrés .
- les historiques des arrêts machine .
- les heures de retard de production .
- la fréquence des alarmes de sécurité .
- les temps d’intervention .
- les compteurs horaires cumulés des équipements.

Les relevés montrent que les deux compresseurs étudiés ont atteint un cumul d’environ 37 751 heures de fonctionnement, ce qui traduit un niveau d’exploitation important des installations.

L’analyse des alarmes enregistrées via le système de contrôle Elektronikon® a également permis d’identifier plusieurs événements thermiques récurrents associés à des températures critiques de fonctionnement. Le constructeur Atlas Copco indique par ailleurs que les compresseurs GA sont conçus pour fonctionner dans des environnements sévères avec des températures ambiantes pouvant atteindre 55 °C pour certaines versions haute température.

Cependant, l'exploitation brute de la GMAO a révélé certaines limites méthodologiques. Plusieurs défaillances étaient enregistrées sous des intitulés génériques tels que :

- « Défaut mécanique » .
- « Arrêt thermique » .
- « Défaut transmission ».

Ces désignations imprécises ne permettaient pas d'identifier directement les causes profondes des défaillances. Il a donc été nécessaire de compléter l'étude par une analyse détaillée des dossiers physiques de maintenance.[26]

Analyse des rapports d'intervention physiques

L'examen des fiches d'intervention manuscrites, des rapports techniques et des comptes rendus d'expertise mécanique a permis d'obtenir une description beaucoup plus précise des phénomènes de dégradation observés sur les compresseurs.

Cette analyse documentaire a mis en évidence plusieurs défaillances chroniques affectant principalement les organes de transmission et le système de compression.

1. **Défaillances mécaniques majeures** Les rapports techniques signalent à plusieurs reprises :

- le cisaillement du pignon d'attaque .
- l'usure anormale des arbres de transmission .
- la destruction des roulements à rouleaux .
- l'éclatement des roulements de type NJ2106515 et N42208 .
- l'apparition de jeux mécaniques excessifs.

Ces phénomènes indiquent une dégradation progressive du système de transmission mécanique du compresseur.

Le constructeur précise que les éléments à vis du GA 110 utilisent des rotors asymétriques associés à des roulements sélectionnés pour réduire l'usure et améliorer la fiabilité. Malgré cette conception robuste, les défaillances observées démontrent l'existence de contraintes opérationnelles importantes liées aux conditions réelles d'exploitation.

2. **Détérioration du système d'accouplement**

Les dossiers de maintenance montrent également un remplacement fréquent du flector flexible d'accouplement reliant le moteur électrique au bloc vis.

Cette récurrence constitue un indicateur mécanique important révélant probablement :

- un mauvais alignement des arbres .

- des vibrations axiales excessives .
- des déséquilibres dynamiques .
- des défauts de montage ou de lignage.

Or, la documentation constructeur indique que le système d'entraînement du GA 110 est conçu pour limiter les vibrations et assurer une transmission stable de la puissance mécanique.

La répétition des remplacements de flectors suggère donc un problème systémique de maintenance ou d'alignement.

3. Défaillances thermiques

Les rapports d'intervention font également état de déclenchements thermiques fréquents associés à des températures critiques dépassant parfois 120 °C à 130 °C. Ces anomalies ont nécessité plusieurs opérations correctives telles que :

- le nettoyage des radiateurs .
- le lavage des échangeurs thermiques .
- les appoints d'huile .
- le remplacement des filtres de refroidissement.

Selon les spécifications techniques du constructeur, le module de refroidissement du GA 110 comprend :

- un refroidisseur d'huile .
- un refroidisseur final d'air .
- des ventilateurs centraux .
- un système d'évacuation thermique optimisé.

Les défauts thermiques observés indiquent donc une dégradation progressive de l'efficacité du circuit thermo-hydraulique ou une inadéquation des conditions ambiantes du local technique.

Entretiens semi-directifs et observations sur le terrain

Afin de compléter les données documentaires, des entretiens semi-directifs ont été réalisés auprès :

- des agents techniques de maintenance .
- des opérateurs de production .
- du personnel de supervision des utilités industrielles.

Ces échanges ont permis d'intégrer la dimension humaine et opérationnelle de l'étude.

1. Conditions environnementales du local compresseur

Les opérateurs ont signalé que le local des compresseurs subit des températures très élevées durant la période estivale, ce qui aggrave les problèmes de refroidissement du circuit d'huile.

Cette observation concorde avec les exigences thermiques mentionnées dans la documentation technique du constructeur concernant la nécessité d'une ventilation efficace et d'un refroidissement permanent des équipements.

2. Symptômes précurseurs des défaillances

Les opérateurs ont également rapporté plusieurs signes avant-coureurs précédant les défaillances majeures :

- sifflements mécaniques anormaux .
- vibrations excessives .
- augmentation progressive de la température .
- fluctuations de pression .
- bruit inhabituel des roulements.

Ces symptômes apparaissaient parfois plusieurs jours avant les ruptures définitives des pignons ou des roulements.

3. Pratiques de maintenance observées

Les échanges avec les équipes techniques ont révélé que certaines interventions sur les accouplements étaient réalisées en situation d'urgence afin de limiter les temps d'arrêt de production.

