



Ministry of Higher Education and Scientific Research

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Badji Mokhtar - Annaba University

جامعة باجي مختار - عنابة

Faculty of Technology

كلية التكنولوجيا

Department of Mechanical Engineering

قسم الهندسة الميكانيكية



Domaine : Sciences et Technologie

الميدان : علوم و تكنولوجيا

Spécialité : Ingénierie de la maintenance

الشعبة : هندسة ميكانيكية

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

Les outils et les méthodes de sureté de fonctionnement du tour HB 725

Présentée par : Chahi Aya

Encadrant : Khelif Rabia

Jury de soutenance :

| | | | |
|----------------------|-----|----------------------------------|-----------|
| Benamira Mohamed | MCA | Université Badji Mokhtar- Annaba | Président |
| Khelif Rabia | Pr | Université Badji Mokhtar- Annaba | Encadrant |
| Kallouche Abdelkader | MCB | Université Badji Mokhtar- Annaba | Examineur |

Année universitaire : 2024/2025

Mes remerciements s'adressent en premier lieu, à mon Dieu tout puissant qui m'a aidé pour mener ce travail.

Je tiens à remercier mon encadrant, Professeur KHELIF RABIA pour ses précieux conseils et ses encouragements durant le déroulement de ce travail, pour sa patience et sa disponibilité.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury, de m'avoir fait l'honneur de juger mon travail et d'assister à la soutenance.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à ma famille pour son soutien indéfectible, son amour et ses encouragements constants. Je remercie également toutes les personnes qui, par leurs conseils, leur aide ou leur motivation, ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.



{ وَأَنْ لَّيْسَ لِلْإِنْسَانِ إِلَّا مَا سَعَى، وَأَنَّ سَعْيَهُ سَوْفَ يُرَى }
{ سورة النجم، الآيتان 39- 40 }

Avant tout, je dédie ce travail à moi-même,
pour les efforts silencieux, les moments de doute, les nuits de travail, les pensées d'abandon,
et surtout, pour avoir persévéré jusqu'au bout, même quand tout semblait difficile.

À mes parents, mes piliers:

Merci pour votre amour sans limite, pour votre patience infinie,
vos prières discrètes, votre confiance inébranlable, même dans mes silences.

Vous avez été ma force et mon refuge.

À ma sœur Amina,

Merci pour ta présence constante, ton soutien dans les moments d'épuisement,
et pour m'avoir toujours encouragée avec tendresse et sagesse.

Et à tous ceux qui m'ont soutenue dans l'ombre, par un mot, un regard ou un geste:

votre aide silencieuse a été d'une force immense.

Ce succès est aussi le vôtre.

| | |
|--|-----------|
| Listes des figures | |
| Liste des tableaux | |
| Résumé | |
| Abstract | |
| الملخص | |
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre I. Etude de la machine | |
| I.1 Introduction..... | 3 |
| I.2 Bref aperçu sur l'entreprise | 3 |
| I.2.1 Localisation et infrastructure | 3 |
| I.2.2 Historique | 3 |
| I.2.3 Activité industrielle..... | 5 |
| I.2.4 Organisation et moyens humains..... | 5 |
| I.2.5 Organigramme Actuel de l'entreprise | 7 |
| I.2.6 Gamme de produit | 8 |
| I.2.7 Les Principaux Procédés de Production et de Fabrication | 9 |
| I.2.8 Projets de l'entreprise | 10 |
| I.3 Sélection de la machine à étudier | 10 |
| I.3.1 Méthode ABC | 10 |
| I.3.2 Justification du choix : Tour HB 725 | 14 |
| I.4 Historique de la machine..... | 14 |
| I.5 Analyse fonctionnelle de la machine | 20 |
| I.6 Conclusion | 21 |
| Chapitre II. Outils et méthodes au service de la sûreté de fonctionnement | |
| II.1 Introduction | 23 |
| II.2 Brainstorming fonctionnel..... | 23 |
| II.2.1 Définition | 23 |
| II.2.2 Objectifs du Brainstorming..... | 23 |
| II.2.3 Domaines d'application..... | 24 |
| II.2.4 Le rôle de l'animateur | 24 |
| II.2.5 Les règles du Brainstorming | 24 |
| II.2.6 Principes fondamentaux du brainstorming..... | 25 |
| II.2.7 Les étapes du Brainstorming | 25 |
| II.3 Bête à Corne..... | 26 |
| II.3.1 Définition | 26 |
| II.4 Le Diagramme Pieuvre | 27 |

| | |
|--|-----------|
| II.4.1 Définition | 27 |
| II.5 Arbre de défaillance | 28 |
| II.5.1 Définition | 28 |
| II.5.2 Construction de l'arbre..... | 28 |
| II.5.3 Utilités des arbres de défaillance | 29 |
| II.5.4 Représentation de la méthode de l'arbre de défaillance..... | 29 |
| II.5.5 L'Objectif de l'arbre de défaillance : | 31 |
| II.6 Diagramme cause à effet (Ishikawa)..... | 31 |
| II.6.1 Le but d'Ishikawa | 32 |
| II.6.2 Méthodologie d'Ishikawa | 32 |
| II.7 Approche par les risques : Analyse AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances de leur Effet et de leur Criticité) :..... | 32 |
| II.7.1 Définition | 32 |
| II.7.2 Le but de l'AMDEC..... | 33 |
| II.7.3 Types d'AMDEC | 33 |
| II.7.4 Les étapes nécessaires pour une méthode AMDEC complète | 35 |
| II.8 Le Kaizen..... | 37 |
| II.8.1 Définition | 37 |
| II.8.2 Principes fondamentaux de Kaizen | 38 |
| II.8.3 Les étapes de Kaizen..... | 38 |
| II.9 Conclusion..... | 39 |
| Chapitre III. Etude de cas | |
| III.1 Introduction..... | 41 |
| III.2 Brainstorming | 41 |
| III.2.1 Présentation du sujet par l'animateur | 41 |
| III.2.2 Production d'idées..... | 41 |
| III.2.3 Regroupement des idées..... | 41 |
| III.2.4 Synthèse et conclusion de la séance | 42 |
| III.3 Bête à corne | 42 |
| III.4 Le Diagramme Pieuvre..... | 43 |
| III.5 Analyse statistique | 44 |
| III.5.1 Méthode ABC | 44 |
| III.5.2 La moyenne des temps d'arrêt (MTA) :..... | 46 |
| III.5.3 La variance..... | 48 |
| III.5.4 L'écart-type..... | 48 |
| III.5.5 Taux d'arrêt | 48 |

| | |
|--|-----------|
| III.5.6 La maintenabilité : | 48 |
| III.6 Arbre de défaillance : | 50 |
| III.7 Diagramme cause à effet (Ishikawa) : | 51 |
| III.8 Approche par les risques (L'AMDEC) : | 52 |
| III.9 Conclusion | 53 |
| Chapitre IV. Proposition d'amélioration (Plan de maintenance) | |
| IV.1 Introduction | 55 |
| IV.2 Objectifs du plan de maintenance | 55 |
| IV.3 Choix de la méthode de maintenance la plus adaptée | 56 |
| IV.4 Adoption de la maintenance préventive : une stratégie optimale pour la fiabilité du tour HB 725..... | 58 |
| IV.4.1 Plan de maintenance détaillé | 58 |
| IV.5 Renforcement des compétences du personnel : clé de réussite du plan de maintenance | 59 |
| IV.5.1 Formation des opérateurs (utilisateurs directs de la machine) | 59 |
| IV.5.2 Formation des techniciens de maintenance | 60 |
| IV.5.3 Formation du personnel d'encadrement..... | 60 |
| IV.5.4 Formation en sécurité spécifique à la machine | 61 |
| IV.5.5 Application de la démarche Kaizen au tour HB 725 | 61 |
| IV.6 Conclusion..... | 64 |
| Conclusion générale | 65 |

Liste des figures

Chapitre I. Eude de la machine

| | |
|--|----|
| Figure I.1 : L'entreprise FERROVIAL..... | 3 |
| Figure I.2 : Logo FERROVIAL..... | 4 |
| Figure I.3 : Plan de masse de l'entreprise..... | 6 |
| Figure I.4 : Organigramme général de l'entreprise FERROVIAL..... | 7 |
| Figure I.5 : Locomotive de manœuvre..... | 8 |
| Figure I.6 : Centrale à béton..... | 8 |
| Figure I.7 : Pièces forgées..... | 9 |
| Figure I.8 : Courbe ABC des machines selon le nombre d'heure d'arrêt suite aux pannes..... | 13 |
| Figure I.9 : Photo réelle de la machine HB 725 (prise à FERROVIAL ANNABA)..... | 14 |
| Figure I.10 : Vue générale du tour HB 725 avec réparation des principaux organes Fonctionnels..... | 21 |

Chapitre II. Outils et méthodes au service de la sûreté de fonctionnement

| | |
|--|----|
| Figure II.1 : Bête à corne..... | 27 |
| Figure II.2 : Diagramme Pieuvre..... | 27 |
| Figure II.3 : Diagramme Ishikawa..... | 31 |
| Figure II.4 : La démarche de l'AMDEC..... | 36 |

Chapitre III. Etude de cas

| | |
|--|----|
| Figure III.1 : Bête à corne du tour HB 725..... | 40 |
| Figure III.2 : Pieuvre du tour HB 725..... | 41 |
| Figure III.4 : Courbe ABC des catégories de défaillance de la tour HB 725 en fonction du nombre d'occurrences..... | 43 |
| Figure III.3 : Courbe de la maintenabilité $M(t)$ en fonction du temps t (en heure)..... | 47 |
| Figure III.5 : Arbre de défaillance du roulement..... | 48 |
| Figure III.6 : Diagramme Ishikawa..... | 49 |

Chapitre IV. Proposition d'amélioration (Plan de la maintenance)

| | |
|--|----|
| Figure IV.1 : Démarche suivie pour le choix d'un type de maintenance..... | 55 |
|--|----|

Liste des tableaux

Chapitre I. Eude de la machine

Tableau I.1 : Les techniques de production et de fabrication industrielle.....9

Tableau I.2 : Classification des machines selon la méthode ABC basée sur le nombre total d'heure d'arrêt suite aux pannes.....11

Tableau I.3 : Historique des pannes.....15

Chapitre II. Outils et méthodes au service de la sûreté de fonctionnement

Tableau II.1 : Symboles utilisés dans la construction d'un arbre de défaillance.....30

Tableau II.2 : Grille d'évaluation AMDEC à 10 niveaux.....37

Chapitre III. Etude de cas

Tableau III.1 : Fonctions et leurs significations.....41

Tableau III.2 : Classification des types de défaillance par la méthode ABC selon le nombre d'occurrences.....42

Tableau III.3 : Heures d'arrêt et leur équivalent en heures décimales (ordre croissant).....44

Tableau III.4 : Evolution de la maintenabilité $M(t)$ en fonction du temps t (en heures).....46

Tableau III.4 : Tableau d'Analyse AMDEC des Composants Critiques et des Actions Recommandées (Utilisation de grille de 10).....50

Chapitre IV. Proposition d'amélioration (Plan de la maintenance)

Tableau IV.1 : Plan de maintenance préventive détaillé du tour HB 725.....56

Tableau IV.2 : Tableau d'affichage du tour HB 725.....62

Tableau IV.3 : Tableau de suivi du tour HB 725.....62

Résumé

Ce mémoire traite de la sûreté de fonctionnement appliquée à une machine-outil spécifique : le tour HB 725 de l'entreprise FERROVIAL Annaba. Il s'inscrit dans une démarche d'amélioration continue visant à garantir la disponibilité, la fiabilité et la sécurité de l'équipement de production. Après avoir identifié cette machine comme critique à travers une analyse ABC basée sur les temps d'arrêt dus aux pannes, une étude approfondie a été menée. Différents outils méthodologiques de diagnostic et de prévention ont été mobilisés : brainstorming fonctionnel, analyse des fonctions (Bête à Corne, Pieuvre), diagramme d'Ishikawa, arbre de défaillance, et surtout l'analyse AMDEC. L'ensemble de ces outils a permis de mieux comprendre les causes de défaillance, d'évaluer leur criticité et de mettre en place un plan de maintenance préventive ciblé. Ce travail met également en évidence le rôle clé de la formation du personnel dans la pérennité des actions mises en œuvre. La méthodologie adoptée constitue un modèle reproductible pour d'autres équipements industriels.

Mots clés : Sûreté de fonctionnement, Tour, Maintenance, Défaillance

Abstract

This thesis focuses on the operational reliability of a specific machine tool: the HB 725 lathe used in the company Ferrovia Annaba. It is part of a continuous improvement strategy aimed at ensuring the availability, reliability, and safety of production equipment. After identifying the lathe as a critical asset through an ABC analysis based on failure-related downtimes, an in-depth study was conducted. Various diagnostic and preventive tools were applied: functional brainstorming, function analysis (horned beast, octopus diagram), Ishikawa diagram, fault tree analysis, and mainly FMECA. These methods helped identify the root causes of failures, assess their criticality, and develop a targeted preventive maintenance plan. The study also emphasizes the essential role of staff training in sustaining reliability efforts. The adopted methodology serves as a replicable model for other industrial machines.

Keywords: Operational safety, Tower, Maintenance, Failure

الملخص

يركز هذا البحث على دراسة موضوع السلامة التشغيلية لآلة صناعية محددة، وهي مخرطة HB 725 التابعة لشركة FERROVIAL ANNABA، وذلك في إطار استراتيجية تحسين مستمر تهدف إلى ضمان التوفر، الموثوقية، والسلامة للمعدات الإنتاجية. تم تحديد هذه الآلة على أنها من بين الأكثر حرجاً بناءً على تحليل ABC لعدد ساعات التوقف الناتجة عن الأعطال، مما استدعى إجراء دراسة معمقة. تم استخدام أدوات مختلفة في التحليل والتشخيص مثل (العصف الذهني الوظيفي، تحليل الوظائف طريقة الحيوان ذو القرون، مخطط الأخطبوط، مخطط Ishikawa، شجرة الأعطال، وتحليل AMDEC) لتقييم خطورة الأعطال وتحديد أولويات التدخل. كما أبرزت الدراسة أهمية التكوين المستمر للعمال والتقنيين في المحافظة على نتائج هذا العمل. تمثل المنهجية المتبعة نموذجاً يمكن تطبيقه على آلات أخرى ضمن نفس السياق الصناعي.

الكلمات المفتاحية: السلامة التشغيلية، البرج، الصيانة، الفشل.

Introduction générale

Dans le domaine industriel, la fiabilité et la continuité de fonctionnement des équipements constituent des facteurs clés pour assurer une production efficace, sécurisée et rentable. En particulier, les machines-outils occupent une place centrale dans les procédés de fabrication, et toute défaillance peut entraîner des arrêts de production coûteux, voire des accidents. C'est pourquoi il devient indispensable de mettre en œuvre des démarches méthodiques permettant d'évaluer et d'améliorer la sûreté de fonctionnement de ces équipements.

La sûreté de fonctionnement regroupe un ensemble d'aspects tels que la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité. Pour maîtriser ces paramètres, les ingénieurs ont recours à des outils d'analyse fonctionnelle, de diagnostic, et de gestion des risques. Ces outils permettent d'identifier les causes potentielles de défaillances, d'évaluer leur impact, et de proposer des solutions d'amélioration, notamment à travers des plans de maintenance préventive ou corrective.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette logique d'optimisation de la performance industrielle, à travers l'étude d'un tour HB 725 utilisé dans l'entreprise FERROVIAL Annaba. L'objectif est de mettre en œuvre différents outils et méthodes pour analyser le fonctionnement de la machine, détecter les principales sources de pannes et proposer des améliorations adaptées.

Ce travail est structuré en quatre chapitres :

Le premier présente l'entreprise, la machine étudiée, ainsi que le contexte du problème.

Le deuxième regroupe les outils et méthodes d'analyse utilisés dans le domaine de la sûreté de fonctionnement.

Le troisième chapitre applique ces outils au cas réel de la machine.

Enfin, le dernier chapitre propose des actions d'amélioration, notamment à travers un plan de maintenance adapté.

Chapitre I

Etude de la machine

I.1 Introduction

Ce chapitre présente successivement un aperçu de l'entreprise, la méthode de sélection de la machine, l'historique des pannes recensées, ainsi qu'une analyse fonctionnelle permettant de mieux comprendre la structure et le rôle des différents sous-ensembles de la tour HB 725. Cette étude constitue la base de l'analyse de la sûreté de fonctionnement qui sera développée dans les chapitres suivants.

I.2 Bref aperçu sur l'entreprise

I.2.1 Localisation et infrastructure

FERROVIAL Annaba est une entreprise publique à caractère économique implantée à environ 6 km à l'est de la ville d'Annaba, sur la route nationale n°16 reliant Annaba à El-Hadjar. Elle bénéficie d'un emplacement stratégique, à proximité du port d'Annaba et du complexe sidérurgique, ce qui facilite l'approvisionnement et l'expédition de ses produits. Son site industriel couvre une superficie totale de 32 hectares, dont 48 500 m² sont des surfaces couvertes dédiées à la production, au stockage et aux services techniques [1].



Figure I.1 : L'entreprise FERROVIAL [1].

