

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté : Science de l'ingénierie
Département : Génie mécanique
Domaine : Science et technologie
Filière : Génie mécanique
Spécialité : Ingénierie de la maintenance

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master

Thème :

**Amélioration des temps de bon fonctionnement de la
fraiseuse PMO 1.5 (Ferrovial)**

Présenté par : Khelil Berbar Mohamed Larbi

Encadrant : Mr, Abdelkader Kallouch

Jury de soutenance

Nom et prénom	Grade	Rôle du jury
Khelif Rabia	Professeur	Président
Kallouch Abdelkader	MCB	Encadrant
Djeddi Mohamed Lamine	MCA	Examineur

Année universitaire 2024/2025



Remerciements



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

*Je remercie tout particulièrement **MR Kallouch Abdelkader**, mon encadrant académique, pour son accompagnement, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de ce travail.*

*Je tiens également à remercier **l'équipe de l'entreprise FERROVIAL**, et notamment **Mr Fritah Islem**, pour leur accueil chaleureux, leur encadrement, et pour m'avoir permis d'intégrer leur environnement professionnel, ce qui a été pour moi une expérience très enrichissante.*

Mes remerciements s'adressent aussi à l'ensemble de mes enseignants et encadrants du Master 2 en ingénierie de la maintenance, pour la qualité de leur enseignement et leur soutien durant toute ma formation.

*Enfin, j'exprime toute ma reconnaissance à **ma famille** et à **mes proches** pour leur soutien moral, leur patience et leur confiance tout au long de mon parcours.*

Sommaire

Liste des figures	v
Liste des tableaux	vii
Liste des symboles	viii
Résumé	ix
Introduction générale	2

I. Présentation de l'entreprise

I.1. Historique et Positionnement	5
I.2. Atouts de FERROVIAL	7
I.3. Activité de l'entreprise	8
I.4. Organigramme actuel de l'entreprise	11
I.5. Présentation de la structure.....	12
I.5.1. Direction complexe	12
I.5.2. Division production	12
I.6. Conclusion	17

II. Généralité sur la maintenance

II.1. Introduction	20
II.2. Définitions et Cadre Normatif.....	20
II.2.1 Réglementations et Normes Applicables.....	20
II.3. Enjeux et Objectifs de la Maintenance.....	20
II.4. Typologie des Stratégies de Maintenance	21
II.4.1. Maintenance Corrective.....	21
II.4.2. Maintenance Préventive	22
II.4.3. Maintenance Améliorative	22
II.5. Les niveaux de maintenance :	23
II.5.1. La maintenance de premier niveau :	23
II.5.2. La maintenance de niveau 4 :	24

II.6. Les opérations de la maintenance :	24
II.6.1. Opérations de maintenance corrective :	24
II.6.2. Opérations de maintenance préventive :	26
II.7. Indicateurs de Suivi de Performance en Maintenance	27
II.8. Analyse fonctionnelle :	30
1. Recensement des fonctions	30
2. Ordonnancement des fonctions	30
3. Caractérisation des fonctions	30
4. Hiérarchisation des fonctions	31
5. Valorisation des fonctions	31
6. Application à l'optimisation du temps de bon fonctionnement	31
II.9. La méthode APTE :	31
II.9.1. Objectifs et principes de la méthode APTE	32
II.9.2. Description et démarche méthodologique	32
a. Identification des tâches d'entretien	32
b. Analyse et priorisation	32
c. Planification et suivi	33
II.9.3. Applications pratiques et enjeux	33
II.9.4. Limites et perspectives	33
II.10. Notion de la défaillance :	34
II.10.1. Définition de la Défaillance :	34
II.10.2. La panne :	34
II.10.3. Matériel réparable :	34
II.10.4. Matériel irréparable (non réparable) :	35
II.10.5. Types de Défaillances :	36
II.10.6. Les modes de défaillance :	38
II.11. Généralités sur la fiabilité, la maintenabilité et disponibilité :	39

II.11.1. La fiabilité :	39
II.11.1.1. Types de fiabilité :	39
II.11.1.2. Objectifs de la fiabilité :	40
II.11.1.3. Paramètres de mesure de la fiabilité :	40
II.11.1.4. Loi de Weibull :	43
II.11.2. Caractéristiques de la loi de Weibull :	43
II.11.3. La Maintenabilité :	45
II.11.4. La disponibilité :	47
Problématique et position du problème	50
Recherche bibliographique	52
III. Caractérisation technique et diagnostic FMD de la fraiseuse PMO 1.5	1.5
III.1. Description de la fraiseuse :	58
III.2. Principaux composants :	58
III.3. Fonctionnement de la fraiseuse :	59
III.5. Importance dans le cadre de l'étude :	61
III.6. Exploitation de l'historique de maintenance de la fraiseuse PMO 1.5 :	61
III.6.1 Etude FMD de la machine :	64
IV. Solutions pour l'amélioration du MTBF et la réduction du MTTR	
IV.1. Introduction :	72
IV.2. Résumé des solutions proposées.....	72
IV.3. Méthode KPI (Key Performance Indicator):	72
IV.3.1. Les indicateurs pour les équipements pris en charge par le service maintenance.....	73
IV.3.2. Les indicateurs de qualité.....	73
IV.3.3. Les indicateurs de service.....	74
IV.3.4. Les indicateurs de ressources humaines.....	74
Conclusion :	75
Conclusion Générale	78

Liste des figures

Chapitre I : Présentation de l'entreprise

Figure I.1 : Ferroviaire.....	6
Figure I.2 : L'entreprise Ferroviaire.....	6
Figure I.3 : Atelier de soudage.....	7
Figure I.4 : Wagon Ballast.....	9
Figure I.5 : Wagon citerne.....	9
Figure I.6 : Centrale à béton.....	9
Figure I.7 : Bétonnière.....	9
Figure I.8 : Container.....	9
Figure I.9 : Produits forgés.....	10
Figure I.10 : Organigramme de l'entreprise.....	11

Chapitre II : Généralités sur la maintenance

Figure II.1 : Les types de maintenance.....	21
Figure II.2 : Les niveaux de maintenance.....	23
Figure II.3 : Chronogramme illustrant les différentes phases de vie d'un équipement réparable.....	34
Figure II.4 : Chronogramme illustrant les différentes phases de vie d'un équipement irréparable.....	35
Figure II.5 : La courbe du taux de défaillance.....	41
Figure II.6 : Courbe en baignoire.....	42
Figure II.7 : Courbe théorique de distribution de la fiabilité.....	44
Figure II.8 : Courbe théorique de Weibull.....	44

Figure II.9 : Chronologie des temps d'un diagnostic en maintenance.....	45
Figure II.10 : La relation entre les notions FMD.....	48

Chapitre III : Caractérisation technique et diagnostic FMD de la fraiseuse PMO 1.5

Figure III.1 : Les composants de la fraiseuse PMO 1.5.....	59
Figure III.2 : Les différents types de fraises.....	60
Figure III.3 : Les types de fraises et leurs opérations.....	60
Figure III.4 : Les types de fraises et leurs opérations.....	61
Figure III.5 : Le papier de Weibull.....	66