Dans plusieurs cas, les opérations de réalignement des arbres étaient effectuées sans système de lignage laser de précision, ce qui favorise :

- les défauts de coaxialité .
- les contraintes mécaniques sur les roulements .
- l'usure accélérée des flectors .
- les vibrations permanentes.

Cette situation explique en partie le caractère récurrent et systémique des défaillances observées sur les organes de transmission.

Les opérateurs ont signalé :

- des températures élevées .
- des vibrations excessives .
- des sifflements mécaniques .
- des fluctuations de pression .
- des défauts de lignage.

Synthèse des données exploitées pour l'analyse Pareto

Synthèse des données exploitées pour l'analyse Pareto Le recoupement des informations issues :

- de la GMAO .
- des rapports d'intervention .
- des entretiens terrain .

a permis de consolider une base de données fiable pour l'étude des défaillances des compresseurs GA 110.

Cette consolidation a permis :

- d'identifier les composants critiques .
- de qualifier précisément les types de pannes .
- d'estimer leur fréquence et leur gravité .
- d'établir les priorités de maintenance .
- de préparer l'analyse de criticité AMDEC et le diagramme de Pareto.

Les principaux modes de défaillance retenus concernent principalement :

- les roulements .
- les engrenages .
- le bloc vis .
- le système d'accouplement .
- le circuit de refroidissement et de lubrification.

Ces données serviront de base quantitative pour l'identification des causes majeures d'indisponibilité des compresseurs et l'élaboration du plan d'amélioration de maintenance préventive.

TABLE 3.2 – Tableau de synthèse des défaillances (Classé par ordre décroissant d’impact)

Code Organe	Sous-ensemble / Composant en panne	Nature des défaillances constatées (Symptômes & Effets)	Nbre de pannes (N)	Temps d’arrêt total (Heures)	Part relative (%)	Cumul (%)
BV-01	Bloc vis & Engrenages	Cisaillement du pignon d’attaque, usinage anormal de l’arbre de vis, grippage mécanique.	3	400 h	43,0 %	43,0 %
RL-02	Roulements de l’élément	Usure prématurée, éclatement des cages à rouleaux (Réf. NJ2106515, N42208).	4	250 h	26,9 %	69,9 %
AC-03	Accouplement & Flector	Rupture et lacération systématique du flector élastique, défaut d’alignement moteur/vis.	5	120 h	12,9 %	82,8 %
TH-04	Circuit Thermique	Alarmes et déclenchements pour élévation de température critique (>120°C à 130°C).	2	80 h	8,6 %	91,4 %
EL-05	Armoire Électrique & Capteurs	Défauts d’alimentation, mauvais contacts, défaillance des sondes de pression/température.	2	48 h	5,2 %	96,6 %
CH-06	Circuit Hydraulique & Étanchéité	Fuites d’huile chroniques, usure des flexibles haute pression, remplacement de joints toriques.	5	24 h	2,6 %	99,2 %
LB-07	Lubrification courante	Consommation excessive de fluide, appoints d’huile répétitifs hors planification.	3	8 h	0,8 %	100,0 %
TOTAL	-	-	24	930 h	100 %	-

3.7 Diagramme de Pareto des défaillances

À partir des données consolidées issues de la GMAO, des rapports d’intervention et des entretiens terrain, les principales défaillances recensées sur les compresseurs Atlas Copco GA 110 ont été classées selon leur impact sur l’indisponibilité des équipements.

L’analyse montre que les pannes liées aux roulements, aux engrenages et au système d’accouplement représentent la majorité des arrêts critiques de production.

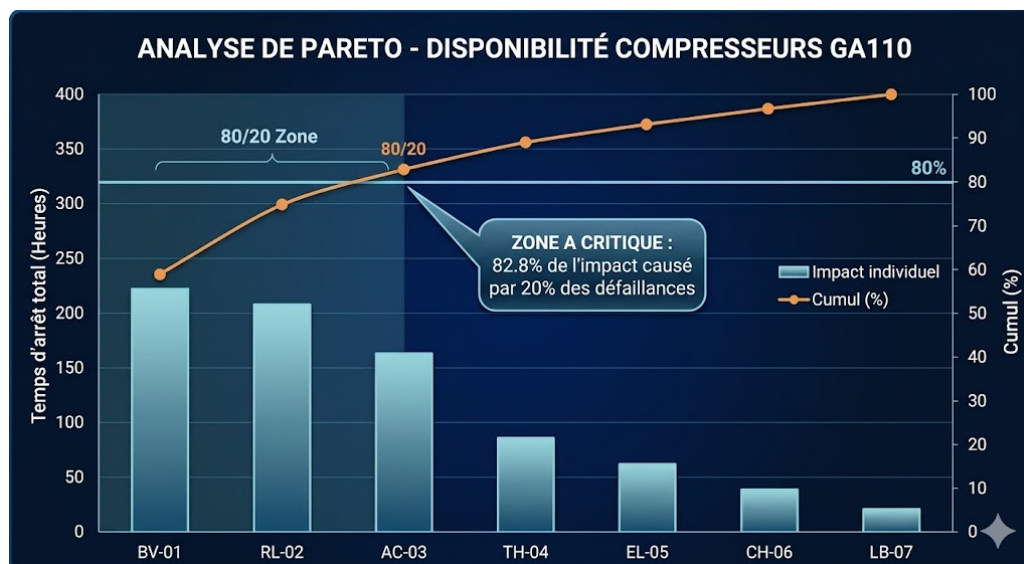


FIGURE 3.5 – Diagramme de Pareto des défaillances des compresseurs Atlas Copco GA110 : classement par temps d’arrêt cumulé et courbe des 80/20 au sein de l’ENAP-UPSA durant la période 2018–2023.