I.2.2 Historique

L'entreprise FERROVIAL Annaba, spécialisée dans la fabrication et l'entretien de matériels ferroviaires, possède un long parcours industriel enraciné dans l'histoire économique algérienne. Elle trouve ses origines en 1938, sous l'appellation de la Société Nord-Africaine de Construction Métallique et Ferroviaire, installée à ALLELICK à proximité d'Annaba. À ses

débuts, l'entreprise se consacrait principalement à la production de matériels destinés aux forces militaires françaises, notamment durant la guerre d'Algérie. Après l'indépendance, elle connaît une première relance en 1965 sous la supervision d'un commissaire du gouvernement, avant d'être nationalisée en 1968 et intégrée dans le groupe public SN METAL. C'est en 1983, à la faveur d'une restructuration industrielle, qu'elle adopte officiellement le nom de FERROVIAL, avec un nouveau positionnement stratégique tourné vers la construction de wagons, de locomotives de manœuvre et d'équipements ferroviaires variés. L'entreprise a activement participé à plusieurs projets structurants, notamment dans les secteurs de la sidérurgie, des travaux publics, ou encore de la maintenance ferroviaire. Grâce à des investissements importants, notamment dans les années 1970 puis en 2018 avec un budget de plus de 4 milliards de dinars, FERROVIAL a modernisé son parc machine, introduisant des équipements à commande numérique et renforçant sa capacité de production. Elle s'est également illustrée par des partenariats solides avec la SNTF, notamment à travers le contrat de rénovation de 500 wagons signé en 2020, et sa contribution au projet de récupération de 3000 wagons hors service lancé en 2022. Aujourd'hui, l'entreprise s'ouvre à de nouveaux marchés, notamment par des collaborations avec des acteurs majeurs comme SONATRACH pour la fabrication de pièces mécaniques complexes, confirmant ainsi son rôle central dans l'industrie ferroviaire et mécanique en Algérie [1].



Figure I.2 : logo FERROVIAL [1].

I.2.3 Activité industrielle

L'entreprise FERROVIAL Annaba se distingue par un large éventail d'activités industrielles orientées principalement vers le domaine ferroviaire. Elle conçoit, fabrique et entretient une grande variété de matériels roulants destinés au transport de marchandises, tels que les wagons plats, tombereaux, citernes et wagons spécialisés. Elle produit également des locomotives de manœuvre, des voitures voyageurs, des appareils de voie, et assure la rénovation de wagons en fin de cycle de vie. Par ailleurs, FERROVIAL s'est également développée dans le domaine des travaux publics en fabriquant des équipements comme les bétonnières, les centrales à béton, les brouettes industrielles, ainsi que divers outils et composants mécaniques forgés. Elle intervient aussi dans la sous-traitance mécanique, en fournissant des pièces métalliques complexes pour d'autres entreprises industrielles. La diversité de ses produits est rendue possible grâce à la maîtrise de plusieurs procédés industriels, notamment le découpage mécanique, le tournage, le fraisage, l'alésage, le formage, le forgeage, l'assemblage mécanique et par soudure, ainsi que les opérations de parachèvement comme le grenaillage, le sablage et la peinture. Cette maîtrise technique, combinée à une forte capacité de production, positionne FERROVIAL comme un acteur incontournable dans l'industrie du transport ferroviaire en Algérie [2].

I.2.4 Organisation et moyens humains

FERROVIAL Annaba est structurée selon une organisation moderne, cohérente et orientée vers la performance industrielle. Elle regroupe plusieurs directions essentielles au bon fonctionnement de l'entreprise, telles que la direction générale, la direction technique, la direction de la production, la direction commerciale, la direction de l'approvisionnement, la direction de la recherche et développement, ainsi que les directions des ressources humaines, de la finance et de la comptabilité. Ces structures sont épaulées par deux entités techniques clés : le bureau d'étude, chargé de la conception, du développement des produits, et du suivi technique des projets, et le bureau des méthodes, responsable de la planification, de la préparation des gammes d'usinage et de l'ordonnancement des opérations de fabrication.

En termes de ressources humaines, l'entreprise comptait un effectif total de 750 employés, dont 60 sous contrat à durée déterminée. Parmi eux, 32 sont affectés au département de maintenance, chargé de garantir la disponibilité des équipements et d'assurer la continuité de la production. Le reste du personnel est composé d'ingénieurs, de techniciens spécialisés, d'agents de maîtrise et d'ouvriers qualifiés, répartis de manière hiérarchique et fonctionnelle afin de permettre une

coordination efficace entre les différentes unités. Cet encadrement humain qualifié, allié à des équipements techniques modernes, constitue l'un des atouts majeurs de FERROVIAL pour répondre aux exigences des projets nationaux et sectoriels les plus complexes.

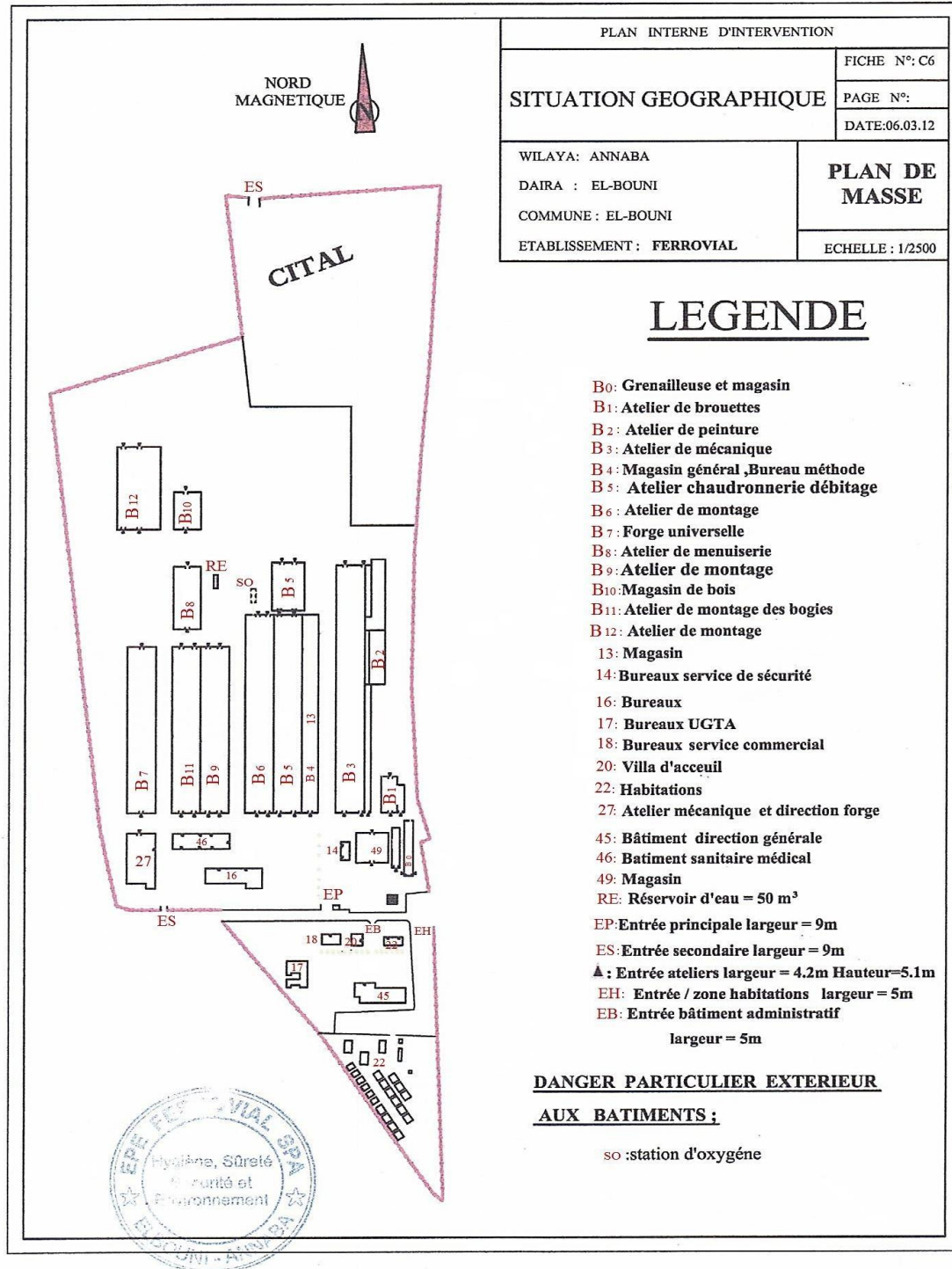


Figure I.3 : Plan de masse de l'entreprise [3].

I.2.5 Organigramme Actuel de l'entreprise

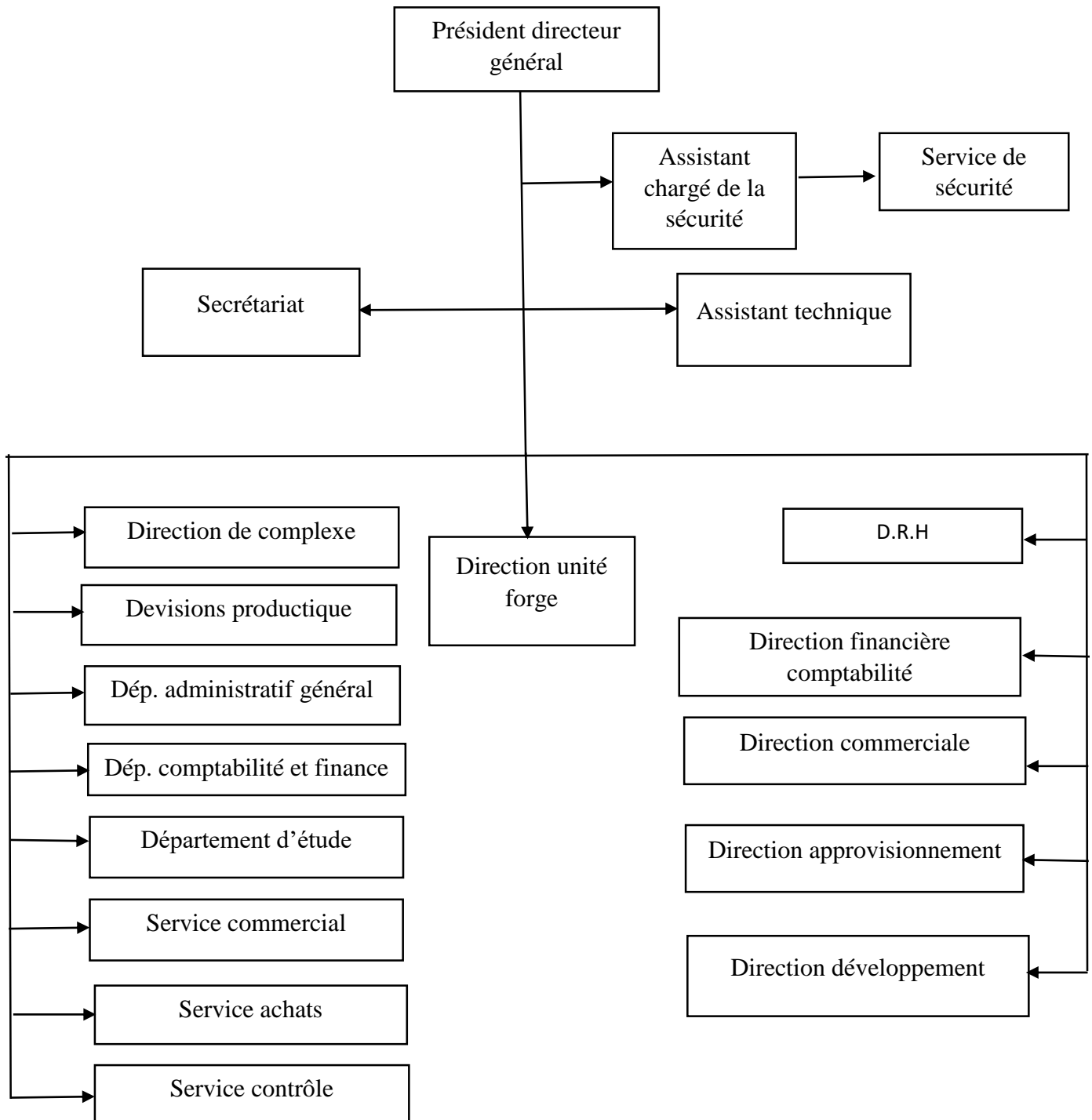


Figure I.4 : Organigramme générale de l'entreprise FERROVIAL [4].

I.2.6 Gamme de produit

I.2.6.1 Matériels et équipements ferroviaires :

FERROVIAL Annaba assure la conception, la production et la commercialisation d'une grande variété de matériels ferroviaires. Cela comprend des wagons de tous types (plats, tombereaux, citernes), des locomotives de manœuvre, des appareils de voie pour l'aménagement des réseaux ferroviaires, ainsi que des voitures de transport de voyageurs et du matériel pour le métro [2].



Figure I.5 : Locomotive de manœuvre [2].

I.2.6.2 Matériels de travaux publics :

L'entreprise fabrique également des équipements destinés aux chantiers de construction et aux infrastructures publiques. Parmi ces produits, on retrouve notamment des bétonnières, bennes à béton, brouettes et des centrales à béton fixes ou mobiles pour la production industrielle de béton [2].



Figure I.6 : Centrale à béton [2].

I.2.6.3 Produits forgés :

La société possède un savoir-faire important dans la production de produits forgés tels que les pelles, pioches, serre-joints et autres outils de quincaillerie lourde. Ces produits sont reconnus pour leur robustesse et leur durabilité, et sont utilisés dans les chantiers, les industries et les travaux publics [2].



Figure I.7 : Pièces forgés [2].

I.2.7 Les Principaux Procédés de Production et de Fabrication

Elle maîtrise les procédés principaux suivants :

Tableau I.1 : Les techniques de production et de fabrication industrielle [4].

| | |
|---------------|--|
| Débitage | Découpage mécanique, plasma et oxycoupage ... |
| Usinage | Tournage, fraisage, alésage, rectification ... |
| Formage | Pliage, cintrage, emboutissage ... |
| Montage | Assemblage mécanique ou par soudure |
| Parachèvement | Grenaillage, sablage et finition à la peinture ... |
| Forgeage | Estampage, pressage, refoulage ... |

I.2.8 Projets de l'entreprise

FERROVIAL envisage d'élargir sa gamme de produits vers d'autres créneaux porteurs tels que :

Voitures de transport de voyageurs ;

Voitures pour le métro d'Alger ;

Locomotives de manœuvre 300 cv ;

Containers 40 pieds [2].

I.3 Sélection de la machine à étudier

I.3.1 Méthode ABC

I.3.1.1 Définition

La méthode d'ABC est une méthode graphique qui met en évidence les cas les plus représentatifs d'une situation tout en mettant en évidence le peu d'importance des éléments les plus faibles, c'est un outil d'aide à la décision. La loi repose sur une série d'éléments clairement définie et traitée en fonction d'un critère correspondant à un caractère et pour une période donnée [5].

I.3.1.2 Méthodologie

Elle consiste à classer les pannes par ordre croissant de coûts (heures ou argent), chaque panne se rapporte à une machine, ou rubrique. Puis à établir un graphique faisant correspondre les pourcentages de coûts cumulés aux pourcentages de types de pannes cumulés. On obtient ainsi un graphe montrant trois zones :

Zone A : Dans cette zone on constate que 20% des pannes représente 80% des coûts, c'est

La zone de priorité.

Zone B : Dans cette zone, les 30% de pannes suivantes ne coûtent que 15% supplémentaires.

Zone C : Enfin, dans cette zone, les 50% de pannes restantes ne reviennent qu'à 5% des

Coûts [6].

Afin de déterminer la machine la plus critique au sein de l'usine FERROVIAL Annaba, Les données ont été collectées pour 29 machines de types variés pour l'application de la méthode ABC. Cette méthode repose sur le classement des équipements en fonction de leur impact sur

la production, en identifiant celles qui génèrent le plus d'arrêts et qui nécessitent une attention particulière dans le cadre de la sûreté de fonctionnement ici représenté par le nombre total d'heures d'arrêt dues aux pannes enregistrées sur 9 ans.