Chapitre IV : Les solutions pour l'amélioration du MTBF et la réduction du MTTR

Figure IV.1 : La courbe théorique d'apprentissage.....	75
---	----

Liste des tableaux

Chapitre I : Présentation de l'entreprise

Tableau I.1 : Les procédés maîtrisés.....	10
---	----

Tableau I.2 : Les différents ateliers dans l'entreprise.....	14
--	----

Chapitre II : Généralité sur la maintenance

Tableau II.1 : Exemple de maintenance de niveau 1.....	23
--	----

Tableau II.2 : Exemple de maintenance de niveau 4.....	24
--	----

Chapitre III : Caractérisation technique et diagnostic FMD de la fraiseuse PMO 1.5

Tableau III.1 : Historique de la fraiseuse PMO 1.5.....	62
---	----

Tableau III.2 : Application du modèle de Weibull.....	65
---	----

Tableau III.3 : Etude du modèle de Weibull.....	68
---	----

Tableau III.4 : Tableau de la maintenabilité.....	69
---	----

Tableau III.5 : Tableau de la disponibilité.....	70
--	----

Chapitre IV : Solutions pour l'amélioration du MTBF et la réduction du MTTR

Tableau IV.1 : Comment les solutions agissent sur le MTBF et le MTTR.....	72
---	----

Tableau IV.2 : Les indicateurs des équipements.....	73
---	----

Tableau IV.3 : Les indicateurs de qualité.....	73
--	----

Tableau IV.4 : Les indicateurs de service.....	74
--	----

Tableau IV.5 : Les indicateurs des ressources humaines.....	74
---	----

Liste des symboles

$f(t)$: La densité de probabilité

$F(t)$: La fonction de répartition

$R(t)$: La fiabilité

γ : Paramètre de position

β : Paramètre de forme

η : Paramètre d'échelle

$M(t)$: La maintenabilité

MTTR : Moyenne technique de réparation

MTBF : Moyenne de temps de bon fonctionnement

λ : Taux de défaillance

μ : Taux de réparation

D : La disponibilité

Cf : Le cout de défaillance

Cp : Le cout de maintenance préventive

T_n : Temps de réparation à la nième intervention

T₁ : Temps initial

b : Taux d'apprentissage

ملخص

يجب أن تلبي استراتيجية الصيانة الفعالة المتطلبات التشغيلية لشركات الإنتاج بشكل مطلق. ولتحقيق هذه الغاية، لا بد من تصميم أدوات الإدارة مع الأخذ في الاعتبار الظروف التشغيلية الحقيقية لضمان أهميتها وفعاليتها على أرض الواقع.

تقترح هذه الأطروحة نهجًا منظمًا يهدف إلى تحسين وقت التشغيل للمعدات الصناعية. ويتم التركيز على استخدام مؤشرات الأداء الرئيسية كأداة لإدارة ومراقبة أداء الصيانة. ويتم أيضًا استكشاف إجراءات تكميلية أخرى، تنظيمية وفنية، بهدف زيادة توفر الآلات وتقليل معدلات الفشل.

ومن خلال هذا النهج، فإن الهدف هو توفير حلول ملموسة وقابلة للتطبيق لتحسين موثوقية المعدات، مع تحسين إدارة الموارد المرتبطة بالصيانة.

الكلمات المفتاحية: إدارة الصيانة؛ مؤشرات الأداء الرئيسية؛ موثوقية المعدات؛ التوفر؛ تحليل ويبيل؛ تحسين TBF

Résumé

Une stratégie de maintenance efficace doit impérativement répondre aux exigences opérationnelles des entreprises de production. Pour cela, les outils de gestion doivent être conçus en tenant compte des conditions réelles d'exploitation afin d'assurer leur pertinence et leur efficacité sur le terrain.

Ce mémoire propose une approche structurée visant à améliorer le **temps de bon fonctionnement (TBF)** des équipements industriels. L'accent est mis sur l'utilisation des **indicateurs clés de performance (KPI)** en tant qu'outil de pilotage et de suivi des performances de maintenance. D'autres actions complémentaires, à la fois organisationnelles et techniques, sont également explorées dans le but de renforcer la **disponibilité** des machines et de réduire les taux de défaillance.

À travers cette démarche, il s'agit d'apporter des solutions concrètes et applicables pour une meilleure fiabilité des équipements, tout en optimisant la gestion des ressources liées à la maintenance.

Mots-clés : Gestion de la maintenance ; Indicateurs de performance (KPI) ; Fiabilité des équipements ; Optimisation du TBF ; Disponibilité ; Analyse de Weibull ;

Abstract

An effective maintenance strategy must align with the operational needs of production companies. To be truly efficient, maintenance management tools must be tailored to real world conditions. This thesis presents a structured approach to improving Mean Time Between Failures (MTBF), primarily through the use of Key Performance Indicators (KPIs), alongside complementary actions and practical measures aimed at enhancing equipment availability.

Keywords: Maintenance management; maintenance performance indicators; reliability improvement strategies; KPI methodology ; Weibull analysis

A decorative scroll frame with a light gray background and a dark gray border. The frame has a vertical scroll on the left side and a horizontal scroll on the top right side.

Introduction Générale

Introduction Générale

Dans le contexte actuel de l'industrie, où la concurrence est de plus en plus forte et les exigences de production de plus en plus élevées, la performance et la fiabilité des équipements industriels sont devenues des leviers essentiels pour assurer la pérennité et la rentabilité des entreprises. Parmi les indicateurs clés utilisés pour évaluer cette performance, le **Temps de Bon Fonctionnement (TBF)** occupe une place centrale. Cet indicateur, qui mesure la durée pendant laquelle une machine ou un équipement fonctionne sans interruption, permet non seulement d'apprécier l'efficacité opérationnelle des systèmes, mais aussi d'orienter les stratégies de maintenance vers des objectifs précis : améliorer la productivité, réduire les coûts liés aux pannes, et optimiser l'utilisation des ressources matérielles et humaines.

Dans un environnement où les arrêts non planifiés peuvent entraîner des pertes financières considérables et perturber toute la chaîne de production, maximiser le TBF devient un enjeu stratégique. Pour répondre à ces défis, les entreprises industrielles sont amenées à repenser leurs pratiques de maintenance. Elles ne peuvent plus se contenter d'interventions correctives réactives, mais doivent désormais s'appuyer sur des approches plus avancées, capables d'anticiper les défaillances et d'intervenir au moment optimal. C'est dans ce cadre que des stratégies comme la maintenance préventive, la maintenance conditionnelle et, plus récemment, la maintenance prédictive prennent tout leur sens.

Le progrès des technologies numériques, notamment l'Internet des Objets (IoT), l'intelligence artificielle (IA) et l'analyse avancée des données, ouvre de nouvelles perspectives pour optimiser le TBF. Ces outils permettent, par exemple, de surveiller en continu l'état des équipements, de détecter des signes précoces de dégradation, et de programmer des interventions de maintenance de manière ciblée et efficace. Cependant, leur mise en œuvre soulève aussi des questions majeures : les investissements nécessaires, la formation des équipes à l'utilisation de ces technologies, la gestion et l'interprétation des flux massifs de données, ainsi que l'adaptation des organisations aux nouveaux modes de travail.