3.7.1 Interprétation du diagramme de Pareto

Le diagramme de Pareto présenté ci-dessus met en évidence la répartition des temps d’arrêt des compresseurs GA 110 selon les différents types de défaillances recensées durant la période d’étude.

Cette analyse permet d’identifier les causes majeures responsables de l’indisponibilité des équipements et d’orienter les actions de maintenance vers les éléments les plus critiques. L’histogramme montre que les trois premières catégories de défaillances, à savoir :

- BV-01 : Bloc vis et transmission mécanique .
- RL-02 : Roulements principaux .
- AC-03 : Accouplement et flector .

représentent à elles seules la plus grande part des temps d’arrêt cumulés des compresseurs. La courbe cumulative indique que ces trois défaillances atteignent environ 82,8 % de l’impact global sur l’indisponibilité des machines, ce qui correspond à la zone critique dite « 80/20 » du principe de Pareto.

Cette observation confirme que la majorité des perturbations de production est provoquée par un nombre limité de causes techniques fortement critiques. Les organes mécaniques de transmission constituent donc le principal point faible des compresseurs étudiés.

L’analyse des rapports d’intervention et des observations terrain permet d’expliquer cette criticité par plusieurs facteurs :

- des défauts d’alignement entre le moteur et le bloc vis .
- des vibrations excessives .

- des surcharges mécaniques sur les roulements .
- une insuffisance de refroidissement du circuit d’huile .
- des interventions correctives réalisées dans l’urgence sans contrôle précis de lignage.

Les défaillances thermiques (TH-04) occupent également une position importante dans le diagramme. Elles sont principalement associées à l’encrassement des radiateurs, à la dégradation de l’huile de lubrification et aux fortes températures ambiantes du local compresseur. Ces phénomènes thermiques aggravent progressivement l’usure des composants mécaniques et accélèrent la dégradation des roulements et des engrenages.

En revanche, les autres catégories de pannes telles que :

- EL-05 : Défautes électriques .
- CH-06 : Défautes de circuit hydraulique .
- LB-07 : Lubrification secondaire et petites fuites .

présentent un impact relativement faible sur le temps total d’arrêt. Ces défaillances appartiennent à la zone secondaire du diagramme de Pareto et ne constituent pas des priorités immédiates dans le cadre du plan d’amélioration de maintenance.

Ainsi, cette analyse démontre que les efforts de maintenance préventive doivent être prioritairement concentrés sur :

- le contrôle vibratoire des roulements .
- le réalignement laser des accouplements .
- la surveillance thermique du bloc vis .
- l’amélioration du refroidissement du circuit d’huile .
- le suivi conditionnel des organes de transmission.

Le diagramme de Pareto constitue donc un outil d’aide à la décision particulièrement efficace, car il permet de hiérarchiser les actions correctives et d’optimiser les ressources de maintenance en ciblant directement les causes responsables de la majorité des pertes de disponibilité des compresseurs GA 110.

3.7.2 Résultats de l’analyse de Pareto

Les résultats obtenus à partir du diagramme de Pareto démontrent clairement que les défaillances mécaniques liées au système de transmission représentent la principale source d’indisponibilité des compresseurs GA 110. En effet, les trois catégories critiques identifiées — le bloc vis et la transmission (BV-01), les roulements principaux (RL-02) et l’accouplement flexible (AC-03) — totalisent à elles seules environ 82,8 % du temps global d’arrêt des équipements.

Cette forte concentration des arrêts confirme l’existence d’un problème systémique affectant principalement :

- l’alignement mécanique des arbres .
- les conditions de lubrification et de refroidissement .
- la qualité des interventions de maintenance corrective.
- la stabilité vibratoire des ensembles tournants .

Les observations terrain et les historiques de maintenance montrent également que les défaillances thermiques jouent un rôle aggravant dans la détérioration des organes mécaniques. Les températures élevées enregistrées sur les compresseurs accélèrent l’usure des roulements, provoquent la dégradation de l’huile de lubrification et augmentent les contraintes sur les engrenages et les accouplements.

L’étude met aussi en évidence que les défauts secondaires tels que les petites fuites, les anomalies électriques ou les appoints de lubrification présentent un impact relativement faible sur la disponibilité globale des machines. Leur contribution aux temps d’arrêt reste limitée par rapport aux défaillances mécaniques critiques.

À travers cette analyse, il apparaît clairement que la performance des compresseurs peut être significativement améliorée par :

- la mise en place d’un programme de surveillance vibratoire .
- l’utilisation d’un système de lignage laser pour les accouplements .
- l’amélioration du refroidissement du local compresseur .
- le suivi régulier de la qualité de l’huile .
- l’application d’une maintenance préventive conditionnelle ciblée.[27]

3.8 Conclusion

L’analyse de Pareto réalisée sur les compresseurs Atlas Copco GA 110 de l’ENAP de Souk Ahras a permis d’identifier avec précision les principales causes responsables des arrêts répétitifs et de l’indisponibilité des équipements.