Le tableau suivant illustre cette classification :

Tableau I.2 : Classification des machines selon la méthode ABC basée sur le nombre total d'heure d'arrêt suite aux pannes

| | Machines | Nombre d'heures d'arrêts | Nombre d'heures d'arrêts cumulées | % Nombre d'heures d'arrêts cumulées | Zone |
|-----|--------------------|-------------------------------------|--|--|-------------|
| M1 | Tour HB 725 | 230H | 230H | 9,05 | A |
| M2 | Fraiseuse 6P12 | 218H | 448H | 17,62 | A |
| M3 | Fraiseuse 6M82 | 209H | 657H | 25,85 | A |
| M4 | Tour LEX 350 | 190H | 847H | 33,32 | A |
| M5 | Tour HSE 400 | 179H | 1026H | 40,36 | A |
| M6 | Tour DMG 1450V | 166H | 1192H | 46,89 | A |
| M7 | Cisaille 1632 | 150H | 1342H | 52,79 | A |
| M8 | Affuteuse 3A64M | 144H | 1486H | 58,46 | A |
| M9 | Tour HSE 52 | 138H | 1624H | 63,89 | A |
| M10 | Rectifieuse 3A229 | 123H | 1747H | 68,73 | A |
| M11 | Fraiseuse Z3C ZHV3 | 110H | 1857H | 73,05 | A |
| M12 | Tour 1K62 | 104H | 1961H | 77,14 | A |

| | | | | | |
|-----|-----------------------|-----|-------|--------|---|
| M13 | Tour FACICAP 780 | 98H | 2059H | 81 | A |
| M14 | Mortaiseuse 7M450 | 90H | 2149H | 84,54 | B |
| M15 | Tour HES 52 | 75H | 2224H | 87,49 | B |
| M16 | Raboteuse 9050 | 61H | 2285H | 89 ,89 | B |
| M17 | Fraiseuse FBH 1614 | 55H | 2340H | 92,05 | B |
| M18 | Rectifieuse 7B722 | 40H | 2380H | 93,63 | B |
| M19 | Perceuse WEILER V075 | 37H | 2417H | 95,08 | C |
| M20 | Tour CLX 350 | 22H | 2439H | 95,95 | C |
| M21 | Cisaille 322 C50 | 21H | 2460H | 96,77 | C |
| M22 | Fraiseuse PMO | 19H | 2479H | 97,52 | C |
| M23 | Tour CMX 800V | 17H | 2496H | 98,19 | C |
| M24 | Fraiseuse 6Y312 | 12H | 2508H | 98,66 | C |
| M25 | Aléseuse 2A635 | 10H | 2518H | 99,06 | C |
| M26 | Rectifieuse 7B722 | 9H | 2527H | 99,41 | C |
| M27 | Perceuse GSP 110 | 6H | 2533H | 99,65 | C |
| M28 | Perceuse HORD1600 | 5H | 2538H | 99 ,84 | C |
| M29 | Rectifieuse Monza 500 | 4H | 2542H | 100 | C |

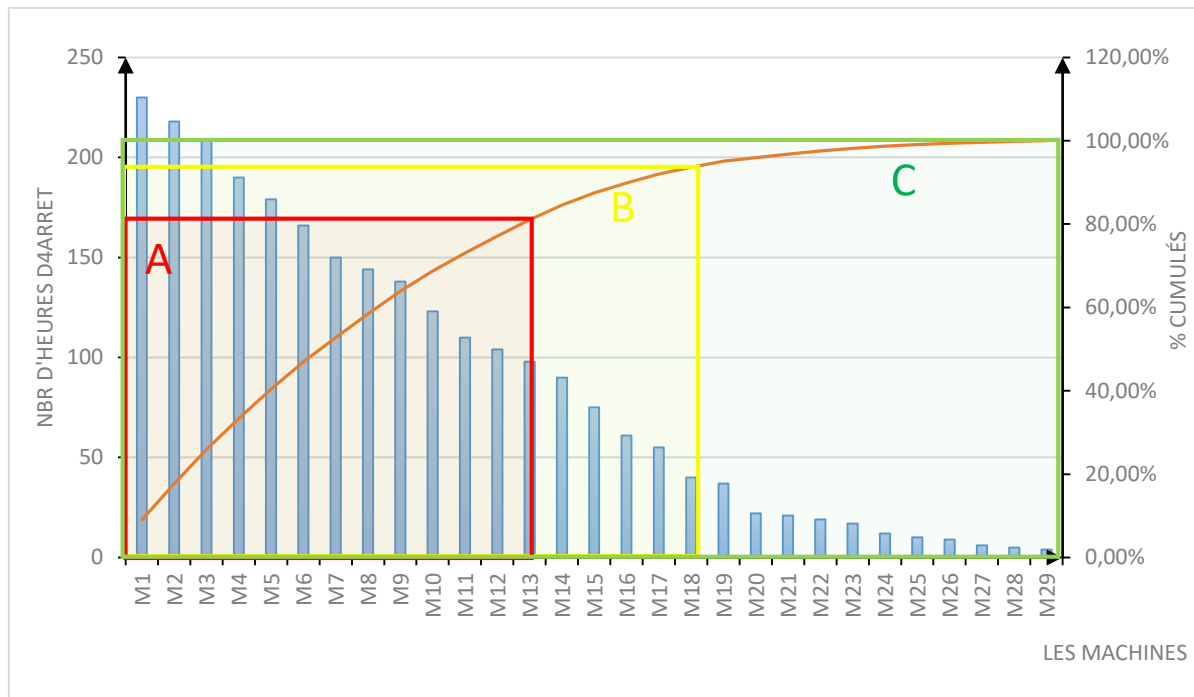


Figure I.8 : Courbe ABC des machines selon le nombre d'heure d'arrêt suites aux pannes

On divise donc la courbe ABC en trois catégories :

Catégorie A (machines les plus critiques) :

Comprend les 13 premières machines, Elles cumulent 81 % des heures d'arrêts.

Cette catégorie contient les machines les plus sensibles en matière de disponibilité. Elles nécessitent une surveillance renforcée, un entretien préventif rigoureux, voire une modernisation ou automatisation partielle pour réduire le nombre d'arrêts. Leur fiabilité impacte directement la productivité de l'atelier.

Catégorie B (machines moyennement critiques) :

Machines classées de la 14e à la 18e place. Elles représentent environ 13 % supplémentaires des arrêts.

Ces machines sont relativement fiables, mais doivent rester sous surveillance périodique. Une stratégie de maintenance conditionnelle pourrait suffire à assurer leur bon fonctionnement sans coûts élevés.

Catégorie C (machines peu critiques) :

Les 11 dernières machines. Cumulent seulement 5 % des heures d'arrêts.

Les machines de cette catégorie ont un impact négligeable sur la disponibilité globale. Il n'est pas nécessaire d'y investir lourdement en maintenance préventive. Une approche corrective suffit dans la plupart des cas.

I.3.2 Justification du choix : Tour HB 725

Le Tour HB 725 fait partie de la catégorie A et se classe en tête de la liste, avec 230 heures d'arrêt, soit 9,05 % des arrêts totaux. Ce volume d'arrêts indique un enjeu stratégique pour la production. Étudier cette machine permet de cibler les causes majeures de pannes dans le parc machine de FERROVIAL, et de proposer des améliorations ayant un effet significatif sur la performance globale de l'atelier.



Figure I.9 : Photo réelle de la machine HB 725 (prise à FERROVIAL ANNABA) [7].

I.4 Historique de la machine

Le tour HB 725 fait partie des machines-outils emblématiques développées par la société française Caze neuve, reconnue depuis le milieu du XXe siècle pour la qualité et la robustesse de ses tours parallèles. Conçu dans les années 1960-1970, le modèle HB 725 a été largement adopté dans les ateliers de mécanique pour sa précision, sa fiabilité et sa facilité d'utilisation. Il a marqué une étape importante dans l'évolution des machines traditionnelles vers des systèmes plus performants, tout en conservant une commande manuelle permettant un contrôle direct par

l'opérateur. Au sein de l'entreprise FERROVIAL Annaba, cette machine est en service depuis 1985, utilisée principalement pour les opérations d'usinage de pièces métalliques. Malgré son ancienneté, elle reste un élément essentiel de la production, sa longévité témoignant de sa qualité de fabrication. Cependant, cela pose également des défis en matière de maintenance et de sûreté de fonctionnement [8].

Dans le cadre de notre étude, nous avons identifié les différentes pannes et dysfonctionnements qu'ils soient d'ordre électrique, mécanique ou autre susceptibles de provoquer des défaillances et des arrêts de la machine HB725. Ces incidents ont été recensés à partir de l'analyse de l'historique des pannes collecté. Parmi les types de problèmes relevés, on peut notamment citer :

Tableau I.3 : Historique des pannes [9].

| Date | Cause | Intervention | Nombre d'interventions | Durée de l'arrêt (h) |
|------------|------------------|--|------------------------|----------------------|
| 12/02/2017 | Panne mécanique | Changement du roulement défectueux de la boîte de vitesse | 1 | 2 :00 :00 |
| 01/03/2017 | Panne mécanique | Changement d'un roulement défectueux du chariot porte Poupée | Groupe de MN | 5 :00 :00 |
| | | Changement d'un Pignon usé | | |
| 05/10/2017 | Panne mécanique | Changement du patin | 1 | 1 :15 :00 |
| 10/12/2017 | Panne électrique | Déblocage du microcontact du niveau d'huile de graissage | 1 | 3:00 :00 |
| 22/01/2018 | Panne mécanique | Réglage après Décalage des courroies | 1 | 5 :30 :00 |

| | | | | |
|------------|------------------|---|---|------------|
| 15/07/2018 | Panne mécanique | Intervention sur la Boîte des avances bloquées | 3 | 4 :30 :00 |
| 28/07/2018 | Panne mécanique | Changement après rupture d'un arbre | 1 | 10 :00 :00 |
| 11/09/2018 | Panne électrique | Changement d'un disjoncteur grillé | 2 | 4 :30 :00 |
| 07/11/2018 | Panne mécanique | Changement d'un Pignon utilisé | 3 | 8 :30 :00 |
| | | Modification sur la pompe (joint spi) | | |
| | | Changement d'une chaîne serrage | | |
| 04/01/2019 | Panne mécanique | Changement de la poulie | 1 | 2 :30 :00 |
| 14/05/2019 | Panne électrique | Changement d'un microcontact | 1 | 2:00 :00 |
| 23/11/2019 | Panne mécanique | Changement du roulement défectueux de la boîte de vitesse | 1 | 1 :30 :00 |
| 27/12/2019 | Panne mécanique | Démontage de l'arbre à cannes des chariots de travail | 1 | 11 :15 :00 |
| | | Réglage de la vis sans fin de sécurité | | |

| | | | | |
|------------|-----------------|--|---|------------|
| | | Nettoyage et remontage | | |
| 18/03/2020 | Panne mécanique | Démontage du pignon de la boîte de vitesse | 2 | 1 :50 :00 |
| 07/09/2020 | Panne mécanique | Changement du roulement défectueux du chariot porte poupée | 2 | 3 :25 :00 |
| 26/09/2020 | Panne mécanique | Démontage de la pompe d'arrosage | 3 | 23 :30 :00 |
| | | Changement des joints | | |
| 16/03/2021 | Panne mécanique | Changement d'un Pignon usé | 1 | 2 :15 :00 |
| 26/03/2021 | Panne mécanique | Changement du roulement défectueux de la boîte de vitesse | 1 | 3 :30 :00 |
| 05/10/2021 | Panne mécanique | Confection d'une poulie | 2 | 8 :00 :00 |
| | | Changement d'une clavette | | |
| 05/01/2022 | Panne mécanique | Changement du roulement défectueux de la boîte de vitesse | 1 | 1 :30 :00 |
| 16/01/2022 | Panne mécanique | Confection d'une poulie | 2 | 6 :40 :00 |

| | | | | |
|------------|------------------|--|---|------------|
| 12/02/2022 | Panne mécanique | Changement d'une clavette | 1 | 2 :00 :00 |
| 27/06/2022 | Panne électrique | Pompe d'arrosage grillé | 1 | 3 :00 :00 |
| 20/12/2022 | Panne mécanique | Intervention sur la boîte de vitesse et changement des pignons | 2 | 6 :15 :00 |
| 01/04/2023 | Panne mécanique | Montage de la pompe d'arrosage | 2 | 19 :20 :00 |
| 19/04/2023 | Panne mécanique | Changement du roulement défectueux de la boîte de vitesse | 1 | 1 :45 :00 |
| 02/07/2023 | Panne mécanique | Réglage du système de freinage du chariot | 2 | 6 :30 :00 |
| 21/07/2023 | Panne électrique | Changement d'un disjoncteur grillé | 2 | 4 :00 :00 |
| 09/11/2023 | Panne mécanique | Changement d'un Pignon usé | 2 | 10 :30 :00 |
| 13/12/2023 | Panne mécanique | Changement du roulement défectueux de la boîte de vitesse | 1 | 3 :45 :00 |

| | | | | |
|------------|-----------------|--|---|------------|
| 03/01/2024 | Panne mécanique | Régler un défaut de freinage | 2 | 4 :00 :00 |
| 13/01/2024 | Panne mécanique | Intervention après un blocage de la broche | 1 | 3 :30 :00 |
| 22/03/2024 | Panne mécanique | Réglage du système de freinage du chariot | 2 | 6 :30 :00 |
| 15/06/2024 | Panne mécanique | Changement après rupture d'un arbre | 1 | 24 :00 :00 |
| | | Démontage de la pompe d'arrosage | | |
| 09/08/2024 | Panne mécanique | Changement d'un Pignon utilisé | 2 | 7 :30 :00 |
| 07/12/2024 | Panne mécanique | Réparation de la Pompe d'arrosage | 2 | 5 :30 :00 |
| 04/02/2025 | Panne mécanique | Intervention sur la Boite de vitesse bloquée | 3 | 6 :00 :00 |
| | | Réglage de la tension de la chaîne | | |
| | Panne mécanique | Changement d'une clavette | | |

| | | | | |
|------------|--|--|---|-----------|
| 18/02/2025 | | Changement du roulement défectueux du chariot porte poupée | 2 | 3 :45 :00 |
|------------|--|--|---|-----------|

I.5 Analyse fonctionnelle de la machine

Fonction principale :

Usiner des pièces mécaniques par enlèvement de matière avec précision et stabilité.

Fonctions service :

Broche principale :

Assurer la rotation de la pièce à usiner à des vitesses variables.

Chariots longitudinal et transversal :

Permettre le déplacement précis de l'outil selon les axes X et Z.

Boîte de vitesses et boîte des avances :

Transmettre la puissance et ajustent les vitesses et les avances selon les besoins de l'usinage.

Mandrin et contre-pointe :

Maintenir la pièce fermement pendant l'usinage.

Pompe d'arrosage et système de lubrification :

Refroidir la zone de coupe et évacuer les copeaux.

Pupitre de commande :

Permettre à l'opérateur de piloter manuellement les différentes fonctions de la machine.

Système de transmission (pignons, courroies, poulies) :

Transmettre la puissance mécanique du moteur vers les différents organes de la machine.

Dispositifs de sécurité : Protéger l'opérateur (carters, arrêt d'urgence, fins de Course...). [10]

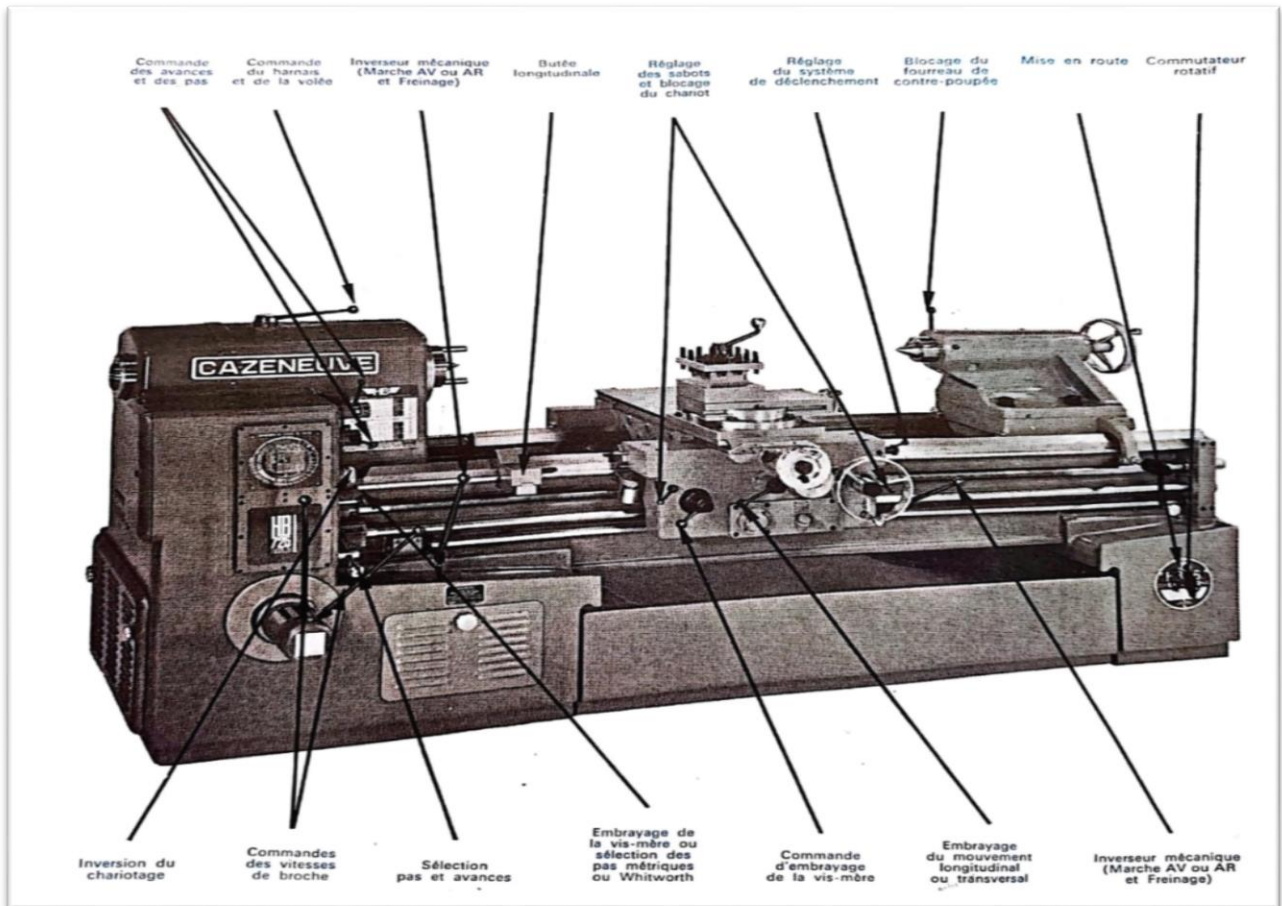


Figure I.10 : Vue générale de la tour HB 725 avec réparation des principaux organes fonctionnels [10].