Ce mémoire a pour ambition d'explorer en profondeur ces enjeux et d'analyser les différentes solutions disponibles pour améliorer la disponibilité des équipements industriels. Il s'agira d'examiner non seulement les bénéfices attendus des approches

Introduction Générale

innovantes en maintenance, mais aussi les obstacles à surmonter pour en tirer pleinement parti.

L'objectif ultime est de proposer des recommandations concrètes permettant aux entreprises de mettre en place une maintenance plus efficace, capable de prolonger le temps de bon fonctionnement des machines tout en maîtrisant les coûts et en optimisant les ressources.

A decorative scroll frame with a vertical bar on the left and a horizontal bar at the bottom, with rounded corners and a small scroll icon at the top right.

Présentation de l'entreprise

I. Présentation de l'entreprise

I.1. Historique et Positionnement

Ferrovial est une entreprise publique économique spécialisée dans la fabrication et l'entretien de matériels ferroviaires, notamment les wagons de transport de marchandises et les produits de forge. Fondée en 1936 sous l'appellation de **Société Nord-Africaine de Ferroviaire (SNAF)**, l'entreprise avait à l'origine pour mission de construire des wagons de marchandises et des pièces de maintenance destinées à l'armée française.

Après sa nationalisation, l'entreprise a été rattachée à la **Société Nationale des Métaux (SN.METAL)** sous le nom de "**Unité Allelick**", en référence à la région de son implantation à Annaba. En 1983, lors d'une restructuration des grandes entreprises publiques, elle prend la dénomination de **Ferrovial** et devient une entreprise publique à caractère économique. En 1989, l'entreprise passe à l'autonomie financière et se structure en quatre entités distinctes :

- Le siège
- Unité complexe wagonnage
- Unité forge
- Unité maintenance industrielle

Depuis 1989, Ferrovial est une **Entreprise Publique Économique (EPE)**, transformée en **Société par Actions (SPA)** en 1999, avec un capital social de **2254,1 millions de dinars algériens (MDA)**. Complètement détenue par l'État, elle fait partie du groupe **SGP Construction Métallique** (« groupe Contrumet »), et est dirigée par un président-directeur général, sous la supervision d'un conseil d'administration.

En 2020, Ferrovial signe un contrat de commande avec la **Société Nationale des Transports Ferroviaires (SNTF)** pour la rénovation et la remise à niveau d'environ 500 wagons de tous types, sur une période de cinq ans. Ce projet marque une étape importante dans l'activité de l'entreprise, lui permettant de renforcer ses capacités techniques et de contribuer à la modernisation du parc ferroviaire algérien.

En 2022, la SNTF a lancé un projet ambitieux pour développer son activité, incluant la récupération de près de 3000 wagons hors service. Ces wagons seront modifiés pour être

utilisés dans le transport de containers, avec la participation de Ferrovial. Ce projet s'inscrit dans la perspective du démarrage de deux projets d'envergure :

- **Le PPI de Djebel El Onk et Bled El Hadba**
- **Le gisement de fer de Ghar-Djebilet** (Tindouf), dont les travaux ont pour objectif de transporter des marchandises minières, notamment via des wagons spécialement conçus pour le transport de containers.

Ferrovial joue ainsi un rôle stratégique dans le développement du secteur ferroviaire algérien et dans l'accompagnement des projets industriels de grande envergure, en contribuant à l'optimisation du transport de marchandises, en particulier minérales. [1]



Figure I.1 : Ferrovial

L'entreprise Ferrovial se trouve à 6 km à l'est de Annaba, à proximité immédiate de la route nationale N°16, qui la relie directement au centre-ville. Son siège, implanté sur l'axe routier Annaba - El-Hadjar, est situé à 10 km du complexe sidérurgique d'El-Hadjar. Sa position géographique est stratégique, car elle se trouve également à 5 km du port d'Annaba, un atout majeur pour les échanges commerciaux par voie maritime. De plus, l'entreprise est facilement accessible par rail, grâce à une voie ferrée qui passe à proximité de ses locaux.

Ferrovial s'étend sur une superficie de 32 hectares, dont 48 500 m² sont couverts, ce qui lui permet de disposer d'un large espace pour ses diverses activités industrielles, logistiques et commerciales. [1]



Figure I.2 : L'entreprise Ferrovial

I.2. Atout de FERROVIAL

Fort de plus de cinquante ans d'expertise dans la fabrication de matériel ferroviaire sans équivalent sur le plan national à ce jour et doté d'un savoir-faire unique en transformation de l'acier, FERROVIAL bénéficie :

- D'installations modulables et d'une main-d'œuvre polyvalente, rapidement mobilisables selon les besoins spécifiques de chaque projet ;
- D'une équipe pluridisciplinaire de grande envergure, réunissant ingénieurs et techniciens dont l'expérience couvre l'ensemble du cycle : conception, ingénierie de contrôle, production et commercialisation.
- Postes de forge et de formage permettant la réalisation en interne de composants critiques, réduisant les délais et coûts d'approvisionnement.
- Services de peinture et de traitement de surface intégrés, garantissant la conformité aux normes anticorrosion et valorisant la durée de vie des wagons.
- Certification ou en cours de certification selon les référentiels ISO (9001, 14001, 45001), assurant des processus standardisés et traçables.
- Politique HSE rigoureuse : contrôles réguliers, plans de prévention des risques professionnels et sensibilisation au respect de l'environnement.
- Collaboration étroite avec les fournisseurs locaux et internationaux, garantissant un approvisionnement rapide et compétitif en composants de substitution. [1]



Figure I.3 : Atelier de soudage

I.3. Activité de l'entreprise

FERROVIAL s'articule autour de trois unités de production principales :

- **Secteur ferroviaire** : L'activité la plus importante, avec une capacité de **800 à 1 000 wagons** fabriqués chaque année.
- **Forge universelle** : Capacité annuelle de **3 000 tonnes**, couvrant les procédés de forge au marteau, forge libre et forge sur presse.
- **Containers maritimes (20 pieds)** : Production et réparation de containers, à raison de **1 000 unités** fabriquées par an, plus l'entretien et la remise en état de tous types de containers.

FERROVIAL conçoit, fabrique et commercialise avant tout une gamme très variée de wagons de transport de marchandises. Pour diversifier son offre et répondre à d'autres besoins industriels, elle produit :

Wagonnage :

- **Wagon plat** : transport de containers, de tubes, bobines et d'autres produits sidérurgiques ;
- **Wagon ballast** : pour le chemin de fer ;
- **Wagon couvert** : idéal pour les marchandises sensibles aux intempéries (palettes, cartons, pièces mécaniques) et le transport des animaux ;
- **Wagon citerne** : destiné au transport de liquides (hydrocarbure, produits chimiques) ;
- **Wagon ouvert (ou trémie)** : utilisé pour le transport de matériaux en vrac (minerais, graviers, céréales) grâce à ses flancs bas et parfois équipés de trappes pour déchargement par gravité ;
- **Wagon tombereau** : variante du wagon ouvert, avec des ridelles fixes ou basculantes, pour les matériaux en vrac tout en conservant une meilleure protection latérale ;
- **Wagonnet** : pour mines, briqueteries et carrières.



Figure I.4 : Wagon Ballast



Figure I.5 : Wagon citerne

Matériels travaux public :

- Bétonnières diesel et électrique 500l et 750l ;
- Centrales à béton ;
- Réservoirs domestiques ;
- Bennes diverses.