Les résultats obtenus montrent que la majorité des défaillances provient d’un nombre limité de composants critiques appartenant essentiellement au système de transmission mécanique et au circuit thermo-hydraulique. Les roulements, les engrenages, les accouplements et les phénomènes de surchauffe constituent les éléments les plus pénalisants pour la continuité de production.

Cette étude a également mis en évidence l’importance des facteurs opérationnels et organisationnels, notamment :

- les conditions thermiques défavorables du local .
- l’absence d’outils de lignage de précision .
- les interventions correctives d’urgence .
- l’insuffisance du suivi conditionnel des équipements.

L'utilisation du diagramme de Pareto a ainsi permis de hiérarchiser les priorités de maintenance et de concentrer les efforts sur les causes ayant le plus fort impact économique et technique.

Cette démarche constitue une base essentielle pour la suite du mémoire, notamment pour :

- l'analyse AMDEC des composants critiques .
- l'étude RCFA des causes racines .
- l'élaboration d'un plan de maintenance préventive optimisé .
- l'amélioration de la fiabilité et de la disponibilité des compresseurs industriels.

En définitive, l'application des outils d'analyse de maintenance industrielle permet non seulement de réduire les arrêts non planifiés, mais également d'améliorer durablement la performance, la sécurité et la rentabilité des installations de production.

Chapitre 4

Historique technique et contexte industriel du compresseur

Dans les industries de fabrication des peintures et vernis, l'air comprimé représente une énergie industrielle indispensable au fonctionnement des équipements de production. À l'unité de production de Souk Ahras de l'Entreprise Nationale des Peintures (ENAP), le système d'air comprimé constitue l'une des principales utilités industrielles assurant la continuité des opérations de fabrication.

Le compresseur Atlas Copco GA 110 étudié dans ce travail joue un rôle central dans l'alimentation des différents équipements pneumatiques installés dans les ateliers de production. Il permet principalement :

- le fonctionnement des vérins pneumatiques .
- l'alimentation des vannes automatiques .
- le contrôle des systèmes de dosage ;
- le transfert des matières premières .
- le fonctionnement des lignes de conditionnement .
- ainsi que l'automatisation des procédés industriels.

Le compresseur est un modèle rotatif à vis lubrifié à injection d'huile, d'une puissance nominale de 122 kW et d'une pression maximale de fonctionnement de 10 bars. L'équipement a été mis en service en 2010 et fonctionne de manière continue afin d'assurer la stabilité du réseau pneumatique de l'usine.

Depuis plusieurs années, ce compresseur a subi de nombreuses défaillances mécaniques et thermiques ayant provoqué des arrêts répétitifs de production. Les historiques de maintenance montrent particulièrement :

- des surchauffes répétitives .
- des vibrations mécaniques importantes .
- des usures prématurées des roulements .
- des problèmes de lubrification .

- des ruptures de flexibles .
- et des défauts d'alignement entre le moteur et le bloc vis.

L'analyse des interventions montre également que la stratégie de maintenance appliquée était principalement corrective. Les réparations étaient réalisées uniquement après apparition des défaillances, sans traitement des causes profondes des pannes.

Cette approche a entraîné :

- une augmentation progressive du nombre de défaillances .
- une baisse importante de la disponibilité du compresseur .
- une augmentation des coûts de maintenance .
- une perturbation de la chaîne de production .
- et une diminution du rendement industriel.

Dans ce contexte, il devient nécessaire de mettre en œuvre une approche scientifique de maintenance basée sur :

- la structuration des données techniques dans une GMAO .
- l'analyse de fiabilité à travers les indicateurs MTBF et MTTR .
- l'application de la méthode AMDEC .
- l'identification des causes racines par la méthode RCFA .
- et l'intégration de techniques de maintenance prédictive.

L'objectif principal de cette étude est d'améliorer la fiabilité et la disponibilité du système de production d'air comprimé afin d'assurer la continuité des activités industrielles de l'ENAP.

4.1 Analyse détaillée de l'historique des interventions

L'étude des archives techniques et des historiques de maintenance du compresseur Atlas Copco GA 110 a permis de reconstituer les principales opérations réalisées sur l'équipement entre 2017 et 2018, ainsi que les défaillances critiques observées durant son exploitation.

TABLE 4.1 – Historique des interventions de maintenance

Date	Intervention réalisée	Durée d'arrêt
09/07/2017	Entretien préventif suivant gamme 6300-2B	48 h
03/09/2017	Appoint d'huile	8 h
09/10/2017	Réparation générale du compresseur	60 h
22/01/2018	Entretien mécanique et électrique	18 h
05/02/2018	Vérification circuit hydraulique et électrique	40 h
01/03/2018	Réparation système d'injection d'huile	8 h
22/04/2018	Fabrication flexible d'huile	2 h
16/05/2018	Changement flexible d'huile	6 h
16/05/2018	Remplacement flexible compresseur	6 h

L'analyse de cet historique montre que les interventions les plus fréquentes concernent principalement :

- le système de lubrification .
- les organes mécaniques du bloc vis .
- les flexibles hydrauliques .
- ainsi que le circuit électrique et de régulation.