I.6 Conclusion

L'étude menée dans ce chapitre a permis d'identifier la tour HB 725 comme la machine la plus critique de l'entreprise, à travers l'application de la méthode ABC. L'analyse de son historique de pannes a mis en évidence une forte fréquence d'arrêts, justifiant son choix pour une étude approfondie. Enfin, l'analyse fonctionnelle a permis de bien comprendre le rôle et le fonctionnement global de la machine, servant de base à l'analyse de ses défaillances.

Chapitre II

Outils et méthodes au service de la sûreté de fonctionnement

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous explorerons les différents outils et méthodes utilisés pour assurer la sûreté de fonctionnement des machines industrielles. La gestion de la sûreté de fonctionnement repose sur une combinaison d'approches préventives, de stratégies de maintenance, et de technologies de surveillance, permettant de minimiser les risques de défaillance et d'optimiser la performance des équipements.

II.2 Brainstorming fonctionnel

II.2.1 Définition

Le brainstorming est une technique imaginée vers 1935 par Alex Osborne, directeur d'une agence. Le brainstorming a donc une origine économique. Ainsi, sa première utilisation devait permettre de trouver un nombre important d'idées promotionnelles. Aujourd'hui, elle constitue l'une des techniques d'aide à l'innovation qui sont utilisées avec un public de professionnels d'entreprises. Ces techniques sont utilisées en management de la créativité afin d'« améliorer l'inventivité des membres d'une organisation » et de « de favoriser le développement de projets innovant »

Le brainstorming repose sur trois principes : l'importance du travail en équipe, l'association d'idées et l'originalité. Son emploi consiste à se retrouver en groupe pour tenter de résoudre un problème en recherchant des idées ; il s'agit alors d'exprimer toutes les idées que le sujet suggère en se laissant aller, sans se limiter par la raison. C'est donc une technique de groupe qui déploie une activité cognitive de recherche d'idées pour résoudre un problème. En s'interdisant toute critique, tous les participants sont invités à rebondir sur les idées exprimées par chacun, le but étant d'en faire surgir le plus possible [11].

II.2.2 Objectifs du Brainstorming

Le brainstorming a pour vocation première de générer des idées nouvelles, en sollicitant la créativité individuelle et collective. Il vise également à révéler des connaissances latentes que les participants ne formulent pas spontanément dans un contexte habituel. En effet, la dynamique de groupe et le climat de liberté qui caractérisent une séance de brainstorming permettent souvent de faire émerger des idées enfouies ou négligées. Enfin, cette méthode stimule la réflexion par associations d'idées, un mécanisme cognitif essentiel qui consiste à

rebondir sur une proposition pour en imaginer une autre, ouvrant ainsi la voie à des solutions inédites ou à des analyses plus fines des problèmes rencontrés [12].

II.2.3 Domaines d'application

La méthode du brainstorming peut être utilisée dans de nombreux contextes professionnels ou pédagogiques. Elle est particulièrement efficace pour la recherche de problèmes, c'est-à-dire lorsqu'un groupe tente d'identifier les dysfonctionnements ou les points d'amélioration dans un système ou un processus. Elle est également très utile pour la recherche de causes, notamment dans le cadre d'une analyse des causes profondes d'un incident, d'un défaut de qualité ou d'une panne technique. Enfin, le brainstorming est couramment employé pour la recherche de solutions, qu'il s'agisse de concevoir des actions correctives, d'optimiser des pratiques existantes ou d'imaginer des produits ou services innovants [12].

II.2.4 Le rôle de l'animateur

L'animateur joue un rôle clé dans la réussite d'un brainstorming. Il lui revient de définir clairement le sujet à traiter, en veillant à ce qu'il soit concis, précis et compréhensible par tous. Cette présentation initiale est cruciale pour éviter toute confusion ou interprétation divergente. L'animateur doit ensuite s'assurer que tous les participants ont bien compris l'enjeu de la séance. Pendant le déroulement, il prend soin de noter fidèlement toutes les idées exprimées, généralement sur un papier bord, en respectant la formulation de l'émetteur. À la fin de la phase de production, il regroupe les idées similaires par catégories ou thématiques, afin de faciliter la synthèse et l'analyse. Enfin, il conserve l'ensemble des supports utilisés (notes, listes, schémas) qui serviront de base pour les étapes ultérieures du projet ou de la réflexion [12].

II.2.5 Les règles du Brainstorming

Le brainstorming repose sur un ensemble de règles simples mais essentielles à son bon déroulement. Tout d'abord, la séance doit se dérouler dans une ambiance détendue et conviviale, favorisant la bonne humeur et le respect entre les participants. Tous les membres du groupe sont placés sur un pied d'égalité : aucune hiérarchie ou statut ne doit influencer la prise de parole. La pensée positive est encouragée, et toute critique, qu'elle soit verbale, gestuelle ou implicite, est strictement interdite pendant la phase de génération d'idées. Les participants doivent éviter les jugements de valeur et s'abstenir de commenter les idées proposées, qu'elles

soient les leurs ou celles des autres. Chaque personne doit proposer une seule idée à la fois, et le tour de parole doit être respecté pour garantir l'écoute et la fluidité. L'abondance d'idées est recherchée, car plus le volume d'idées est grand, plus les chances d'en trouver de bonnes augmentent. Enfin, les participants sont invités à s'inspirer des idées émises pour en produire de nouvelles, dans un esprit d'enrichissement mutuel. Aucune idée ne doit être considérée comme naïve ou irréaliste, car ce sont souvent les propositions les plus inattendues qui mènent à des pistes intéressantes [12].

II.2.6 Principes fondamentaux du brainstorming

Quatre principes clés guident toute séance de brainstorming. Le premier est l'expression libre : toutes les idées, même les plus originales, doivent être exprimées et notées sans filtre. Le deuxième principe est la recherche de la quantité : la priorité est donnée à la production d'un grand nombre d'idées, en valorisant la diversité (flexibilité), la fluidité et l'originalité. Le troisième principe, fondamental, est la suspension du jugement : aucune idée ne doit être évaluée ou critiquée pendant la séance. Cela permet de maintenir un climat de confiance et de ne pas brider la créativité. Enfin, le quatrième principe est l'effet boule de neige, qui consiste à rebondir sur les idées déjà formulées pour générer de nouvelles associations mentales. Cette dynamique collective crée une synergie favorable à l'émergence de solutions novatrices [12].

II.2.7 Les étapes du Brainstorming

Présentation du sujet par l'animateur (5–10 min) :

La première étape d'une séance de brainstorming consiste en une introduction claire et structurée du sujet par l'animateur, qui prend entre cinq et dix minutes pour exposer la problématique de manière concise, précise et compréhensible, afin de garantir que tous les participants partent d'une même base de réflexion et évitent les malentendus ou les interprétations divergentes [12].

Production d'idées (déballage) (40–60 min) :

Une fois le sujet bien compris, s'ouvre la phase de génération d'idées proprement dite, qui dure généralement entre quarante et soixante minutes, durant laquelle les participants, à tour de rôle, proposent librement toutes les idées qui leur viennent à l'esprit, sans jugement ni censure, dans

un esprit d'ouverture et de collaboration, l'objectif étant d'obtenir un maximum d'idées, qu'elles soient classiques, originales ou inattendues [12].

Regroupement des idées (10–20 min) :

À l'issue de la production libre d'idées, l'animateur prend entre dix et vingt minutes pour organiser et classer les idées recueillies, en les regroupant selon des critères de similitude, de proximité ou de thématique, ce qui permet de structurer le contenu, d'identifier des tendances ou des points de convergence, et de préparer le terrain pour l'analyse finale [12].

Synthèse et conclusion de la séance (10–15 min) :

Enfin, dans une dernière phase de dix à quinze minutes, le groupe procède à une synthèse des idées les plus pertinentes, en mettant en lumière les propositions les plus intéressantes, les solutions les plus prometteuses ou les problèmes les mieux formulés, avec pour objectif de dégager des pistes concrètes d'action ou de réflexion à approfondir ultérieurement [12].

II.3 Bête à Corne

II.3.1 Définition

La bête à cornes est un outil graphique d'analyse du besoin qui permet de répondre à trois questions :

- A qui ou quoi le produit rend-il service ?
- Sur qui ou quoi agit-il ?
- Dans quel but ?

Le but est toujours formulé de la même façon : le produit permet à l'utilisateur d'agir sur la matière d'œuvre.

Les réponses à ces questions sont regroupées dans le graphe des prestations appelé aussi « bête à cornes » [13].

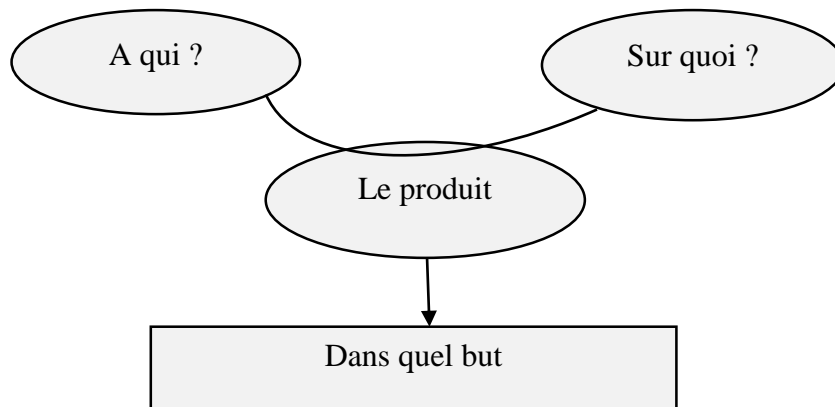


Figure II.1 : Bête a corne [14].

II.4 Le Diagramme Pieuvre

II.4.1 Définition

Le Diagramme Pieuvre est un outil d'analyse du besoin représentant graphiquement les interactions d'un produit/service avec son environnement.

Le Diagramme Pieuvre met en évidence les relations entre les différents Eléments du Milieu Extérieur (EME) et le produit/service au travers de fonctions :

- Fonction principale (FP) : relie deux EME grâce au produit/service.
- Fonction contrainte (FC) : traduit une adaptation du produit à un EME [13].

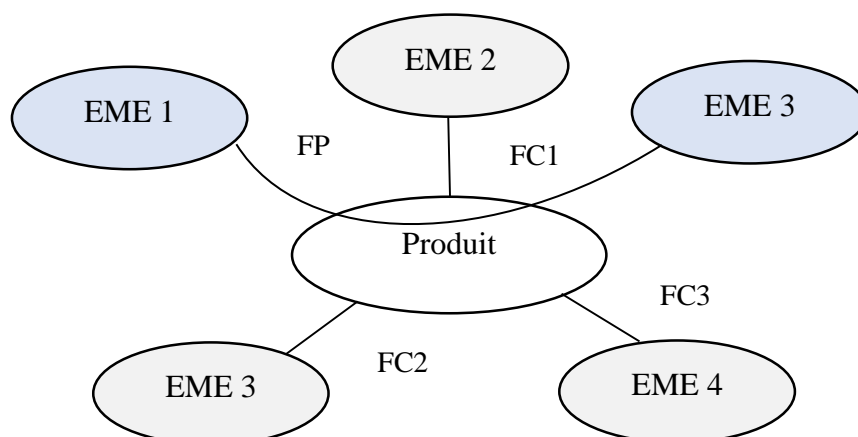


Figure II.2 : Diagramme Pieuvre [14].

II.5 Arbre de défaillance

II.5.1 Définition

L'arbre de défaillance est une illustration sous forme d'arbre généalogique. C'est une approche d'examen d'événement. La construction de l'arbre des défaillances consiste à identifier tous les événements fondamentaux ou les combinaisons d'événements qui mènent à un Événement Redouté (ER). L'approche d'analyse par arbre de défaillances se fonde sur une démarche de type déductif. Elle offre la possibilité de retracer les causes jusqu'aux événements fondamentaux qui pourraient être à l'origine de l'événement redouté.

Donc, l'analyse par arbre des défaillances permet de repérer les enchaînements et les associations d'événements qui mènent des événements fondamentaux jusqu'à l'événement indésirable sélectionné. Les relations entre les divers événements détectés sont établies à l'aide de portes logiques, telles que « ET » et « OU » [15].

Cette technique emploie une représentation graphique spécifique qui facilite l'affichage des résultats sous forme de structure arborescente.

En utilisant des principes mathématiques et statistiques, on pourrait théoriquement déterminer la probabilité de réalisation de l'événement final en se basant sur les probabilités des événements fondamentaux identifiés [16].

II.5.2 Construction de l'arbre

II.5.2.1 Évènement sommet (évènement indésirable)

La première phase consiste à définir de manière claire et précise l'événement à examiner, que l'on désigne également comme sommet ou événement redouté. Cette phase est essentielle pour la pertinence des déductions qui seront faites de l'analyse. L'arbre de défaillance vise à fournir une représentation condensée ; la description de l'événement devrait être concise, tout en étant aussi évocatrice que possible dans le cadre qui la présente dans l'arbre, avec un texte additionnel fournissant tous les détails nécessaires pour définir l'événement. Cette observation s'applique également à tous les éléments qui seront inclus dans l'arbre [17].

II.5.2.2 Évènement intermédiaires

Une fois l'événement sommet identifié, il est nécessaire de détailler la série d'événements qui pourrait mener à cet événement sommet. Les événements intermédiaires sont des événements de moindre envergure. Une fois qu'un événement est établi, ils seront associés à l'événement

principal par le biais d'un connecteur. Ces événements intermédiaires peuvent à leur tour être redéfinis par d'autres événements intermédiaires plus détaillés [17].

II.5.2.3 Évènements de base, transfert et conditions

On peut considérer des événements pour lesquels les informations sont trop limitées pour une analyse plus approfondie ou encore dont il n'est pas pertinent de développer davantage ; ces derniers sont qualifiés d'événements non développés. Lors de l'élaboration de grands arbres de défaillance, il est utile d'introduire des portes de transfert, ce qui facilite la compréhension et la vérification de l'arbre. Ces portes indiquent que la continuation de l'arbre est disponible sur une autre page. Les événements de base représentent les éléments les plus spécifiques de l'arbre, il n'est pas envisageable de les analyser plus en profondeur ; ils se rapportent à la défaillance (électrique, mécanique, logiciel...) d'un composant du système. L'émergence de certains événements (de base ou autres) peut engendrer une conséquence sous certaines conditions. Nous devons donc intégrer dans l'arbre des conditions qui déterminent la séquence d'événements. Ces conditions jouent un rôle dans l'élaboration de l'arbre en tant qu'événements intermédiaires, excepté qu'elles ne sont plus fragmentées et donc considérées comme « de base » [17].

II.5.3 Utilités des arbres de défaillance

Dans le domaine de l'ingénierie de sûreté des secteurs « à risque », les arbres de défaillances sont employés et peuvent servir d'outil pour évaluer la conception. Ils offrent la possibilité de déceler les scénarios susceptibles de mener à des accidents lors des étapes préliminaires du cycle de vie d'un système. Et ont la possibilité d'éviter des modifications de conception d'autant plus onéreuses qu'elles s'interviennent tardivement. Ils peuvent également servir d'instrument de diagnostic, anticipant la ou les pannes de composants les plus susceptibles de survenir lors de la défaillance d'un système [17].


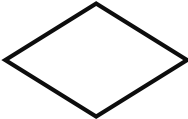
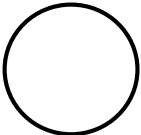
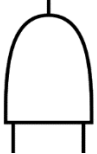
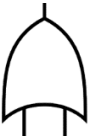
II.5.4 Représentation de la méthode de l'arbre de défaillance

La ligne la plus haute ne comporte que l'évènement dont on cherche à décrire comment il peut se produire.

Chaque ligne détaille la ligne supérieure en présentant les combinaisons susceptibles de produire l'évènement de la ligne supérieure auquel elles sont rattachées.

Les relations sont représentées par des liens logiques, dont la plupart sont des « portes OU » et des « portes ET » [17].

Tableau II.1 : Symboles utilisés dans la construction d'un arbre de défaillance [18].

| Symbole | Nom | Description |
|---|-----------------------------|---|
|  | Événement ou sous-événement | Un événement est le résultat d'un événement non développé et/ou d'une défaillance de base |
|  | Événement non développé | Événement non développé par manque d'information, ou événement qui sera développé plus tard |
|  | Défaillance de base | Cause primaire d'un événement |
|  | Porte logique ET | Porte désignant que toutes les conditions sous-jacentes sont requises pour que l'événement se produise |
|  | Porte logique OU | Porte désignant qu'au moins une des conditions sous-jacentes est requise pour que l'événement se produise |

II.5.5 L'Objectif de l'arbre de défaillance :

L'objectif « qualitatif » consiste à élaborer une synthèse de tous les éléments susceptibles d'entraîner un événement craint et à analyser l'impact d'une modification du système. Il s'agit également de comparer les effets des actions envisageables pour diminuer la fréquence de l'événement redouté examiné [19].