Figure I.7 : Bétonnière



Figure I.6 : Centrale à béton

Containers : Pour le transport maritime et ferroviaire (20 pieds)



Figure I.8 : Container

Différents autres produits :

- Les locomotives de manœuvre de 600 et 800 CV
- Les brouettes
- Des produits forgés; quincaillerie (pelle, pioche, boue, serre-joint ...) et pièces de sous-traitance et de cotraitance. [1]

**Figure I.9 : Produits forgés**

Elle maîtrise les procédés principaux suivants :

Tableau I.1 : Les procédés maîtrisés

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.4. Organigramme actuel de l'entreprise

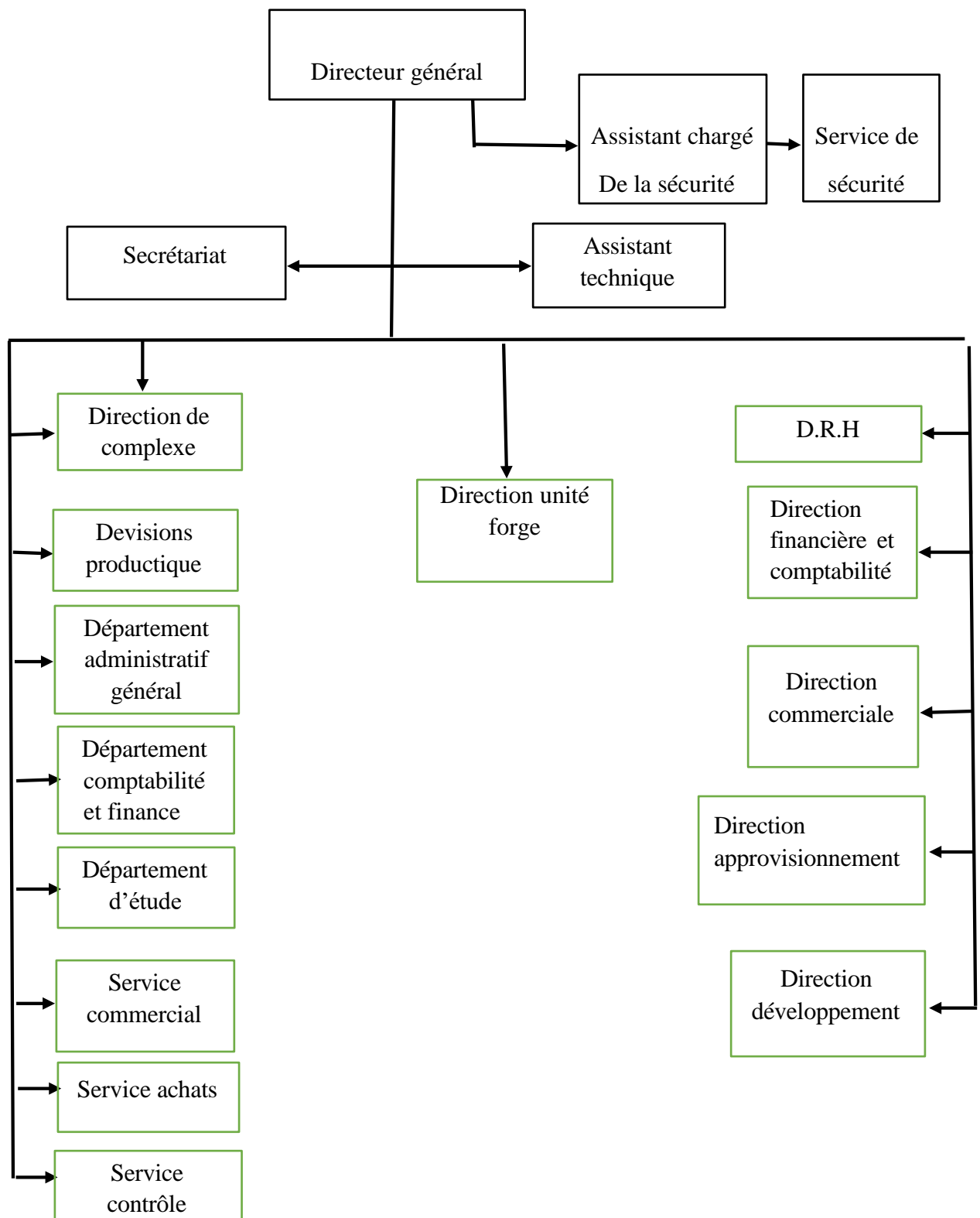


Figure I.10 : Organigramme de l'entreprise [1]

I.5. Présentation de la structure

I.5.1. Direction complexe

Cette unité, qui emploie environ 350 personnes, possède des machines-outils hautes performances et des installations récentes. Elle est organisée en plusieurs ateliers spécialisés, dont le principal est le « secteur wagnage ». Ces ateliers fabriquent non seulement une large palette de wagons pour différents usages, mais aussi des engins de travaux publics, assurent le montage de 4x4 et produisent des locotracteurs de 600 et 800 chevaux.

La structure hiérarchique de l'unité est conçue pour optimiser la coordination et l'atteinte des objectifs. Au sommet, le directeur de l'unité de production :

- Pilote l'ensemble de l'activité, en veillant à la cohérence entre les services internes, la direction centrale et les clients externes.
- Relance les opérations pour garantir la réalisation des objectifs fixés.
- Anime et encadre l'équipe de direction de l'unité.
- S'assure du respect des plannings et de l'efficacité des actions programmées.
- Supervise la planification de la charge de travail sur l'ensemble du complexe.
- Gère la trésorerie, en supervisant le recouvrement des créances afin d'assurer le paiement des salaires à échéance et de maintenir une marge financière suffisante pour l'achat des pièces de rechange et des consommables indispensables au bon fonctionnement.

I.5.2. Division production

Le divisionnaire de production gère les services et les départements suivant :

I.5.2.1. Département technique :

Il comporte les sections suivantes :

a) Sous – traitante : pour l'établissement de devis technique.

b) Bureau d'ordonnancement et lancement :

- La planification.
- Les charges des ateliers.

- Ordonnancement et lancement des travaux.
- Des suivis au niveau de l'atelier.
- Le rapport mensuel des productions.
- Le rapport holding.

c) le bureau de méthode :

- Préparation des gammes d'usinage.
- La chaîne de montage.
- Planning des consommables.
- Conception d'outillage.
- Assistance des travaux prototypes.

I.5.2.2. Service étude :

Il contient deux sections :

- **Section étude** : pour le dessin des produits.
- **Section calcule et normalisation** : La nature de la matière première utilisée et la quantité.

I.5.2.3. Département administratif :

Les tâches de chef de département sont :

- Suivre de la carrière professionnelle de l'agent.
- Transport de personnel.

I.5.2.4. Département commercial :

Le commercial est une structure du complexe qui a pour mission la prise en charge de la fonction commerciale, ces principales tâches sont :

- La participation aux réunions en rapport avec le commercial.
- Le suivi des affaires et commandes lancées en fabrication.
- L'entretien et le développement des relations avec les clients et les prospections.