Les réparations lourdes réalisées sur le bloc vis ont nécessité des temps d'arrêt particulièrement importants. Ces interventions impliquent généralement :

- le démontage du compresseur .
- le remplacement des roulements .
- l'inspection des arbres .
- le contrôle des engrenages ;
- et les opérations de remontage et d'alignement.

L'analyse des données historiques montre également que plusieurs défaillances se répètent de manière cyclique malgré les interventions correctives réalisées. Cette situation indique l'existence d'une cause profonde non traitée.

4.2 Analyse du temps d'arrêt du compresseur

Le temps d'arrêt constitue un indicateur essentiel permettant d'évaluer l'impact réel des défaillances sur la production industrielle.

Le temps total d'arrêt du compresseur est calculé à partir de la somme des durées des différentes interventions enregistrées.

La relation utilisée est :

$$T_{\text{arrêt}} = 48 + 8 + 60 + 18 + 40 + 8 + 2 + 6 + 6$$

Le résultat obtenu est :

$$T_{\text{arrêt}} = 196 \text{ heures}$$

Le compresseur a donc enregistré un arrêt cumulé de 196 heures.

Cette durée représente :

- plus de huit jours d'arrêt .
- une perte importante de disponibilité .
- une réduction du rendement industriel .
- et une baisse significative de la continuité de production.

Les interventions les plus pénalisantes concernent principalement :

- les réparations du bloc vis .
- les opérations mécaniques lourdes .
- et les défauts du système de lubrification.

L'analyse des arrêts montre également que les défaillances mécaniques du compresseur ont un impact beaucoup plus important que les pannes électriques ou hydrauliques simples.

4.3 Effet des défaillances sur la chaîne de production

Le compresseur Atlas Copco GA 110 constitue un équipement stratégique dans l'infrastructure industrielle de l'ENAP. Toute défaillance de ce système provoque des perturbations directes sur les différentes étapes de fabrication.

Arrêt des équipements pneumatiques

L'air comprimé est utilisé pour alimenter :

- les vérins pneumatiques .

- les vannes automatiques .
- les équipements de dosage .
- les convoyeurs pneumatiques .
- et les lignes de conditionnement.

Lorsque le compresseur s'arrête :

- la pression du réseau chute rapidement .
- les équipements deviennent inopérants .
- et la production est interrompue.

Cette situation provoque des arrêts immédiats des ateliers de fabrication.

Perturbation de la production

Les arrêts répétitifs du compresseur provoquent :

- des retards de fabrication .
- une désorganisation des ateliers .
- une baisse du rendement industriel .
- ainsi qu'une augmentation des temps improductifs.

Les interruptions fréquentes perturbent également :

- la planification des ordres de fabrication .
- la disponibilité du personnel .
- et les délais de livraison des produits finis.

Augmentation des coûts industriels

Les défaillances répétitives génèrent plusieurs catégories de coûts.

Coûts directs

- remplacement des roulements .
- réparation des engrenages .
- remplacement des flexibles .
- consommation d'huile .
- pièces de rechange .
- et main-d'œuvre de maintenance.

Coûts indirects

- arrêt de production .
- pertes de rendement .
- consommation énergétique .
- retards de livraison .
- et perte de productivité.

Dans plusieurs cas industriels, les coûts indirects des arrêts dépassent largement les coûts des pièces remplacées.

Dégradation de la qualité des produits

L'instabilité du réseau d'air comprimé influence directement la qualité des peintures produites.

Les principales conséquences observées sont :

- mauvaise pulvérisation .
- irrégularité du dosage .
- défauts de remplissage .
- mauvaise homogénéité .
- et perturbation des systèmes automatisés.

Ces anomalies affectent :

- la qualité finale du produit .
- la conformité industrielle .
- et la satisfaction des clients.

4.4 Structuration des données dans la GMAO

La Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO) constitue un outil essentiel pour :

- assurer la traçabilité des interventions .
- suivre les historiques de panne .
- planifier les opérations de maintenance .
- gérer les pièces de rechange .
- et améliorer les performances des équipements industriels.

L'analyse des archives techniques du compresseur a montré l'absence d'une structuration numérique standardisée des données de maintenance.

Pour améliorer cette situation, une arborescence fonctionnelle a été proposée.

4.4.1 Arborescence fonctionnelle du compresseur

Niveau 0 : Site industriel

ENAP – UP Souk Ahras

Niveau 1 : Service

UTIL-104 – Service Utilités

Niveau 2 : Équipement principal

COMP-GA110-01 – Compresseur Atlas Copco GA 110

Niveau 3 : Sous-ensembles techniques

- SUB-BLOCVIS-01 : Bloc vis et roulements .
- SUB-MOTR-01 : Moteur électrique .
- SUB-ACCPL-01 : Accouplement .
- SUB-LUBR-01 : Circuit de lubrification .
- SUB-REGUL-01 : Système de régulation.

Cette structure permet :

- l'identification rapide des organes défaillants .
- l'analyse des pannes récurrentes .
- le calcul des indicateurs de fiabilité .
- et la planification des maintenances préventives.

4.5 Analyse des indicateurs de fiabilité

4.5.1 Analyse du MTBF

Le MTBF représente le temps moyen de fonctionnement entre deux défaillances successives.

Il est calculé par :

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

L'analyse des historiques montre une diminution progressive du MTBF du bloc vis.