II.6 Diagramme cause à effet (Ishikawa)

Le diagramme d'Ishikawa appelé aussi la méthode des 5M, le diagramme cause à effet ou le diagramme en arête de poisson est une démarche qui permet d'identifier les causes possibles d'un problème ou un défaut (effet). Il convient ensuite d'agir sur ces causes pour corriger le défaut en mettant en place des actions correctives appropriées. Alors Pour tenter de diminuer ou d'anéantir un problème de qualité, il faut connaître toutes les causes qui peuvent lui donner naissance. Puis en cherchant leur poids relatif, on peut déterminer sur quelle cause agir en priorité. IL ne garantit pas le résultat mais elle contribue (grandement) à structurer les idées et les réflexions [20].

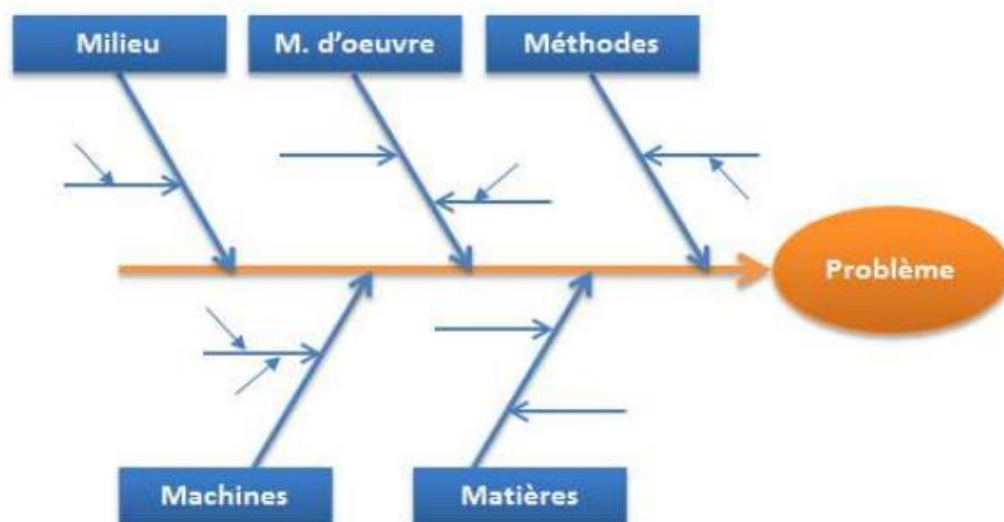


Figure II.3 : Diagramme Ishikawa [14].

II.6.1 Le but d'Ishikawa

Analyser et visualiser le rapport existant entre un problème (effet) et toutes ses causes possibles. Le diagramme d'Ishikawa est un outil graphique qui sert à comprendre les causes d'un défaut de qualité [14].

II.6.2 Méthodologie d'Ishikawa

Le diagramme d'Ishikawa se présente sous la forme d'un graphe en arêtes de poisson. Dans ce dernier, sont classées par catégorie les causes selon la loi des 5 M.

La méthode des 5 M permet d'orienter la réflexion vers les 5 domaines, desquels sont généralement issues les causes :

Matières : matières premières, pièces, ensembles, fournitures, identification, stockage, qualité, manutention.

Matériel : Recense les causes probables ayant pour origine les supports techniques et les produits utilisés. Machines, outils, équipements, capacité, âge, nombre, maintenance.

Main d'œuvre : directe, indirecte, motivation, formation, absentéisme, expérience, problème de compétence, d'organisation, de management.

Milieu : environnement physique, éclairage, bruit, aménagement, relations, température, climat, marché, législation.

Méthodes : instructions, manuels, procédures, modes opératoires [20].

II.7 Approche par les risques : Analyse AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances de leur Effet et de leur Criticité) :

II.7.1 Définition

L'AMDEC est une méthode qualitative et inductive qui définit une règle ou une loi à partir de l'expérience : un raisonnement inductif visant à identifier les risques de pannes potentielles contenues dans un avant-projet de produit ou du système, quelles que soient les technologies, de façon à les supprimer ou à les maîtriser (norme AFNOR X 60-510 de décembre 1986) [21].

Les mots relatifs à l'AMDEC sont :

- **Fréquence (F)** : Fréquence d'apparition de la défaillance : elle doit représenter la probabilité d'apparition du mode de défaillance résultat d'une cause.
- **Détection (D)** : Fréquence de non détection de la défaillance : elle doit représenter la probabilité de ne pas détecter la cause ou le mode de défaillance avant que l'effet survient.
- **Gravité (G)** : Gravité des effets de la défaillance : la gravité représente la sévérité relative à l'effet de la défaillance.
- **Criticité (C)** : Elle est exprimée par l'indice de priorité risque. $C = F.G.D$ [21].

II.7.2 Le but de l'AMDEC

L'AMDEC doit analyser la conception du moyen de production pour préparer son exploitation afin qu'il soit fiable et maintenable dans son environnement opérationnel pour parvenir à ce but, le propriétaire de l'installation exige :

- Qu'elle soit intrinsèquement fiable ;
- De disposer des pièces de rechange et des outillages adaptés ;
- De disposer des procédures ou aides minimisant les temps d'immobilisation du moyen par la diminution du temps d'intervention (diagnostique, réparation ou échange, et remise en service).
- Que les personnels (d'exploitation et de maintenance soient formés, qu'une maintenance préventive adaptée soit réalisée, afin de réduire la probabilité d'apparition de la panne.

L'AMDEC par l'évaluation de la criticité des conséquences des défaillances, permet de les classer par importance et de préparer un plan d'action visant à optimiser le moyen de production et ainsi réduire la criticité, action sur la probabilité d'apparition de la défaillance (ou sur la gravité de la conséquence) [22].

II.7.3 Types d'AMDEC

L'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) se décline en plusieurs types, selon le domaine d'application. Chaque type vise à prévenir les défaillances potentielles, améliorer la fiabilité et garantir la qualité des systèmes, produits ou services [23].

II.7.3.1 AMDEC Organisation

Ce type d'AMDEC s'applique aux différents niveaux d'un processus d'affaires. Il peut concerner :

- Le système de gestion,
- Le système d'information,
- Le système de production,
- Le système de gestion du personnel,
- Le système marketing,
- Le système financier.

Elle permet également d'analyser l'organisation d'une tâche de travail, en identifiant les risques liés à la structuration et au fonctionnement global de l'entreprise [23].

II.7.3.2 AMDEC Produit

Utilisée lors de la phase de conception d'un nouveau produit, l'AMDEC Produit permet d'évaluer les défauts potentiels dès les premières étapes du développement. Elle aide à :

- Identifier les causes de défaillances potentielles,
- Les hiérarchiser selon leur criticité,
- Mettre en place des actions correctives (sur la conception) et préventives (sur l'industrialisation), afin d'assurer la fiabilité du produit final [23].

II.7.3.3 AMDEC Processus

Cette approche s'intéresse aux défaillances pouvant survenir pendant le processus de fabrication, qu'il soit nouveau ou existant.

Pour un nouveau procédé, elle permet de l'optimiser en éliminant les causes de défauts dès la phase de mise en place.

Pour un procédé existant, elle vise à l'améliorer en corrigeant les sources d'erreurs affectant la qualité du produit [23].

II.7.3.4 AMDEC Moyen

Elle s'applique aux équipements et machines. L'objectif est d'anticiper les risques liés à un dysfonctionnement ou un fonctionnement anormal

Elle est particulièrement utile en maintenance pour améliorer la disponibilité, la fiabilité et la sécurité des moyens de production [23].

II.7.3.5 AMDEC Service

Cette AMDEC s'adresse aux processus de services. Elle permet de :

Vérifier que la valeur ajoutée du service répond aux attentes des clients,

S'assurer que le processus de réalisation ne génère pas de défaillances pouvant nuire à la satisfaction client ou à la qualité du service rendu [23].

II.7.3.6 AMDEC Sécurité

Elle est centrée sur la sécurité des opérateurs, notamment dans les processus à risque. Elle permet d'identifier les situations dangereuses, d'évaluer leur gravité et de mettre en œuvre des mesures pour prévenir les accidents et garantir un environnement de travail sûr [23].

II.7.4 Les étapes nécessaires pour une méthode AMDEC complète

La méthode s'inscrit dans une démarche en huit étapes comme suit :

Étape 1 : La constitution d'une équipe de travail

Étape 2 : Analyse fonctionnelle.

Étape 3 : L'étude qualitative des défaillances.

Étape 4 : L'étude quantitative.

Étape 5 : La hiérarchisation.

Étape 6 : La recherche des actions préventives/correctives.

Étape 7 : Le suivi des actions prises et la réévaluation de criticité.

Étape 8 : La présentation des résultats [13].

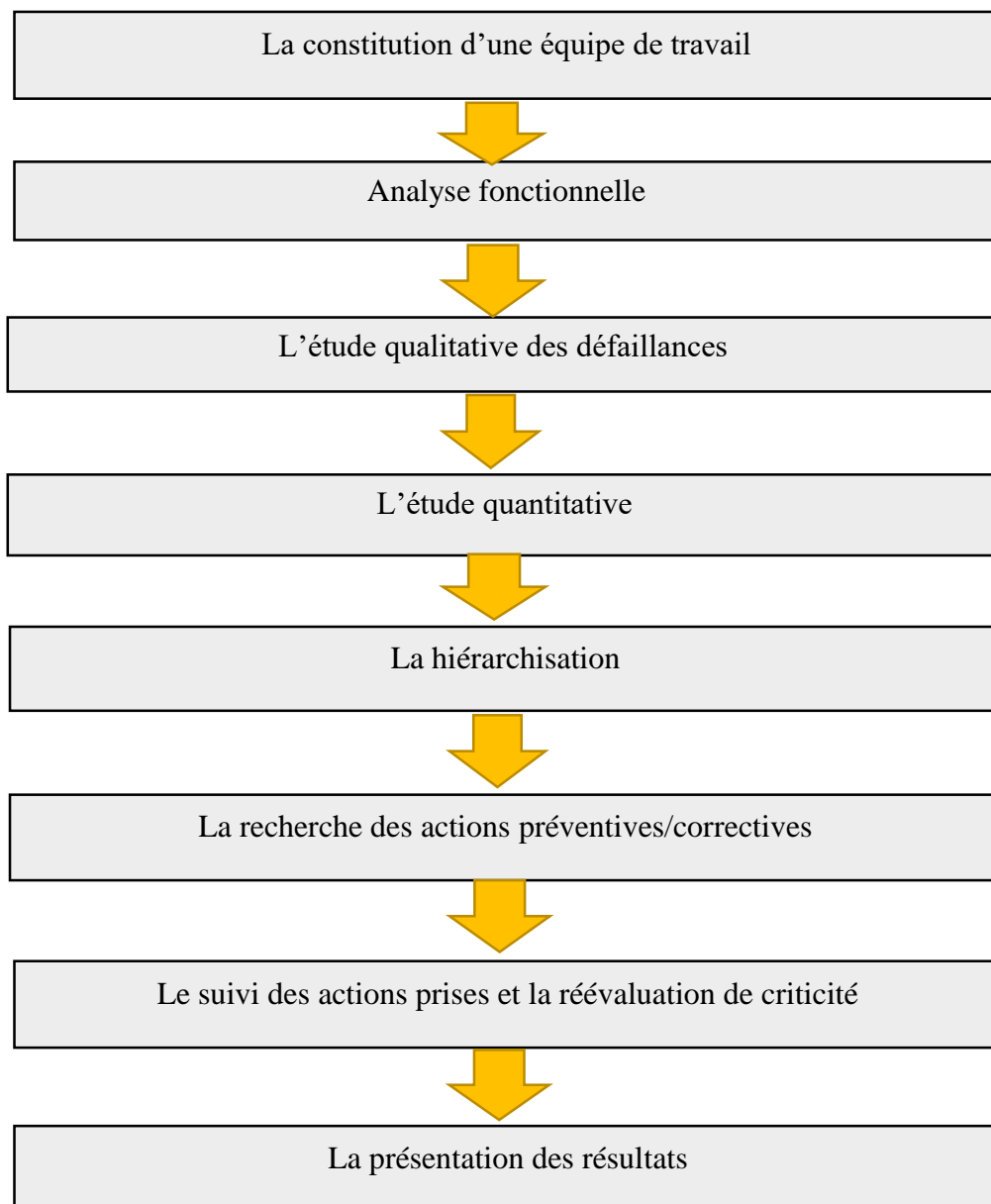


Figure II.4 : La démarche de l'AMDEC [13].

Afin d'évaluer de manière rigoureuse les différents aspects d'une défaillance identifiée dans le cadre de l'analyse AMDEC, une grille d'évaluation à 10 niveaux est généralement utilisée. Celle-ci permet d'attribuer une cotation standardisée à trois critères fondamentaux : la gravité de la défaillance (impact sur le système ou la sécurité), sa fréquence d'apparition (probabilité d'occurrence) et la détectabilité (capacité à identifier la défaillance avant qu'elle n'ait un effet).

Cette échelle de cotation permet de comparer objectivement les risques et de prioriser les actions correctives à mettre en œuvre.

Tableau II.2 : Grille d'évaluation AMDEC à 10 niveaux

| Valeur | Détectabilité | Fréquence | Gravité |
|--------|--|---|------------------------------------|
| 1 | Détection automatique certaine | Extrêmement rare : presque jamais | Pas de conséquence |
| 2 | Très facile à détecter | Très rare | Négligeable |
| 3 | Facile à détecter | Rare | Légère |
| 4 | Détection probable avec surveillance | Occasionnelle (1×/an ou moins) | Moyenne (peu d'impact) |
| 5 | Moyennement difficile à détecter | Peu fréquente (1×/mois) | Gêne notable |
| 6 | Difficile à détecter | Fréquente (1×/semaine) | Impact significatif |
| 7 | Très difficile à détecter | Très fréquente (plusieurs fois/semaine) | Dommages matériels importants |
| 8 | Rarement détectée même avec moyens humains | Quotidienne | Interruption sérieuse du service |
| 9 | Quasiment indétectable | Très probable (plusieurs fois/jour) | Dommages graves ou risques humains |
| 10 | Totalement indétectable | Permanente ou systématique | Catastrophique : danger vital |

II.8 Le Kaizen

II.8.1 Définition

Kaizen est un terme japonais signifiant littéralement "amélioration continue". Il désigne une philosophie de gestion qui vise à améliorer en permanence les processus, les produits, la qualité

et l'efficacité dans une entreprise, en impliquant tous les employés, du dirigeant aux opérateurs. Contrairement aux changements radicaux, le Kaizen privilégie les petites améliorations progressives mais constantes [25].

Elle se base sur la philosophie : « Aujourd'hui mieux qu'hier, demain mieux qu'aujourd'hui ».

II.8.2 Principes fondamentaux de Kaizen

- Implication de tout le personnel : Chaque membre de l'équipe (opérateurs, maintenance, qualité, sécurité) participe à l'amélioration.
- Réduction des gaspillages (Muda) : Identifier et éliminer les pertes (temps, énergie, matières, défauts...).
- Observation sur le terrain (Gemba) : Aller sur place (Gemba) pour observer les problèmes réels.
- Résolution de problèmes par des actions simples : Trouver des solutions simples, rapides et peu coûteuses.
- Normalisation des bonnes pratiques : Quand une amélioration est efficace, on la standardise.
- Cycle d'amélioration continue (PDCA : Plan – Do – Check – Act) : Tester une amélioration, vérifier son effet, ajuster [26].

II.8.3 Les étapes de Kaizen

1. Préparer

- Identifier les quatre sources de gaspillage.
- Elaborer un système de mesures standardisé.
- Calculer le takt time.
- Synchroniser l'ensemble des opérations au takt time.
- Etablir la situation actuelle par des grilles d'observation.
- Réaliser le plan d'action [27].

2. Réaliser

- Former les employés à la méthode.
- Collecter et analyser les données.
- Recommander les solutions.

- Valider et simuler les solutions.
- Apporter les changements [27].

3. Suivre

- Réunion de suivi.
- Apporter les correctifs nécessaires.
- Revoir le plan d'action si nécessaire.
- Regarder les résultats obtenus suite aux modifications [27].

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents outils et méthodes utilisés dans la sûreté de fonctionnement. Chacun a été défini et expliqué en fonction de son utilité, que ce soit pour identifier des fonctions, analyser des causes de panne ou évaluer la criticité des défaillances. Cette base théorique est essentielle pour appliquer efficacement ces outils dans l'étude de cas.

Chapitre III

Etude de cas

III.1 Introduction

Pour pouvoir améliorer la fiabilité d'une machine, il faut d'abord comprendre comment et pourquoi elle tombe en panne. Dans ce chapitre, on présente plusieurs outils et méthodes qui permettent d'analyser les défaillances et d'identifier les points faibles de la tour HB 725. Ces outils, comme le brainstorming, la méthode bête à corne, la méthode pieuvre, l'arbre de défaillance ou encore le diagramme de causes à effet, sont souvent utilisés en maintenance pour structurer la réflexion et trouver des solutions efficaces. On utilisera aussi une analyse statistique basée sur l'historique des pannes de la machine, ce qui aidera à appuyer les résultats de manière plus concrète. L'objectif est de poser les bases d'une analyse fiable pour ensuite proposer des actions correctives adaptées.