I.5.2.5. Département comptabilité :

Les fonctions de département sont :

- Etude et consultation de la demande d'achat.
- Etablissement de la commande.
- Réception de la marchandise.
- Transmission du dossier au finance.

I.5.2.6. Service transit :

Ses tâches sont représentées comme suite :

- Suivi de la marchandise.
- Etablissement de déclaration de dédouanement et bon d'enlèvement.
- Suivi de dédouanement de la marchandise (import/export).

I.5.2.7 Les ateliers :

Tableau I.2 : Les différents ateliers dans l'entreprise

Désignation ateliers	Taches	Nombres de machines
B 0	Grenouillage des pièces (nettoyage).	03
B 1	Fabrication des brouettes.	12
B 2	Peinture des produits finis.	17
B 3	Usinage mécanique (tournage ,fraisage ,filetage)	177
B 4	Salle de compresseurs (produit d'air) compresse +magasin général	123
B 5	Débitage et chaudronnerie +montage des sous	123
B 6 /B 9	Montage wagon, bétonnière, centrale à béton, bateau sardinier, citernes.	83/66
B 8	Menuiserie, fabrication des mobiliers des bureaux pour l'entreprise et pour la vente.	42
B 10	Fabrication de l'outillage nécessaire pour la réalisation d'un produit.	15
B 11	Fabrication de bougies.	84

B12	Entretien wagon + fabrication des locotracteur.	30
-----	---	----

I.5.2.8. Département Maintenance :

1. Chef département :

Il assure la direction et le suivi opérationnel de tous les services (maintenance, approvisionnement, sécurité industrielle) en :

- Pilotant, coordonnant et contrôlant l'ensemble des interventions et calculs de maintenance, ainsi que la gestion des stocks et des matières premières.
- Définissant, avec ses équipes, les objectifs et indicateurs annuels et mensuels relatifs à la maintenance et aux approvisionnements.
- Garantissant la qualité et la fiabilité des opérations de maintenance sur l'outil de production et ses équipements annexes.
- Élaborant les plans de formation et de recrutement en collaboration avec le service des ressources humaines, afin de maintenir et développer les compétences de sa structure.
- Supervisant la réception et la conformité des pièces de rechange et des consommables, pour assurer un approvisionnement optimal.
- Veillant à l'application rigoureuse des procédures de maintenance et à leur amélioration continue.
- Analysant et présentant régulièrement le tableau de bord de la maintenance pour faciliter la prise de décision et l'optimisation des performances.

2. Chef service :

Le Chef de Service Maintenance supervise et organise l'ensemble des opérations destinées à préserver la fiabilité des installations et de leurs équipements périphériques. Ses missions principales sont :

- Piloter et animer les différentes sections de maintenance.
- Planifier et répartir les interventions selon les priorités et les programmes établis.
- Assurer le suivi des travaux de maintenance préventive et corrective sur l'ensemble des machines et annexes.

- Proposer, décider et mettre en œuvre les actions adaptées pour résoudre rapidement les pannes ou dysfonctionnements.
- Participer activement aux opérations techniques du service quand nécessaire.
- Identifier et déployer des méthodes de travail optimisées pour augmenter la performance et la qualité des interventions.
- Collecter, analyser et synthétiser les données issues des rapports de gestion et du tableau de bord de maintenance.
- Présenter régulièrement ces indicateurs à la hiérarchie pour faciliter la prise de décision.
- Veiller en permanence au respect des règles de sécurité au sein des équipes.
- Mettre à jour et faire appliquer les procédures HSE relatives aux activités de maintenance.

3. Section machine :

Cette section regroupe plusieurs ateliers spécialisés :

- **Waggonage :** Responsable de la maintenance mécanique et électrique des ateliers B3, B5, B6, B9 et B11.
- **Parachèvement :** Prend en charge la maintenance mécanique et électrique des ateliers B0, B1, B4, B8, B10, B12, ainsi que des zones de sablage, de peinture et du parc de manutention (équipements roulants).

Elle comprend également :

Un atelier de rembobinage de moteurs (actuellement hors service).

Un atelier d'électronique dédié à la maintenance des machines de production et du matériel bureautique.

- **Travaux neufs (INF) :** Regroupe les activités de gros œuvre, de plomberie et de manœuvres liées aux nouveaux aménagements.
- **Mécanique-auto :** Assure l'entretien et la réparation des camions, véhicules utilitaires et de tout autre moyen de transport de l'entreprise.

4. Chef du service méthode et maintenance :

Il coordonne et supervise les méthodes de maintenance, la réparation et la conception d'améliorations techniques afin d'optimiser les prestations de maintenance. Ses responsabilités principales sont :

- Animer et piloter les équipes du service.
- Suivre l'état technique des installations et tenir à jour les dossiers techniques et historiques.
- Développer et mettre en place de nouvelles méthodes de travail.
- Assurer l'interface avec les services produit et bureau d'études.
- Contrôler et évaluer les performances des activités de maintenance.

5. Magasin de maintenance :

Ce service gère l'ensemble des pièces de rechange et consommables :

- Tenue des stocks et enregistrement des mouvements de pièces détachées (PDR).
- Suivi mensuel de la consommation de PDR.
- Organisation et optimisation de l'espace de stockage.
- Élaboration de préconisations pour le réapprovisionnement. [1]

I.6. Conclusion

En résumé, Ferroviaal occupe actuellement une place essentielle dans le domaine ferroviaire en Algérie en raison de son riche passé historique, de son expertise technique pointue et de son organisation industrielle bien structurée. Depuis sa création en 1936 et sa transformation en Entreprise Publique Économique, la société s'est adaptée pour répondre à la demande croissante dans le transport de marchandises, tout en élargissant son offre vers la métallurgie, la production de conteneurs et d'équipements publics.

Les points forts de Ferroviaal résident dans ses installations adaptables et évolutives ainsi que dans son personnel qualifié. Son processus complet inclut le forgeage, l'usinage, la peinture et les traitements de surface. Cela garantit des produits conformes aux normes nationales et internationales. Sa capacité à gérer l'intégration verticale lui permet de contrôler les délais et les coûts tout en garantissant une fiabilité élevée de ses wagons et équipements ferroviaires.

Enfin, l'organisation interne, depuis le siège social jusqu'aux unités de production et au service de maintenance, démontre une structuration optimale pour piloter efficacement les projets (anciens comme le contrat SNTF de rénovation de 500 wagons, ou futurs comme le projet Ghar-Djebilet) et soutenir la modernisation du parc ferroviaire national. Fort de ce socle solide, Ferroviaire est parfaitement positionnée pour relever les défis de la maintenance industrielle et de l'optimisation du taux de disponibilité des machines, thème central de ce mémoire.

A decorative scroll frame with a light gray background and a dark gray border. The frame has a vertical scroll on the left side and a horizontal scroll on the top right side.

Généralité sur la maintenance

II. Généralité sur la maintenance

II.1. Introduction

La maintenance constitue un élément clé dans l'industrie et les services, garantissant le bon fonctionnement des équipements. Son objectif principal est d'assurer leur fiabilité, leur disponibilité et leurs performances tout en prolongeant leur durée de vie et en minimisant les interruptions de production. Avec le temps, la maintenance a évolué, passant d'une simple intervention corrective à une approche stratégique intégrant des technologies avancées et des systèmes intelligents.