Cette baisse indique :

- une fréquence élevée des défaillances .
- une perte progressive de fiabilité .
- et une dégradation des performances mécaniques du compresseur.

Les principales causes de cette dégradation sont :

- l'usure des roulements .
- les vibrations .
- le désalignement .
- et les défauts de lubrification.

4.5.2 Analyse du MTTR

Le MTTR représente le temps moyen nécessaire pour réparer le compresseur après une panne.

Il est calculé par :

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

Les interventions simples sur les flexibles présentent des durées relativement faibles.

Cependant, les interventions lourdes sur le bloc vis nécessitent :

- le démontage du compresseur .
- le remplacement des pièces internes .
- l'usinage .
- le réalignement .
- et les essais de fonctionnement.

Ces opérations augmentent fortement le MTTR.

4.5.3 Analyse de la disponibilité

La disponibilité représente la capacité du compresseur à assurer sa fonction sans interruption.

Elle est calculée par :

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100$$

La baisse de disponibilité observée traduit :

- l'augmentation des temps d'arrêt .
- la fréquence élevée des défaillances .
- et la dégradation globale du système mécanique.

Une faible disponibilité affecte directement :

- la continuité de production .
- le rendement industriel .
- et la rentabilité économique de l'usine.

4.6 Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC)

L'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) constitue une méthode préventive utilisée dans le domaine de la maintenance industrielle afin d'identifier les défaillances potentielles des équipements, d'évaluer leurs conséquences sur le système de production et de définir les actions nécessaires pour réduire les risques de panne.

Dans cette étude, l'AMDEC a été appliquée au compresseur Atlas Copco GA 110 afin :

- d'identifier les organes les plus critiques .
- d'évaluer les risques liés aux défaillances .
- de hiérarchiser les interventions de maintenance .
- et d'améliorer la fiabilité du système de production d'air comprimé.

L'analyse a été réalisée principalement sur les sous-ensembles suivants :

- le bloc vis .

- les roulements .
- le système de lubrification .
- l'accouplement .
- les flexibles d'huile .
- ainsi que le système de régulation.

4.6.1 Principe de la méthode AMDEC

La méthode AMDEC repose sur l'analyse de trois paramètres principaux :

Fréquence d'apparition (F)

Ce paramètre représente le nombre d'apparitions de la défaillance.

Valeur	Signification
1	Rare
2	Occasionnelle
3	Fréquente
4	Très fréquente

Gravité (G)

La gravité représente l'impact de la défaillance sur la production.

Valeur	Signification
1	Faible impact
2	Impact moyen
3	Impact important
4	Arrêt total de production

Détection (D)

Ce paramètre représente la capacité de détecter la défaillance avant qu'elle ne provoque un arrêt.

Valeur	Signification
1	Détection facile
2	Détection moyenne
3	Détection difficile
4	Défaillance non détectable

Calcul de la criticité

La criticité est calculée par la relation suivante :

$$C = F \times G \times D$$

Cette relation permet d'évaluer le niveau de risque associé à chaque défaillance.

4.6.2 Tableau AMDEC du compresseur Atlas Copco GA 110

TABLE 4.2 – AMDEC du compresseur Atlas Copco GA 110

Sous-ensemble	Mode de défaillance	Causes possibles	Effets sur le système	F	G	D	C
Bloc vis	Usure des roulements	Vibrations et mauvais alignement	Échauffement et arrêt du compresseur	4	4	2	32
Pignon d'attaque	Rupture mécanique	Fatigue et surcharge	Perte de compression	3	4	3	36
Accouplement	Désalignement	Mauvais montage	Vibrations importantes	3	3	2	18
Flexibles d'huile	Fuite d'huile	Vieillessement thermique	Perte de lubrification	3	3	1	9
Système de lubrification	Mauvaise circulation d'huile	Filtre bouché	Surchauffe du bloc vis	3	4	2	24
Sonde thermique	Défaut de mesure	Usure électrique	Mauvaise détection de température	2	3	3	12
Moteur électrique	Échauffement	Surcharge	Arrêt du compresseur	2	4	2	16

4.6.3 Interprétation des résultats AMDEC

L'analyse AMDEC montre que les organes les plus critiques du compresseur sont :

- le pignon d'attaque .
- les roulements du bloc vis .
- et le système de lubrification.

Les valeurs de criticité élevées observées sur ces composants indiquent que ces éléments présentent :

- une fréquence importante de défaillance .
- des conséquences graves sur la production .
- et une difficulté de détection avant la panne.

Les roulements présentent une criticité élevée de :

$$C = 4 \times 4 \times 2 = 32$$

Cette valeur montre que l'usure des roulements constitue une menace majeure pour la disponibilité du compresseur.

Le pignon d'attaque présente la criticité la plus élevée :

$$C = 3 \times 4 \times 3 = 36$$

Cette défaillance peut provoquer :

- une destruction du système de transmission .
- une perte immédiate de compression .
- et un arrêt total des ateliers.

L'analyse montre également que les défaillances du système de lubrification jouent un rôle important dans l'apparition des problèmes mécaniques internes.

4.6.4 Actions correctives proposées après l'AMDEC

Suite aux résultats obtenus, plusieurs actions d'amélioration ont été proposées.

Maintenance prédictive

- mise en place d'une surveillance vibratoire .
- suivi thermique des roulements .
- contrôle périodique des vibrations.