III.2 Brainstorming

III.2.1 Présentation du sujet par l'animateur

Comment peut-on améliorer la sûreté de fonctionnement du tour HB 725 au sein de l'entreprise FERROVIAL Annaba ?

Objectifs :

Réduire les pannes fréquentes et les arrêts non planifiés.

Optimiser la maintenance et l'utilisation de la machine.

Renforcer la sécurité des opérateurs.

III.2.2 Production d'idées

Idées proposées librement :

Mettre en place une maintenance préventive régulière.

Installer des capteurs pour surveiller l'usure des pièces critiques.

Former les opérateurs aux bonnes pratiques d'utilisation.

Créer un historique des pannes avec analyse des causes.

Réaliser des audits de sécurité périodiques.

Standardiser les procédures de démarrage et d'arrêt.

Moderniser certains composants (ex. système de lubrification).

Utiliser un tableau visuel pour le suivi de l'état de la machine.

III.2.3 Regroupement des idées

- Maintenance : maintenance préventive, capteurs d'usure, modernisation des composants.
- Organisation : historique des pannes, audits réguliers, procédures standardisées.
- Formation/Sensibilisation : formation des opérateurs, affichage des consignes, communication visuelle.

III.2.4 Synthèse et conclusion de la séance

Pistes concrètes retenues :

- Lancer un programme de maintenance préventive hebdomadaire.
- Élaborer un plan de formation pour les opérateurs sur les risques et les gestes sûrs.
- Installer un système de surveillance (capteurs) pour anticiper les défaillances.
- Documenter chaque panne et analyser mensuellement les données pour orienter les actions futures.

III.3 Bête à corne

1/ A qui ou quoi le produit rend-il service ?

- La réponse : l'opérateur d'usinage.

2/ Sur qui ou quoi agit-il ?

- La réponse : pièce brute.

3/ Dans quel but ?

- La réponse : pour produire des pièces mécaniques conformes aux plans.

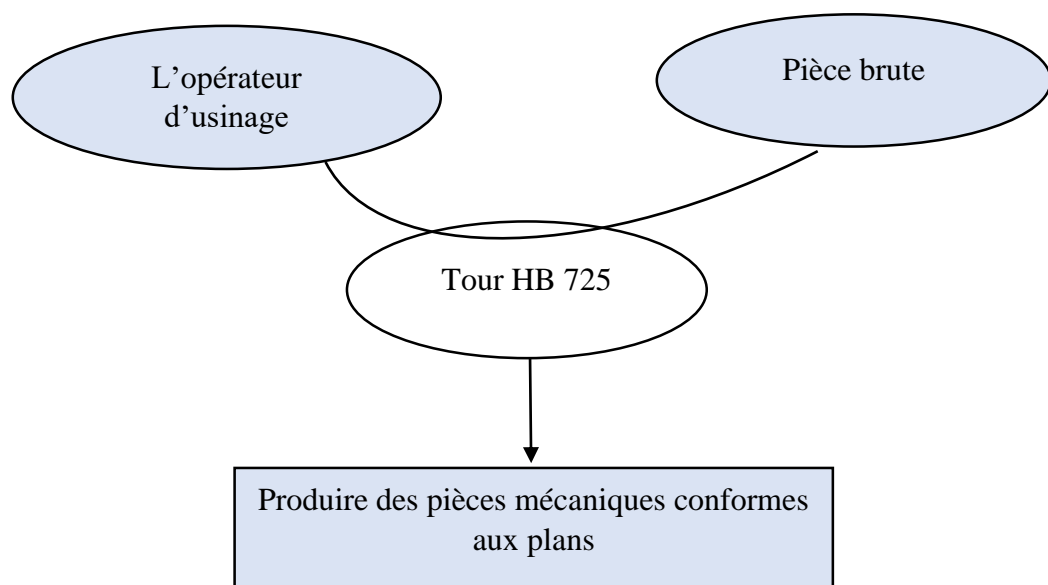


Figure III.1 : Bête à corne de tour HB 725

III.4 Le Diagramme Pieuvre

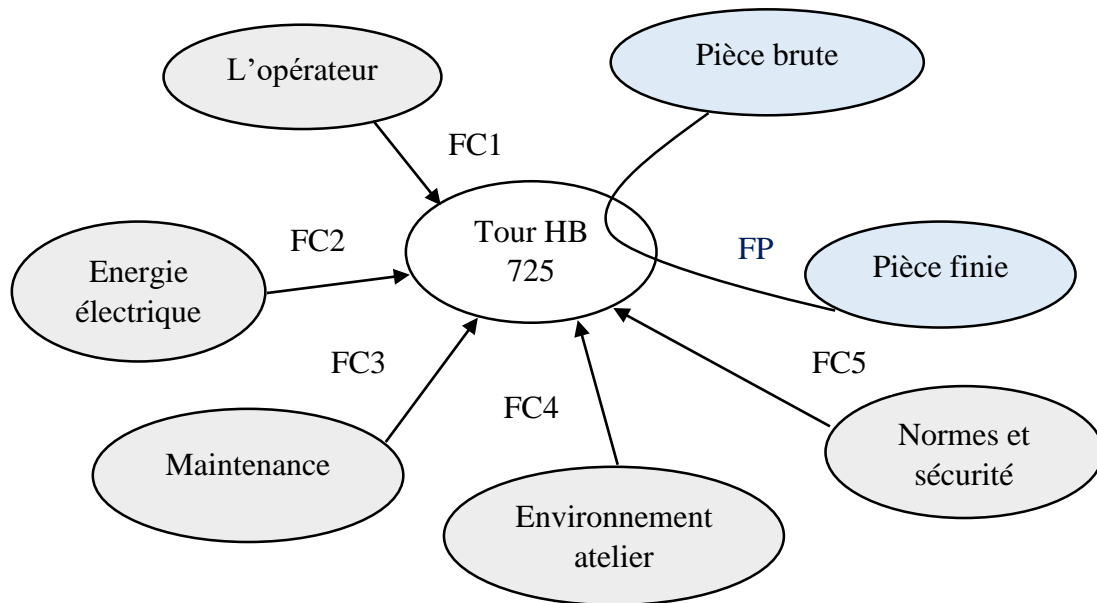


Figure III.2 : Pieuvre du tour HB 725

Tableau III.1 : Fonctions et leurs significations

| Fonctions | Significations |
|-----------|--|
| FP | Transformer la pièce brute en pièce finie |
| FC1 | Permettre le pilotage et la commande par l'opérateur |
| FC2 | Alimenter le tour en énergie (électricité) |
| FC3 | Garantir la fiabilité, la disponibilité et la sécurité |
| FC4 | Résister aux conditions de l'atelier (Supporter température, poussières, vibrations) |
| FC5 | Respecter les normes de sécurité (protection de l'opérateur et conformité réglementaire) |

III.5 Analyse statistique

Afin d'identifier les défaillances les plus fréquentes sur la tour HB 725, une classification a été réalisée à l'aide de la méthode ABC, en se basant sur le nombre d'occurrences relevées dans l'historique des pannes.

III.5.1 Méthode ABC

Tableau III.2 : Classification des types de défaillance par la méthode ABC selon le nombre d'occurrences.

| Catégorie de défaillance | Nombre d'occurrences | Nombre d'occurrences cumulé | % nombre d'occurrences cumulé | Zone |
|---|----------------------|-----------------------------|-------------------------------|------|
| Changement de roulement | 10 | 10 | 20,83% | A |
| Changement ou réglage de pignon | 6 | 16 | 33,33% | A |
| Réparation ou changement de pompe d'arrosage | 5 | 21 | 43,75% | A |
| Intervention sur boîte de vitesse (hors roulement) | 5 | 26 | 54,17% | A |
| Confection ou changement de poulie | 4 | 30 | 62,5% | A |
| Changement de clavette | 4 | 34 | 70,83% | A |
| Autres interventions électriques | 4 | 38 | 79,17% | A |
| Intervention broche, arbre, etc. | 3 | 41 | 85,42% | B |
| Réglage du système de freinage | 3 | 44 | 91,67% | B |
| Changement de disjoncteur | 2 | 46 | 95,83% | B |
| Réglage ou remplacement de courroies/fins de course | 2 | 48 | 100% | C |

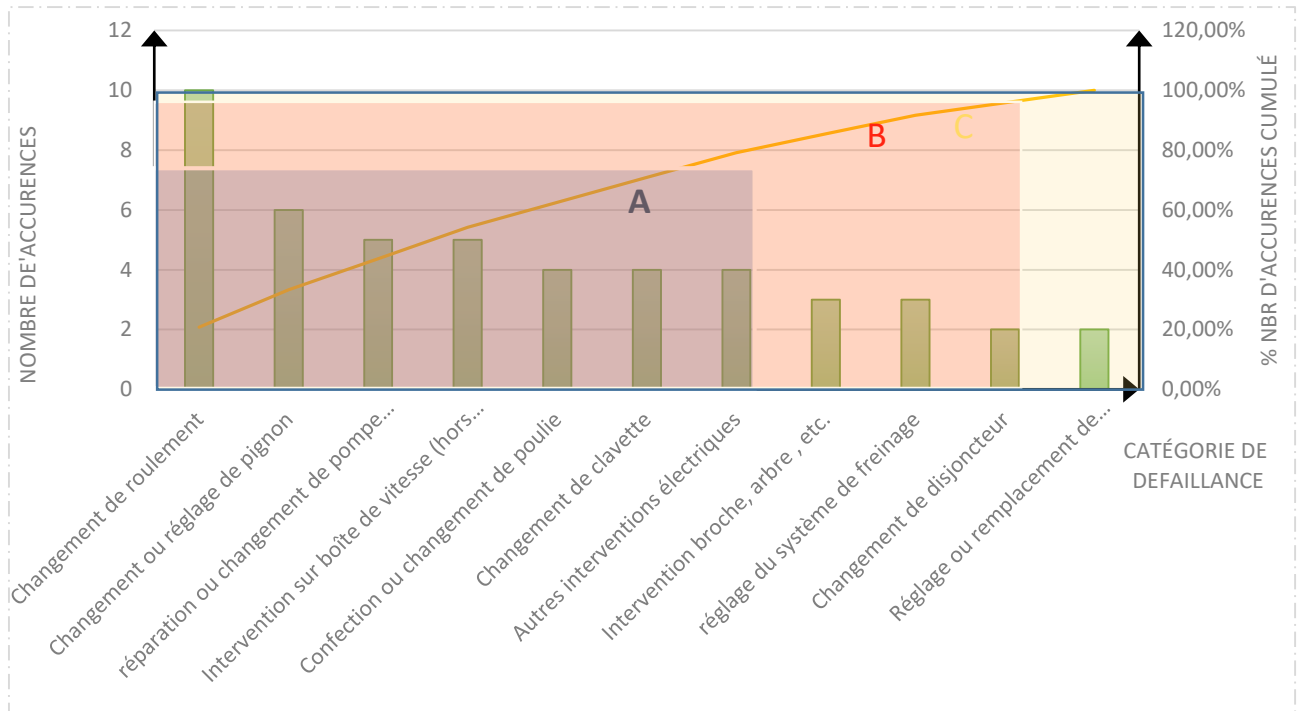


Figure III.3 : Courbe ABC des catégories de défaillance du tour HB 725 en fonction du nombre d'occurrences.

Les défaillances sont réparties en trois catégories (A, B et C) afin d'identifier les éléments les plus critiques à traiter en priorité.

La classe A regroupe les défaillances les plus fréquentes, représentant 79,17 % des pannes total

Ces défaillances concernent principalement : le changement de roulement, le réglage ou changement de pignon, la réparation de la pompe d'arrosage, les interventions sur la boîte de vitesses, la confection de poulie, le changement de clavette et les interventions électriques.

La classe B contient des défaillances moins fréquentes mais non négligeables, comme les défauts de freinage ou les disjoncteurs grillés.

La classe C représente les pannes les plus rares, ici liées au réglage ou au remplacement de courroies et fins de course.

III.5.2 La moyenne des temps d'arrêt (MTA) :

Pour calculer correctement le temps moyen d'arrêt, il est nécessaire de trier les durées d'arrêt des pannes par ordre croissant :

Tableau III.3 : Heures d'arrêt et leur équivalent en heures décimales (ordre croissant)

| Heures d'arrêts | Heures décimales |
|-----------------|------------------|
| 01 :15 :00 | 1,25 |
| 01 :30 :00 | 1,50 |
| 01 :30 :00 | 1,50 |
| 01 :45 :00 | 1,75 |
| 01 :50 :00 | 1,83 |
| 02 :00 :00 | 2,00 |
| 02 :00 :00 | 2,00 |
| 02 :00 :00 | 2,00 |
| 02 :15 :00 | 2,25 |
| 02 :30 :00 | 2,50 |
| 03 :00 :00 | 3,00 |
| 03 :00 :00 | 3,00 |
| 03 :25 :00 | 3,42 |
| 03 :30 :00 | 3,50 |
| 03 :30 :00 | 3,50 |
| 03 :45 :00 | 3,75 |
| 03 :45 :00 | 3,75 |
| 04 :00 :00 | 4,00 |
| 04 :00 :00 | 4,00 |

| | |
|------------|-------|
| 04 :30 :00 | 4,50 |
| 04 :30 :00 | 4,50 |
| 05 :00 :00 | 5,00 |
| 05 :30 :00 | 5,50 |
| 05 :30 :00 | 5,50 |
| 06 :00 :00 | 6 ,00 |
| 06 :15 :00 | 6,25 |
| 06 :30 :00 | 6,50 |
| 06 :30 :00 | 6,50 |
| 06 :40 :00 | 6,67 |
| 07 :30 :00 | 7,50 |
| 08 :00 :00 | 8,00 |
| 08 :30 :00 | 8,50 |
| 10 :00 :00 | 10,00 |
| 10 :30 :00 | 10,50 |
| 11 :15 :00 | 11,25 |
| 19 :20 :00 | 19,33 |
| 23 :30 :00 | 23,50 |
| 24 :00 :00 | 24,00 |

$$MTA = \frac{\sum ti}{n}$$

ti : Heures d'arrêts

n : Nombre total d'arrêt

$$MTA = \frac{214,25}{38} = 5,64 \text{ h} = 5 \text{ heures et } 38 \text{ minutes}$$

III.5.3 La variance

$$\sigma^2(t) = \frac{1}{n} \sum t_i^2 - MTA^2$$

$$\sigma^2(t) = \frac{1047,25}{38} = 27,56 \text{ h}^2$$

III.5.4 L'écart-type

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{27,56} = 5,25 \text{ h}$$

III.5.5 Taux d'arrêt

$$\mu = \frac{1}{MTA} = \frac{1}{5,64} = 0,177 \text{ int/h}$$

III.5.6 La maintenabilité :

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$$

Tableau III.4 : Evolution de la maintenabilité M(t) en fonction du temps t (en heures)

| T | M(t) |
|---|--------|
| 0 | 0 |
| 1 | 0,1625 |
| 2 | 0,2986 |
| 3 | 0,4125 |
| 4 | 0,5080 |
| 5 | 0,5879 |
| 6 | 0,6549 |
| 7 | 0,7109 |
| 8 | 0,7579 |

| | |
|----|--------|
| 9 | 0,7972 |
| 10 | 0,8302 |

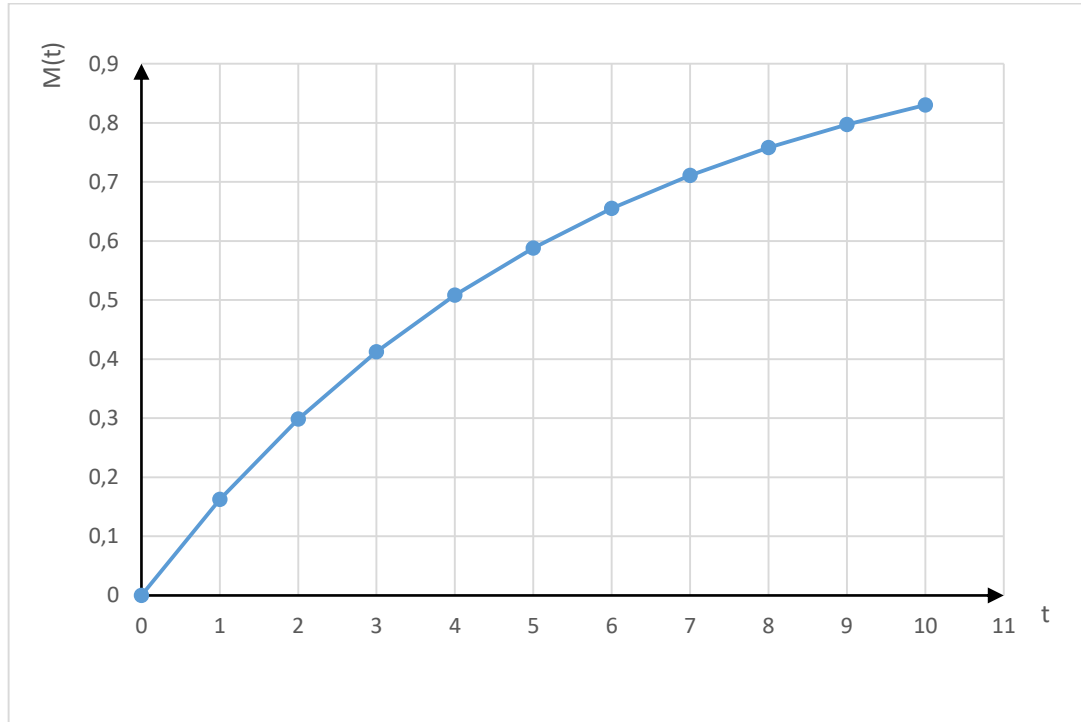


Figure III.4 : Courbe de la maintenabilité $M(t)$ en fonction du temps t (en heure)

La courbe montre que plus le temps t n'augmente, plus la probabilité de réparer la panne ($M(t)$) n'augmente. Au bout de 4 heures, la maintenabilité atteint environ 50 %, ce qui signifie qu'il y a une chance sur deux que la panne soit réparée avant ce temps. Après 10 heures, la probabilité dépasse 83 %, traduisant une forte chance que la panne soit résolue. Cette évolution suit une loi exponentielle, typique des systèmes soumis à des réparations aléatoires.