II.2. Définitions et Cadre Normatif

Selon la norme **NF EN 13306**, la maintenance regroupe "l'ensemble des actions techniques, administratives et organisationnelles mises en œuvre tout au long du cycle de vie d'un bien pour le maintenir ou le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ". [2]

II.2.1 Réglementations et Normes Applicables

Diverses normes encadrent les pratiques de maintenance, notamment :

- **ISO 55000** : Gestion des actifs, mettant en avant la maintenance comme un levier stratégique. [3]
- **NF X 60-010** : Terminologie et classification des types de maintenance.
- **ISO 9001** : Système de management de la qualité, intégrant la maintenance dans une démarche d'amélioration continue. [4]

II.3. Enjeux et Objectifs de la Maintenance

Les objectifs fondamentaux de la maintenance sont :

- Garantir un fonctionnement fiable et une disponibilité maximale des équipements.
- Minimiser les interruptions de production et optimiser les performances.
- Réduire les coûts d'exploitation et de réparation.
- Assurer la sécurité des travailleurs et la conformité aux réglementations en vigueur.
- Gérer efficacement les ressources matérielles et humaines. [5]

II.4. Typologie des Stratégies de Maintenance

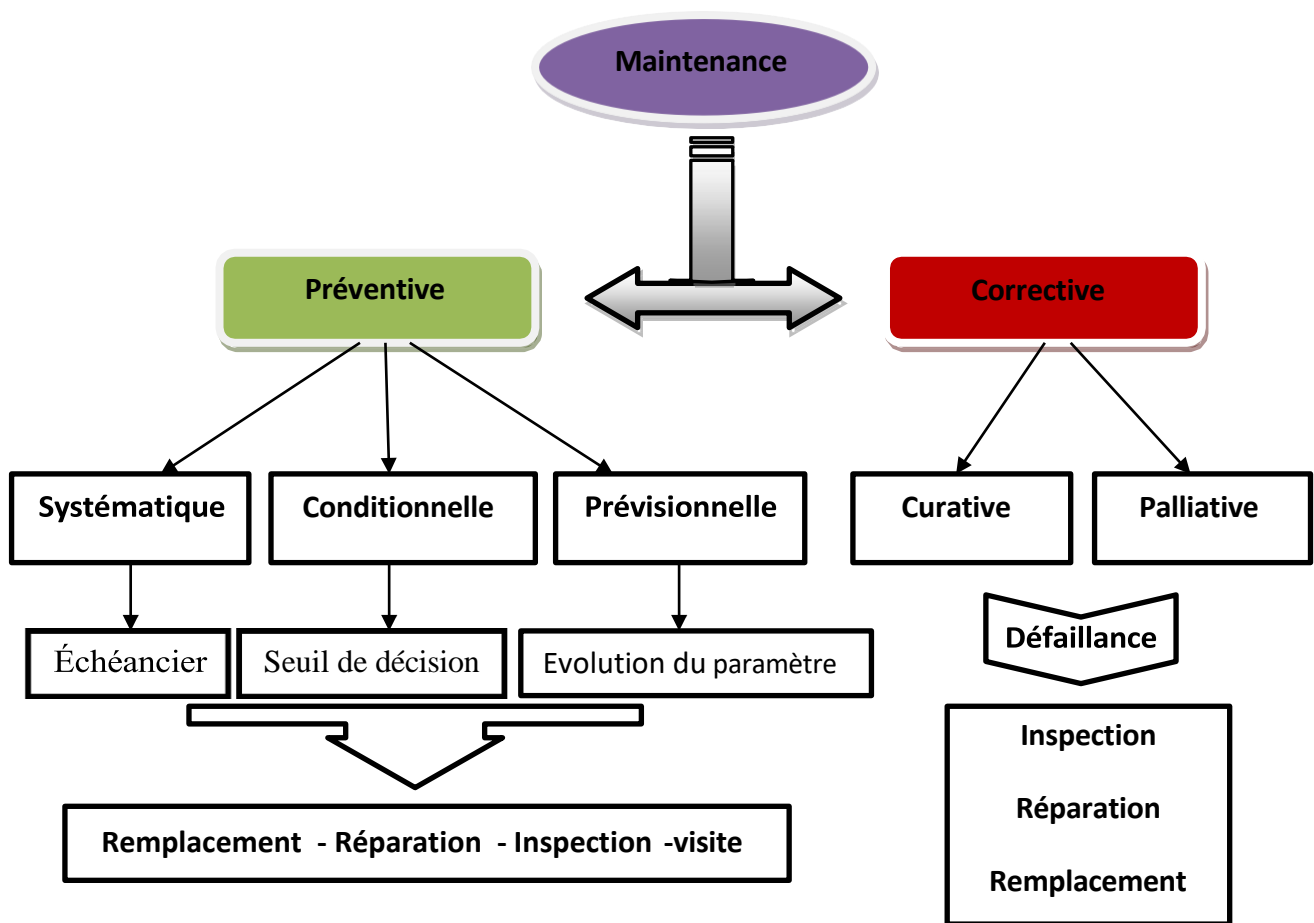


Figure II.1 : Les types de maintenance [6]

II.4.1. Maintenance Corrective

Exécutée après détection d'une panne pour remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir sa fonction requise .

Elle peut être exécuter immédiatement après la détection de la panne, ou de manière différée. Le retard dans l'exécution doit être en accord avec des règles de maintenance données

Maintenance palliative : c'est une maintenance qui s'attache à la correction de tout incident identifié en production, et empêchant la poursuite de celle-ci, c'est une intervention rapide pour pallier au plus urgent en attendant de trouver une solution ou une correction définitive plus rassurante.

Maintenance curative : La maintenance curative est une maintenance qui s'attache à corriger tout incident identifié en production mais n'empêchant pas la poursuite de celle-ci, il s'agit d'une intervention en profondeur et définitive pour réparer un équipement. [6]

II.4.2. Maintenance Préventive

Elle est exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères préétablis dans le but de réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement de l'équipement

On peut opérer :

Selon un échéancier relativement fixe: c'est la maintenance systématique; ou en fonction d'un événement défini préalablement et révélateur de l'état de dégradation d'un équipement (grâce à l'information d'un capteur, la mesure d'une usure...): il s'agit alors de maintenance conditionnelle.

- **Maintenance préventive systématique :** Planification d'interventions régulières, basées sur un calendrier ou le nombre de cycles d'utilisation. Cependant, l'intervention est exécutée sans contrôle préalable de l'état du bien.
- **Maintenance préventive conditionnelle :** Surveillance continue à l'aide de capteurs et d'indicateurs (température, vibrations, usure, etc.).