Contrôle d'alignement

- réalisation d'un lignage laser .
- contrôle géométrique des arbres .
- réduction des vibrations mécaniques.

Amélioration du système de lubrification

- remplacement périodique des filtres .
- analyse régulière de l'huile .
- contrôle des pressions d'huile.

Gestion des pièces de rechange

- disponibilité des roulements .
- disponibilité des joints et flexibles .
- réduction des délais d'intervention.

4.7 Analyse RCFA (Root Cause Failure Analysis)

La méthode RCFA (Root Cause Failure Analysis) est une méthode d'analyse utilisée pour identifier les causes profondes des défaillances répétitives des équipements industriels.

Contrairement à la maintenance corrective classique qui traite uniquement les symptômes visibles de la panne, la RCFA cherche à identifier :

- l'origine réelle du problème .
- les causes techniques .
- les causes organisationnelles .
- et les causes humaines.

L'objectif principal de cette méthode est d'éliminer définitivement les causes des défaillances afin d'éviter leur répétition.

Dans cette étude, la méthode RCFA a été appliquée à la défaillance thermique répétitive du compresseur Atlas Copco GA 110.

Description de la défaillance observée

Le compresseur présentait des arrêts répétitifs causés par une élévation excessive de la température du bloc vis.

La température dépassait régulièrement :

$$T > 130^{\circ}C$$

Cette surchauffe provoquait :

- l’arrêt automatique du compresseur .
- le déclenchement des sécurités .
- et l’arrêt des installations de production.

Analyse des “5 Pourquoi”

Premier Pourquoi : Pourquoi le compresseur s’est-il arrêté ?

Parce que la température du bloc vis a dépassé la limite de sécurité.

Deuxième Pourquoi : Pourquoi la température a-t-elle augmenté ?

Parce qu’il existait des frottements mécaniques importants dans le bloc vis.

Troisième Pourquoi : Pourquoi les frottements étaient-ils importants ?

Parce que les roulements et le pignon d’attaque étaient fortement usés.

Quatrième Pourquoi : Pourquoi les roulements se détériorent rapidement ?

Parce que le système présentait des vibrations importantes et un mauvais alignement mécanique.

Cinquième Pourquoi : Pourquoi le désalignement persistait-il ?

Parce que les opérations de maintenance ne comportaient pas :

- de contrôle de lignage laser .
- de contrôle vibratoire .
- ni de validation géométrique après remontage.

Cause racine identifiée

L’analyse RCFA a permis de conclure que la cause principale des défaillances répétitives est :

l’absence de contrôle précis de l’alignement mécanique entre le moteur électrique et le bloc vis lors des opérations de maintenance.

Cette situation provoque :

- des vibrations permanentes .
- des contraintes mécaniques importantes .
- une usure accélérée des roulements .
- et une dégradation progressive du système de compression.

Actions correctives issues de la RCFA

Suite à l'analyse RCFA, plusieurs recommandations ont été proposées afin d'éliminer définitivement les causes des défaillances.

Contrôle d'alignement laser

- vérification géométrique des arbres .
- correction des défauts d'alignement .
- contrôle après chaque intervention.

Analyse vibratoire

- surveillance mensuelle des vibrations .
- détection précoce des défauts .
- suivi de l'état des roulements.

Analyse d'huile

- contrôle de viscosité .
- détection des particules métalliques .
- surveillance de l'usure interne.

Maintenance prédictive

- mise en place d'un plan de maintenance conditionnelle .
- exploitation des données GMAO .
- suivi des indicateurs de fiabilité.

Conclusion de l'analyse RCFA

L'analyse RCFA a permis de démontrer que les défaillances répétitives du compresseur ne sont pas uniquement dues à l'usure normale des composants, mais principalement à un problème structurel d'alignement mécanique non traité lors des interventions précédentes.

Conclusion Générale

Ce projet avait pour ambition de démontrer qu’une défaillance industrielle, bien loin d’être un simple aléa technique imprévisible, constitue en réalité un signal précieux. En adoptant une approche méthodique et systémique – de l’analyse des concepts fondamentaux de la défaillance jusqu’à l’application d’outils rigoureux comme le RCFA (Root Cause Failure Analysis) et l’AMDEC – nous avons montré qu’il est possible de transformer chaque panne en une opportunité d’apprentissage et d’amélioration durable.

Notre travail a suivi un fil conducteur clair. D’abord, nous avons posé les bases théoriques en définissant l’anatomie de la défaillance (mode, cause, mécanisme, conséquence) et en introduisant la pyramide de la fiabilité, qui illustre comment des micro-incidents quotidiens, s’ils sont négligés, peuvent conduire à des pannes majeures coûteuses et dangereuses. Nous avons également souligné que les enjeux d’une telle analyse ne sont pas seulement techniques : ils sont profondément économiques (réduction du coût du cycle de vie), sécuritaires (protection des personnes et de l’environnement) et organisationnels (création d’une organisation apprenante).

Ensuite, nous avons déployé une méthodologie complète combinant plusieurs outils complémentaires : les 5 Pourquoi, l’arbre des causes, le diagramme d’Ishikawa (5M), l’AMDEC pour l’évaluation de la criticité, et l’arbre de défaillance (FTA) pour la modélisation probabiliste. Cette boîte à outils nous a permis de distinguer trois niveaux de causalité – physique, humain et systémique – et d’éviter ainsi l’écueil d’une analyse superficielle qui se contenterait de remplacer un composant sans jamais remettre en cause les processus sous-jacents.