III.6 Arbre de défaillance :

Pour mieux comprendre les causes profondes de cette défaillance critique, un arbre de défaillance a été établi. Il permet de visualiser l'enchaînement logique des événements menant à la défaillance du roulement de la boîte de vitesse.

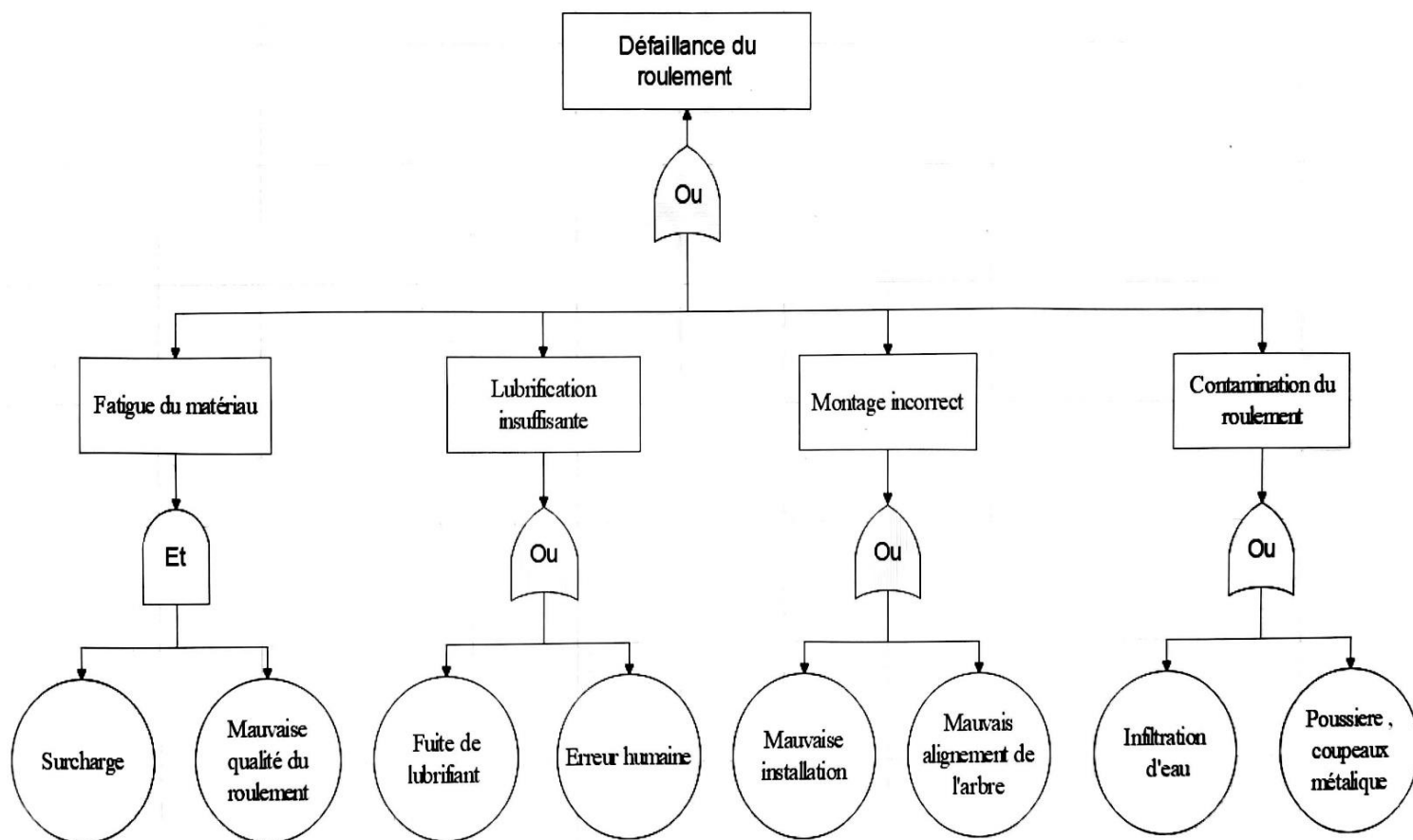


Figure III.5 : Arbre de défaillance du roulement

III.7 Diagramme cause à effet (Ishikawa) :

Afin d'identifier de manière structurée les différentes causes potentielles des arrêts du tour HB 725, un diagramme d'Ishikawa a été élaboré.

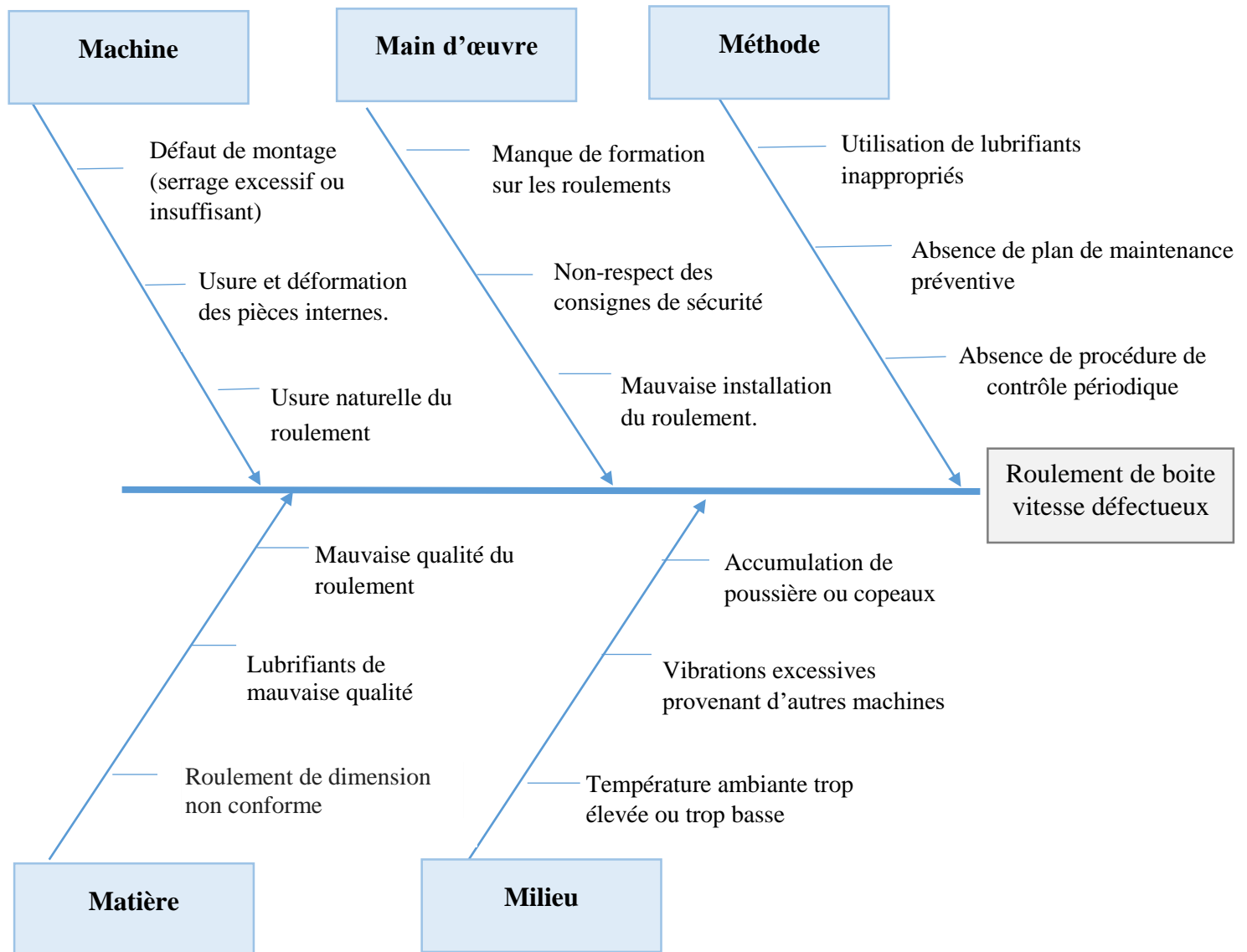


Figure III.6 : Diagramme Ishikawa

III.8 Approche par les risques (L'AMDEC) :

Dans le cadre de cette étude, une analyse AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) a été réalisée sur plusieurs composants critiques de la tour HB 725. Cette méthode permet d'identifier les modes de défaillance potentiels, d'en évaluer les effets, les causes probables, ainsi que leur criticité à travers trois indices : la Gravité (G), l'Occurrence (O) et la Détection (D).

Tableau III.5 : Tableau d'Analyse AMDEC des Composants Critiques et des Actions Recommandées (Utilisation de grille de 10).

| NOM : CHAHI | | Analyse des modes de défaillance de leurs effets et de leurs criticités | | | | | | |
|-----------------------|---|---|-------------------------------------|------------|---|---|-----|--|
| Système : tour HB 725 | | | DATE : 06/05/2025 | | | | | |
| Composant / Système | Mode de défaillance | Effet de la défaillance | Causes possibles | Evaluation | | | | Actions recommandées |
| | | | | G | O | D | C | |
| Boîte de vitesse | Roulement défectueux, blocage, pignon usé | Machine arrêtée, transmission impossible | Usure, lubrification insuffisante | 8 | 9 | 4 | 288 | Améliorer la lubrification, surveiller l'usure, maintenance conditionnelle. |
| Chariot porte-poupée | Roulement/clavette défectueux | Jeu, désalignement | Usure, choc mécanique | 7 | 7 | 4 | 196 | Contrôle régulier, graissage, remplacement préventif des éléments d'usure. |
| Système de freinage | Défaut de réglage | Sécurité compromise, imprécision | Usure, perte de tension | 6 | 6 | 5 | 180 | Vérification périodique, réglage précis, remplacement si nécessaire. |
| Pompe d'arrosage | Grillage, fuite, joints usés | Refroidissement insuffisant, usure outils | Vieillessement, défaut d'étanchéité | 6 | 6 | 5 | 180 | Maintenance préventive, vérification des joints, remplacement des éléments défectueux. |

| | | | | | | | | |
|------------------------------|---------------------------|------------------------------------|-------------------------------|---|---|---|-----|---|
| Arbre | Rupture | Machine à l'arrêt, risque de casse | Fatigue du matériau | 9 | 5 | 3 | 135 | Contrôle non destructif, inspection régulière, analyse vibratoire pour détecter les fissures. |
| Disjoncteurs / microcontacts | Grillage, mauvais contact | Panne électrique | Surcharge, usure | 6 | 4 | 4 | 96 | Vérification des connexions, remplacement périodique, analyse des surcharges. |
| Broche | Blocage | Impossibilité de travailler | Mauvaise lubrification, usure | 8 | 3 | 3 | 72 | Surveillance de la lubrification, intervention rapide en cas de blocage, entretien ciblé. |

III.9 Conclusion

L'application des outils de sûreté de fonctionnement du tour HB 725 a permis d'identifier les fonctions sensibles, les causes principales des défaillances, et les composants les plus critiques. En utilisant une grille à 10, nous avons pu identifier les éléments critiques sachant que la criticité varie de 1 à 1000.

Cette analyse détaillée a permis de dégager des pistes concrètes d'amélioration, en mettant en évidence les zones à fort risque et les éléments à surveiller de près.

Chapitre IV

Proposition d'amélioration (Plan de maintenance)

IV.1 Introduction

Ce chapitre présente un plan de maintenance structuré pour améliorer la fiabilité de la tour HB 725. Après l'analyse des pannes, une stratégie préventive est retenue comme la plus adaptée. Le plan inclut les actions techniques, la montée en compétence du personnel, et l'intégration de la démarche Kaizen pour favoriser l'amélioration continue.

IV.2 Objectifs du plan de maintenance

La présente proposition d'amélioration vise à optimiser la disponibilité et la fiabilité du tour HB 725, identifié comme machine prioritaire suite à l'analyse ABC. Cela se traduira par une transition progressive d'une maintenance majoritairement corrective vers une maintenance préventive et conditionnelle.

Réduire les arrêts non planifiés

Identifier et prévenir les défaillances avant qu'elles ne surviennent, afin de limiter les interruptions de production.

Améliorer la disponibilité de la machine

Assurer que la machine soit opérationnelle le plus longtemps possible, en minimisant les temps d'arrêt.

Allonger la durée de vie des composants

Effectuer des interventions régulières qui permettent de ralentir l'usure des pièces critiques.

Réduire les coûts de maintenance corrective

Diminuer les réparations d'urgence, souvent plus coûteuses, grâce à une anticipation des pannes.

Renforcer la sécurité du personnel

Maintenir la machine dans un état sûr de fonctionnement pour éviter les accidents liés à des défaillances techniques.

Améliorer la qualité de production

Une machine bien entretenue fonctionne de manière plus stable, ce qui réduit les risques de non-conformité des produits.

Mettre en place une organisation efficace de la maintenance

Structurer les interventions, gérer les ressources, et établir un historique de maintenance utile à long terme.

IV.3 Choix de la méthode de maintenance la plus adaptée

La sélection d'une méthode de maintenance ne se fait pas de manière isolée, mais s'inscrit dans le cadre global de la stratégie de maintenance de l'entreprise. Elle requiert une prise de décision concertée avec la direction, afin de s'aligner sur les objectifs et les priorités stratégiques fixés en matière de disponibilité, de performance et de coûts.

Pour faire un choix pertinent, il est indispensable de bien connaître les équipements concernés, leur fonctionnement, leur comportement en conditions réelles d'utilisation, ainsi que les contraintes liées à leur environnement d'exploitation. Chaque méthode de maintenance (corrective, préventive ou conditionnelle) a des conditions d'application spécifiques qu'il faut maîtriser.

Il est également crucial de prendre en compte les coûts associés : non seulement les coûts directs de maintenance, mais aussi les pertes économiques dues aux arrêts imprévus ou à la baisse de productivité. Un bon équilibre entre fiabilité technique et viabilité économique permet ainsi de définir une politique de maintenance cohérente et efficace [24].

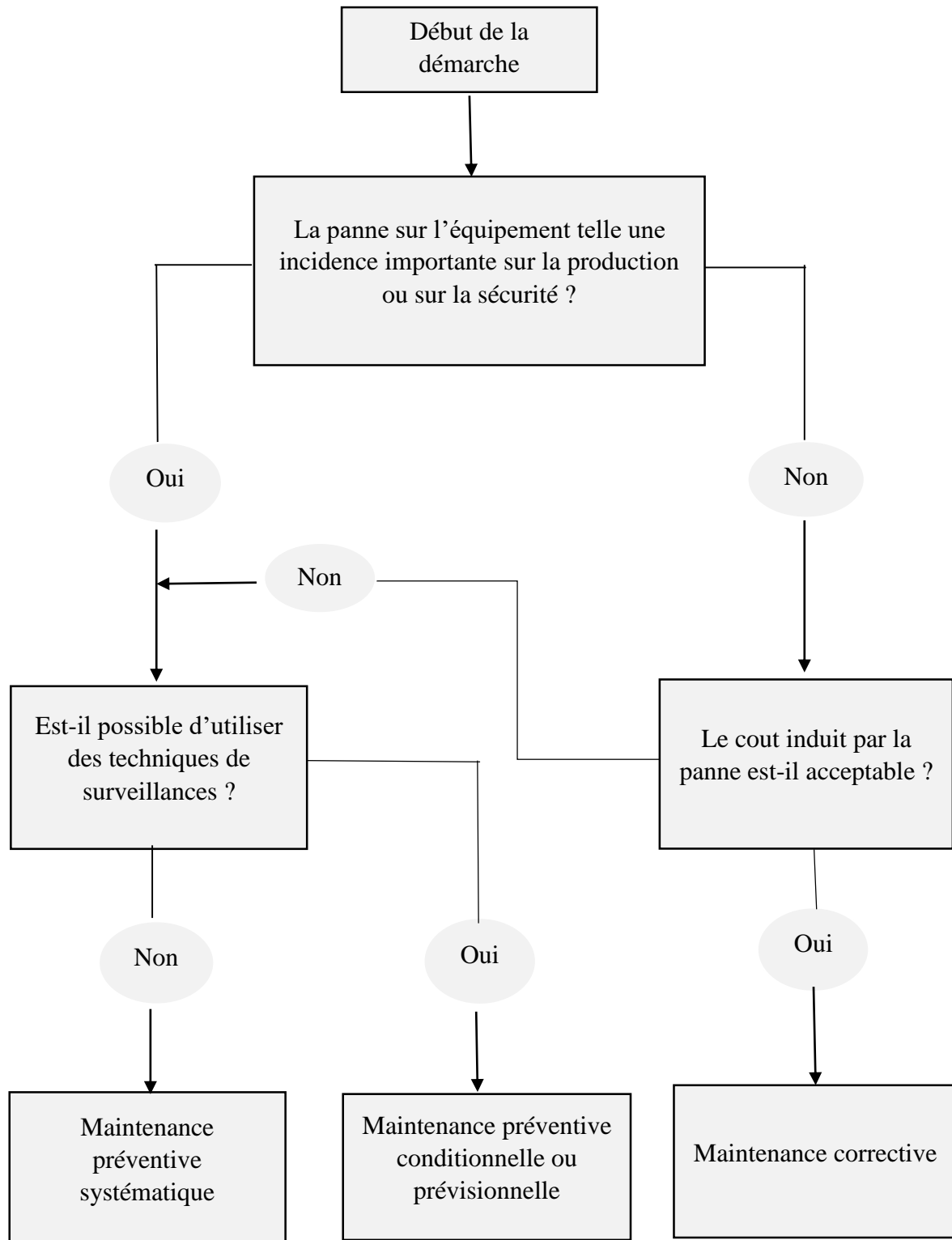


Figure IV.1 : Démarche suivie pour le choix d'un type de maintenance [24].