II.4.3. Maintenance Améliorative

Elle consiste à modifier les équipements pour renforcer leur efficacité, leur sécurité ou leur robustesse. [6]

II.5. Les niveaux de maintenance :

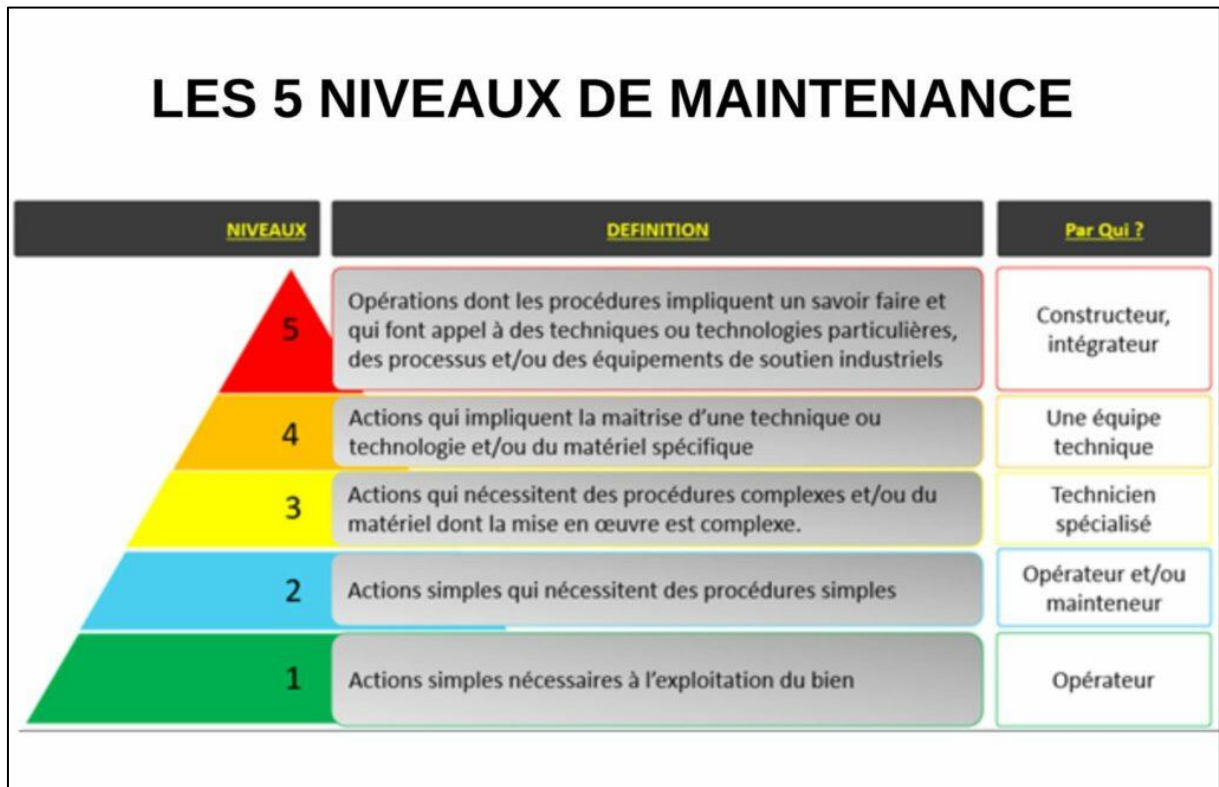


Figure II.2 : Les niveaux de maintenance

A titre d'exemple, nous illustrons deux niveaux ; le premier et le quatrième

II.5.1. La maintenance de premier niveau :

La maintenance de 1er niveau correspond aux interventions simples, nécessaires et réalisées sur des éléments facilement accessibles. Il s'agit donc d'opérations qui ne nécessitent pas un démontage ou l'ouverture de l'équipement, et qui peuvent être effectuées par l'exploitant lui-même ou par un opérateur non spécialisé.

Pour ces interventions, peu de pièces de rechange ou de consommables sont utilisées. Elles ne présentent pas de risque de sécurité particulier si les instructions essentielles sont consultables, par exemple sur une notice explicative ou des instructions visuelles. [7]

Tableau II.1 : Exemple de maintenance de niveau 1

Exemples de maintenance corrective de 1er niveau	Exemples de maintenance préventive de 1er niveau
Remplacement de plusieurs ampoules	Graissages

Interventions sur des racleurs, bavettes, frotteurs	Contrôle pour vérifier l'encrassement d'un filtre
---	---

II.5.2. La maintenance de niveau 4 :

Les interventions de maintenance de niveau 4 sont des opérations complexes et de grande importance, qui nécessitent une expertise technique particulière.

Elles doivent donc être réalisées par un technicien ou une équipe de techniciens spécialisés disposant d'une qualification spécifique, et supervisés par un responsable spécialisé lui aussi.

Ces interventions sont effectuées dans des ateliers fournissant un outillage, une documentation et des bancs de mesure adaptés. [7]

Tableau II.2 : Exemple de maintenance de niveau 4

Exemples de maintenance corrective de niveau 4	Exemples de maintenance préventive de niveau 4
Changement de clapets sur un compresseur	Analyse vibratoire
Changement d'une tête de câble en basse tension	Analyse des huiles
Révision d'une pompe de peinture dans le local maintenance	Thermographie infrarouge
Réparation d'un équipement à l'aide d'une valise de programmation automate	Utilisation d'outils tels qu'un oscilloscope avec interprétation des données

II.6. Les opérations de la maintenance :

II.6.1. Opérations de maintenance corrective :

Les interventions de maintenance corrective visent à rétablir le fonctionnement d'un système défaillant et se déclinent en trois catégories d'actions :

1. Localisation de la défaillance :

Cette première étape consiste à identifier précisément l'origine du problème. Elle comprend plusieurs opérations complémentaires, telles que :

Test : Évaluer le fonctionnement des composants pour vérifier leur conformité.

Détection et dépistage : Repérer rapidement la présence d'anomalies et cibler la zone où la défaillance s'est produite.

Diagnostic : Analyser en détail les symptômes pour déterminer la cause fondamentale de la panne.

2. Remise en état :

Une fois la source de la défaillance identifiée, il est nécessaire d'intervenir pour restaurer le matériel ou le logiciel à un état de fonctionnement optimal. Cette phase comprend :

Dépannage : Identifier et éliminer les dysfonctionnements en apportant des solutions immédiates.

Réparation : Remplacer ou remettre en état les composants endommagés pour rétablir le fonctionnement du système.

Modification : Apporter des ajustements ou des améliorations au système, le cas échéant, afin de prévenir de futures défaillances.

3. Durabilité :

Pour garantir une meilleure longévité et performance du système, des actions visant à renforcer sa durabilité sont réalisées. Ces opérations incluent :

Rénovation : Remettre à neuf ou remplacer des éléments usés pour prolonger la durée de vie du système.

Reconstitution : Restaurer l'équipement à sa configuration initiale, assurant ainsi sa performance originelle.

Modernisation : Mettre à jour ou adapter le matériel et le logiciel aux nouvelles technologies pour améliorer la fiabilité et prévenir d'éventuels problèmes futurs.

II.6.2. Opérations de maintenance préventive :

Les actions de maintenance préventive visent à maintenir les équipements en bon état de fonctionnement et à anticiper les défaillances potentielles. Elles se déclinent en quatre grandes catégories :

1. Entretien :

Cette catégorie comprend des opérations destinées à maintenir la propreté et l'intégrité des surfaces des équipements. Parmi ces actions, on retrouve :

Nettoyage : élimination des saletés et débris accumulés.

Dépollution : suppression des contaminants ou agents polluants.

Retraitement de surface : opérations visant à restaurer ou améliorer la qualité de la surface.

2. Surveillance :

La surveillance permet de suivre l'état des équipements afin de détecter précocement toute anomalie. Elle inclut notamment :

Inspection : examen visuel ou instrumenté pour évaluer l'état des composants.