L’application concrète de cette démarche au sein de l’unité de production de Souk-Ahras (ENAP) sur le compresseur Atlas Copco GA 110 a constitué la validation terrain de notre approche. Grâce à une analyse de Pareto des données extraites de la GMAO, nous avons identifié cet équipement comme le plus critique. Puis, en calculant des indicateurs de fiabilité (MTBF, MTTR, disponibilité) et en menant successivement une AMDEC puis une analyse RCFA approfondie, nous avons pu remonter jusqu’aux causes racines latentes – souvent organisationnelles ou procédurales – responsables des arrêts récurrents. Les actions correctives proposées ne visent plus seulement à réparer, mais à prévenir durablement.

En définitive, ce projet confirme que la fiabilité ne se décrète pas : elle se construit pas à pas, par une analyse rigoureuse des défaillances passées. La généralisation d’une telle culture d’investigation, appuyée sur des outils structurés et une organisation apprenante, permettrait à l’ENAP et plus largement à toute industrie de transformer ses vulnérabilités

en forces. La panne, dès lors qu'elle est correctement interrogée, cesse d'être un fardeau subi pour devenir un moteur de progrès continu.

Bibliographie

- [1] AFNOR. *NF EN 13306 : Maintenance – Terminologie de la maintenance*. Paris : Association Française de Normalisation, 2018.
- [2] Gilles ZWINGELSTEIN. *Maintenance industrielle : concepts et méthodes*. Paris : Dunod, 1996.
- [3] *Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines*. Geneva : ISO, 2018.
- [4] Gilles ZWINGELSTEIN. *Maintenance industrielle : Concepts et méthodes*. Paris : Dunod, 2007.
- [5] « Mécanismes de défaillance en mécanique ». In : *Techniques de l'Ingénieur* BM 4 150 (2010).
- [6] François MONCHY. *Maintenance industrielle : maintenance corrective et préventive*. Paris : Dunod, 2015.
- [7] Charles KEPNER et Benjamin TREGOE. *The New Rational Manager*. Princeton : Princeton Research Press, 1997.
- [8] CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY. *Guidelines for Investigating Chemical Process Incidents*. New York : AIChE, 2003.
- [9] *Root Cause Analysis*. International Electrotechnical Commission, 2015.
- [10] James REASON. *Human Error*. Cambridge : Cambridge University Press, 1990.
- [11] *Quality Management Systems – Requirements*. International Organization for Standardization, 2015.
- [12] W. Edwards DEMING. *Out of the Crisis*. Cambridge : MIT Press, 1986.
- [13] Nancy LEVESON. *Engineering a Safer World*. Cambridge : MIT Press, 2011.
- [14] R. Keith MOBLEY. *Root Cause Failure Analysis*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 1999.
- [15] James REASON. *Managing the Risks of Organizational Accidents*. Aldershot : Ashgate, 1997.
- [16] Jeffrey K. LIKER. *The Toyota Way*. New York : McGraw-Hill, 2004.
- [17] Ted S. FERRY. *Modern Accident Investigation and Analysis*. New York : Wiley, 1988.
- [18] Douglas C. MONTGOMERY. *Introduction to Statistical Quality Control*. New York : Wiley, 2012.
- [19] Kaoru ISHIKAWA. *What is Total Quality Control ? The Japanese Way*. New Jersey : Prentice Hall, 1985.
- [20] D. H. STAMATIS. *Failure Mode and Effect Analysis : FMEA from Theory to Execution*. Milwaukee : ASQ Quality Press, 2003.

- [21] Clifton A. ERICSON. *Hazard Analysis Techniques for System Safety*. Hoboken : Wiley, 2005.
- [22] W. E. VESELY et al. *Fault Tree Handbook*. Rapp. tech. USA : U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1981.
- [23] ENAP - ENTREPRISE NATIONALE DES PEINTURES. *Historique et présentation institutionnelle*. Consulté le : [à compléter]. Lakhdaria, Algérie, 2016. URL : <https://www.enap.dz/fr/historique.php>.
- [24] J.M. JURAN et J.A. DE FEO. *Juran's Quality Handbook : The Complete Guide to Performance Excellence*. 6^e éd. New York : McGraw-Hill, 2010. ISBN : 978-0-07-162973-7.
- [25] ATLAS COPCO AIRPOWER NV. *Compresseurs rotatifs à vis lubrifiées GA 90+/GA 110-160 - Documentation technique*. Référence brochure : 2935 2678 02 15. Belgique, 2015. URL : <https://www.atlascopco.com>.
- [26] ATLAS COPCO. *Instruction Manual - Stationary Air Compressors GA 90 - GA 110 - GA 132 - GA 160*. Référence interne constructeur. Atlas Copco Airpower NV. Belgique.
- [27] ENAP - UNITÉ DE PRODUCTION DE SOUK-AHRAS (UPSA). *Historique de maintenance des compresseurs Atlas Copco GA 110 - Données GMAO et rapports d'intervention*. Document interne. Souk-Ahras, Algérie, 2018–2023.