IV.4 Adoption de la maintenance préventive : une stratégie optimale pour la fiabilité du tour HB 725

Le choix d'adopter une stratégie de maintenance préventive pour la tour HB 725 s'appuie sur plusieurs constats issus de l'analyse AMDEC et de l'étude des historiques de pannes. Cette machine, identifiée comme prioritaire à travers la méthode ABC, connaît des arrêts fréquents impactant négativement la production. La maintenance corrective, jusqu'ici dominante, s'est révélée insuffisante pour garantir une disponibilité optimale de l'équipement.

La maintenance préventive a été retenue car elle permet non seulement de limiter les interruptions non planifiées, mais aussi d'anticiper les défaillances avant qu'elles ne surviennent. Cette approche réduit significativement les coûts liés aux réparations d'urgence et aux pertes de production. De plus, elle améliore la sécurité des opérateurs en réduisant les risques d'accidents dus à des pannes soudaines.

IV.4.1 Plan de maintenance détaillé

Le tableau suivant présente une synthèse des actions de maintenance proposées pour les principaux sous-systèmes de la tour HB 725 :

Tableau IV.1 : Plan de maintenance préventive détaillé de la tour HB 725

| Composant | Type de maintenance | Fréquence | Action spécifique | Durée estimée | Ressources |
|---------------------------|---------------------------|---------------|---|---------------|-------------|
| Système hydraulique | Préventive conditionnelle | Hebdomadaire | Vérification de la pression / fuites | 1 h | Technicien |
| Vérins hydrauliques | Préventive systématique | Trimestrielle | Contrôle des joints / nettoyage | 2 h | Technicien |
| Moteur principal | Préventive systématique | Mensuelle | Inspection visuelle, bruit, température | 1 h | Électricien |
| Transmission mécanique | Préventive systématique | Mensuelle | Graissage et contrôle de jeu | 1 h | Mécanicien |
| Capteurs de fin de course | Préventive conditionnelle | Mensuelle | Contrôle de fonctionnement | 0.5 h | Électricien |
| Coffret électrique | Préventive systématique | Trimestrielle | Nettoyage, resserrage, | 2 h | Électricien |

| | | | | | |
|----------------------|-------------------------|--------------|---------------------------------------|--------|--------------------|
| | | | contrôle des connexions | | |
| Structure métallique | Préventive systématique | Semestrielle | Contrôle visuel (corrosion, fissures) | 2 h | Technicien |
| Inspection générale | Préventive systématique | Annuelle | Contrôle complet + test fonctionnel | 1 jour | Équipe maintenance |

IV.5 Renforcement des compétences du personnel : clé de réussite du plan de maintenance

L'un des éléments essentiels pour garantir la réussite d'un plan de maintenance et assurer la sûreté de fonctionnement des équipements industriels est la compétence du personnel. Une machine, aussi performante soit-elle, ne peut atteindre son plein potentiel que si elle est utilisée, entretenue et surveillée par des opérateurs bien formés.

Dans le cas du Tour HB 725, l'analyse des pannes a révélé que certaines défaillances et arrêts sont directement liés à :

Des erreurs de manipulation,

Une méconnaissance des procédures d'entretien,

Une utilisation inadéquate de la machine.

Dès lors, il devient impératif de mettre en place un programme de formation adapté, ciblant différentes catégories de personnel selon leurs responsabilités et leur interaction avec la machine.

IV.5.1 Formation des opérateurs (utilisateurs directs de la machine)

Objectif : leur permettre une utilisation sûre et efficace du tour, tout en assurant une détection précoce des anomalies.

Contenu de la formation :

Utilisation sécurisée du tour,

Réglages, mise en marche et arrêt selon les procédures standards,

Identification des signes précurseurs de panne,

Réalisation des opérations d'entretien de premier niveau (nettoyage, graissage, vérifications visuelles).

Public concerné :

Opérateurs de production,

Nouveaux recrutés affectés à l'usinage,

Personnel intérimaire.

IV.5.2 Formation des techniciens de maintenance

Objectif : renforcer leurs compétences en diagnostic et intervention technique sur le Tour HB 725.

Contenu de la formation :

Diagnostic des pannes mécaniques, électriques et hydrauliques,

Lecture et interprétation des plans techniques,

Mise en place d'une maintenance préventive structurée,

Application de la méthode AMDEC sur la machine.

Public concerné :

Techniciens de maintenance,

Chefs d'équipe maintenance,

Agents de maintenance polyvalents.

IV.5.3 Formation du personnel d'encadrement

Objectif : assurer une coordination efficace entre les équipes et une gestion stratégique des ressources.

Contenu de la formation :

Gestion des priorités d'interventions,

Suivi des indicateurs de performance (TRS, MTTR, MTBF),

Élaboration et pilotage des plans de maintenance,

Suivi et évaluation des compétences du personnel formé.

Public concerné :

Chefs d'atelier,

Responsables de production,

Ingénieurs méthodes ou maintenance.

IV.5.4 Formation en sécurité spécifique à la machine

Objectif : prévenir les accidents et adopter les bons réflexes en cas de situation dangereuse.

Contenu de la formation :

Règles de sécurité propres au Tour HB 725 (port des EPI, procédures de verrouillage...),

Procédures à suivre en cas d'incident,

Bonnes pratiques générales pour limiter les risques au poste de travail.

Public concerné :

Tout le personnel travaillant à proximité de la machine,

Agents HSE (Hygiène, Sécurité, Environnement).

IV.5.5 Application de la démarche Kaizen au tour HB 725

La mise en œuvre de la démarche Kaizen sur le tour HB 725 s'inscrit dans une logique d'amélioration continue visant à optimiser la disponibilité de la machine, à réduire les pannes récurrentes et à impliquer l'ensemble du personnel dans la résolution de problèmes. Le processus a été mené en plusieurs étapes, selon les principes fondamentaux du Kaizen.

Tout d'abord, une observation directe sur le terrain (Gemba) a permis d'identifier les dysfonctionnements récurrents de la machine : usure du roulement dans la boîte de vitesses, fuites au niveau de la pompe d'arrosage, vibrations excessives, blocages de la broche, etc. Ces constats ont été formalisés à travers une analyse AMDEC, permettant de prioriser les défauts en fonction de leur gravité, occurrence et détectabilité.

Des solutions simples, peu coûteuses mais efficaces ont alors été proposées, conformément à l'esprit Kaizen : ajout d'un graisseur automatique, repérage visuel sur le chariot pour éviter le désalignement, remplacement des joints d'étanchéité, vérification régulière des microcontacts, etc. Ces idées d'amélioration ont été centralisées dans un tableau d'affichage des problèmes/solutions, puis suivies dans un tableau Kaizen de suivi des idées, précisant le responsable de chaque action, le planning de réalisation, et l'état d'avancement.

Tableau IV.2 : Tableau d'affichage du tour HB 725

| Problème identifié | Solution proposée |
|---------------------------------|--|
| Usure roulements boîte vitesse | Optimiser la lubrification et introduire un graissage auto |
| Jeux / désalignement du chariot | Remplacer les clavettes, réaligner et graisser régulièrement |
| Défaut de freinage | Ajuster le frein et vérifier à chaque fin de semaine |
| Fuite pope d'arrosage | Changer les joints et vérifier l'étanchéité tous les mois |
| Risque de rupture de l'arbre | Effectuer un contrôle non destructif (CND) semestriel |
| Mauvais contact électrique | Planifier un remplacement des disjoncteurs chaque 6 mois |
| Blocage broche | Surveiller la lubrification + nettoyage systématique |

Tableau IV.3 : Tableau de suivi du tour HB 725

| Problème visé | Solution diminuant le problème | Idée d'amélioration | Qui | Quoi | Quand | Actions réalisées |
|------------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------|--------------------|--------------|----------------------------------|
| Usure boîte de vitesse | Installer un graisseur automatique | Graisseur automatique | Mécanicien chef | Montage du système | .../.../2025 | (Résultat devant être concluant) |

| | | | | | | |
|----------------------------------|---|---|----------------------|---|--------------|----------------------------------|
| Désalignement chariot | Repère visuel d'alignement sur le chariot | Marquage de repères + documentation | Atelier mécanique | Peinture repères + formation opérateurs | .../.../2025 | (Résultat devant être concluant) |
| Défaut de freinage | Intégrer vérification frein dans contrôle | Ajouter le frein à la fiche de contrôle | Responsable sécurité | Mise à jour de la checklist hebdomadaire | .../.../2025 | (Résultat devant être concluant) |
| Fuite pompe d'arrosage | Remplacement des joints | Nouvelle référence de joints (silicone) | Maintenance | Commander et tester les nouveaux joints | .../.../2025 | (Résultat devant être concluant) |
| Casse arbre possible | Contrôles vibratoires trimestriels | Programme de formation + planning CND | Qualité / Méthodes | Former l'opérateur, planifier les contrôles | .../.../2025 | (Résultat devant être concluant) |
| Panne électrique (microcontacts) | Étiqueter et remplacer microcontacts usés | Code couleur pour signaler les composants | Électricien | Mise en place d'un code couleur | .../.../2025 | (Résultat devant être concluant) |
| Blocage broche | Surveillance renforcée de | Sensibiliser opérateurs aux | Responsable atelier | Affichage consignes | .../.../2025 | (Résultat devant être concluant) |

| | | | | | | |
|--|---------------------|---------------------|--|-------------------------------|--|--|
| | la lubrification | bonnes pratiques | | + rappel des procédures | | |
|--|---------------------|---------------------|--|-------------------------------|--|--|

La mise en œuvre des actions correctives a respecté le cycle PDCA (Plan – Do – Check – Act), garantissant une amélioration durable. Les solutions les plus efficaces ont été normalisées et intégrées aux procédures de maintenance et d'exploitation du tour.

IV.6 Conclusion

Le plan de maintenance proposé vise à anticiper les défaillances, réduire les coûts et augmenter la disponibilité de la machine. Grâce à la stratégie préventive et à l'implication du personnel via le Kaizen, le tour HB 725 pourra fonctionner de manière plus fiable et durable.

Conclusion générale

Dans un environnement industriel où la performance, la sécurité et la rentabilité sont étroitement liées, la maîtrise de la sûreté de fonctionnement des équipements s'impose comme une nécessité stratégique. Ce mémoire a permis de démontrer l'importance d'une démarche méthodique et structurée pour analyser, comprendre et améliorer la fiabilité d'une machine critique au sein de l'entreprise FERROVIAL Annaba, à savoir le tour HB 725.

À travers une analyse ABC appliquée aux arrêts de production, ce tour a été identifié comme l'un des équipements les plus impactant en termes de temps d'arrêt. Son étude détaillée a permis de mettre en évidence les principales sources de défaillances, grâce à l'utilisation d'outils classiques d'analyse fonctionnelle et de gestion des risques tels que le brainstorming, la bête à corne, le diagramme pieuvre, l'arbre de défaillance, le diagramme de causes-effets (Ishikawa) et l'AMDEC.

L'application de ces outils a non seulement permis d'identifier les causes profondes des pannes récurrentes, mais également de proposer des améliorations concrètes, notamment à travers un plan de maintenance préventive adapté aux caractéristiques techniques et fonctionnelles de la machine. Ce plan vise à améliorer la disponibilité, à réduire les coûts liés aux arrêts imprévus, et à prolonger la durée de vie de l'équipement tout en garantissant la sécurité des opérateurs.

En définitif, cette étude met en lumière l'intérêt d'une approche proactive et structurée de la maintenance et de la sûreté de fonctionnement, qui peut être généralisée à d'autres équipements de l'atelier. Elle ouvre également la voie à des perspectives d'amélioration continue telles que l'intégration d'outils de maintenance prédictive, pour aller encore plus loin dans l'optimisation de la performance industrielle.

- [1] FERROVIAL, Présentation générale de l'entreprise ferroviaire algérie, Annaba: Document interne ferroviaire, 2025.
- [2] FERROVIAL, Catalogue des produits, Annaba: E.P.E FERROVIAL, 2021.
- [3] Z. Dib, «Elaboration d'une politique de maintenance préventive d'un tour automatique C80 et amélioration de la Production de son embarreur AES,» Faculté des sciences de l'ingénierie _ UBMA, Annaba, 2021.
- [4] A. Mohamed, «Etude et réalisation de la gamme d'usinage de l'arbre d'essieu du wagonnet basculant,» Université Badji Mokhtar _ Annaba, Annaba, 2021.
- [5] L. Ravignon, P.-L. Bescos, M. Joalland, S. Le Bourgeois, et A. Maléjac, La méthode ABC/ABM : Rentabilité mode d'emploi, 3^e éd., Paris : Éditions d'Organisation, 2007.
- [6] Y. Mebbani, "La méthode ABC (Activity Based Costing), concepts et mise en place," Revue de la Stratégie et du Développement, vol. 2, no. 2, pp. 49–75, 2012.
- [7] FERROVIAL, «Photo de le tour HB 725 dans l'atelier B3,» Document interne, Annaba, 2025.
- [8] FERROVIAL, «Information historiques sur le tour HB 725,» Communication interne, Annaba, 2025.
- [9] FERROVIAL, «Historique des pannes _ service maintenance,» Document interne , Annaba, 2025.
- [10] H. Machines, «Catalogue technique du tour HB 725,» Document constructeur , consulté chez FERROVIAL , Annaba.
- [11] J. Canquery, «Le brainstorming : une technique pédagogique pour favoriser la reconnaissance du besoin d'information,» HAL Open science, 2015.
- [12] K. Rabiaa, «Présentation sur la méthode de brainstorming,» Université Badji Mokhtar _ Annaba, Annaba, 2025.
- [13] A. Roussel, Analyse fonctionnelle et cahier des charges fonctionnel, 2nd ed., Paris, France: Editions Techniques de l'Ingénieur, 2005.
- [14] Académie de Versailles, *La démarche d'analyse fonctionnelle*, Versailles : Académie de Versailles, 2010.
- [15] C. É. I. (CEI), «CEI 50(191) - Vocabulaire électrotechnique international : Sécurité de fonctionnement et qualité de service.,» CEI, Genève, 1990.
- [1] FERROVIAL, Présentation générale de l'entreprise ferroviaire algérie, Annaba: Document interne ferroviaire, 2025.

- [17] A. Villemeur, Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels – Fiabilité, maintenabilité, disponibilité, Paris : Eyrolles, 1988.
- [18] P. Paquin, «Intégration des concepts de la fiabilité et de la maintenabilité dans la conception mécanique,» Université du Québec à trois-Rivières, 2003 .
- [19] S. Adje, Utilisons le diagramme d'Ishikawa pour résoudre nos problèmes, Paris : Édilivre, 2016.
- [20] M. Réquillard, Comment créer un diagramme d'Ishikawa, Auto-édition, 2020.
- [21] J. Faucher, *Pratique de l'AMDEC* : Assurez la qualité et la sûreté de fonctionnement de vos produits, équipements et procédés, 2^e éd., Paris : Dunod, 2009.
- [22] G. Landy, AMDEC – Guide pratique, Paris : AFNOR Éditions, 2011
- [23] B. Meriem, «AMDEC Application a La STEP D Ain Elhoutz,» Université Tlemcen , Tlemcen, 2015.
- [24] J. Faucher, *Pratique de l'AMDEC*, 1^{re} éd., Paris : Dunod, 2004.
- [25] A. A. A. S. K. e. S. A. Hamid, "The Role of Continuous Improvement Strategy (Kaizen) in Organizational Innovation: An Analytical Research in the General Company of Electrical and Electronic Industries / The Ministry of Industry and Minerals," *Journal of Economics and Administrative Sciences*, vol. 27, no. 1129, pp. 41–54, 2021.
- [26] K. Institute, «Amélioration continue : Maîtriser les principes du KAIZEN™,» Kaizen Institute.
- [27] R. Khelif, «Eléments pour améliorer : Les outils de la qualité,» Document personnel, Annaba, 2025.