Contrôle : vérification systématique des paramètres de fonctionnement.

Visite : passage régulier sur site pour observer et relever l'état global de l'équipement.

3. Révision :

La révision consiste en des interventions plus approfondies qui visent à remettre l'équipement dans un état optimal. Elle se divise en deux niveaux :

Révision partielle : intervention limitée à certaines parties ou sous-systèmes de l'équipement.

Révision générale : remise à neuf complète de l'ensemble du système, incluant une vérification et une réparation de tous ses composants.

4. Préservation :

Ces actions ont pour objectif de conserver ou de restaurer la capacité opérationnelle des équipements sur le long terme. Elles comprennent :

Mise en conservation : procédures visant à protéger l'équipement lorsqu'il n'est pas en usage prolongé.

Mise en survie : actions permettant de maintenir l'équipement dans un état de fonctionnement minimal en attendant une utilisation future.

Mise en service : étapes de remise en état ou de reconditionnement pour redonner pleinement vie à l'équipement. [8]

II.7. Indicateurs de Suivi de Performance en Maintenance

Pour évaluer l'efficacité des actions de maintenance, plusieurs indicateurs sont couramment utilisés :

- **MTBF (Mean Time Between Failures)** : Temps moyen de bon fonctionnement entre deux pannes.

Concept : Le MTBF représente la durée moyenne pendant laquelle un équipement fonctionne correctement avant de rencontrer une défaillance. Il sert d'indicateur de la fiabilité de l'appareil.

Méthode de calcul : Pour déterminer le MTBF, on divise la durée totale de fonctionnement par le nombre de pannes enregistrées.

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

Interprétation : Un MTBF élevé indique une bonne fiabilité et moins de pannes. Il aide à anticiper la durée de vie de l'équipement et à planifier les interventions de maintenance préventive.

- **MTTR (Mean Time To Repair) :** Temps moyen de réparation.

Concept : Le MTTR indique le temps moyen qu'il faut pour réparer un équipement et le remettre en service après une panne. Il reflète l'efficacité du processus de réparation.

Méthode de calcul : Il est calculé en divisant le temps total consacré aux réparations par le nombre d'interventions effectuées.

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

Signification : Un MTTR faible témoigne de la rapidité et de l'efficacité des réparations, ce qui permet de minimiser les périodes d'inactivité.

- **Taux de disponibilité :** Proportion du temps où un équipement est opérationnel.

Concept : Cet indicateur mesure la proportion de temps pendant lequel un équipement est opérationnel par rapport à la période totale observée (fonctionnement + arrêts).

Méthode de calcul : Il se calcule en divisant le temps de fonctionnement effectif par la durée totale (temps de fonctionnement + temps d'arrêt) puis en multipliant par 100 pour obtenir un pourcentage.

Signification : Un taux élevé de disponibilité est le signe d'une bonne gestion de la maintenance, indiquant que l'équipement est souvent opérationnel.

- **Taux de panne :** Fréquence des défaillances sur une période donnée.

Concept : Cet indicateur évalue combien de fois un équipement subit une panne sur une période donnée (mensuelle, annuelle, etc.).

Méthode de calcul : Il s'exprime simplement par le nombre de pannes constatées sur la période choisie.

Signification : Un taux de pannes élevé peut être révélateur de problèmes de conception, d'usure ou d'une stratégie de maintenance insuffisante, signalant ainsi le besoin de révisions ou d'interventions ciblées.

- **OEE (Overall Equipment Effectiveness) :** Mesure globale intégrant la disponibilité, la performance et la qualité de la production.

Concept : L'OEE est un indicateur synthétique qui combine trois aspects essentiels de la performance : la disponibilité, la performance opérationnelle et la qualité de production.

Méthode de calcul : Il est obtenu en multipliant les pourcentages de disponibilité, de performance et de qualité :

$$\text{OEE} = \text{Disponibilité} \times \text{Performance} \times \text{Qualité}$$

Signification : L'OEE offre une vision globale de l'efficacité de l'équipement. Une valeur proche de 100 % signifierait un fonctionnement parfait sans perte, ce qui est rarement le cas en pratique. Cet indicateur permet d'identifier précisément les sources de perte et d'orienter les efforts d'amélioration. [9]

II.8. Analyse fonctionnelle :

L'analyse fonctionnelle est une approche méthodologique essentielle dans le domaine de l'ingénierie de la maintenance. Elle permet de comprendre en détail les fonctions d'une machine afin d'optimiser son temps de bon fonctionnement. Cette démarche repose sur plusieurs étapes clés :

1. Recensement des fonctions

La première étape consiste à identifier l'ensemble des fonctions que remplit la machine. Ces fonctions peuvent être classées en :

- **Fonctions principales** : celles qui répondent directement au besoin pour lequel la machine a été conçue.
- **Fonctions secondaires** : celles qui facilitent, améliorent ou sécurisent le fonctionnement de la machine.

Par exemple, pour une machine de production industrielle, la fonction principale pourrait être "transformer une matière première en produit fini", tandis que des fonctions secondaires incluraient "assurer la sécurité de l'opérateur" ou "minimiser les vibrations".

2. Ordonnement des fonctions

Une fois les fonctions recensées, il est nécessaire de les classer en fonction de leur rôle et de leur interdépendance. Une modélisation sous forme de diagramme fonctionnel peut être utile pour représenter visuellement ces relations.

3. Caractérisation des fonctions

Chaque fonction doit être définie à l'aide de critères d'appréciation précis. Ces critères permettent d'évaluer la performance de la machine en fonction des besoins. Parmi ces critères, on retrouve :

- La fiabilité
- La disponibilité
- La rapidité d'exécution
- La consommation énergétique

Ces critères aident à mesurer l'efficacité de la machine et à cibler les axes d'amélioration.

4. Hiérarchisation des fonctions

Toutes les fonctions n'ont pas la même importance. Il est donc nécessaire d'attribuer un niveau de priorité à chaque fonction en fonction de son impact sur le bon fonctionnement de la machine. Par exemple, une fonction critique pour la sécurité sera priorisée par rapport à une fonction de confort.

5. Valorisation des fonctions

Enfin, chaque fonction est affectée d'une valeur en fonction de son importance relative. Cette valorisation permet d'orienter les efforts d'optimisation vers les éléments ayant le plus d'impact sur la performance globale de la machine.

6. Application à l'optimisation du temps de bon fonctionnement

En appliquant cette démarche, il est possible d'identifier les fonctions qui influencent directement la disponibilité et la fiabilité de la machine. Une analyse approfondie permet ensuite de mettre en place des stratégies d'amélioration ciblées, telles que l'optimisation de la maintenance préventive, la réduction des temps d'arrêt ou l'amélioration de la robustesse des composants critiques.

Ainsi, l'analyse fonctionnelle constitue un outil essentiel pour maximiser l'efficacité des machines et garantir leur performance sur le long terme. [10]

II.9. La méthode APTE :

L'optimisation de la maintenance industrielle est un enjeu majeur pour garantir la fiabilité et la disponibilité des équipements. Dans ce contexte, l'analyse fonctionnelle joue un rôle primordial en identifiant et en hiérarchisant les fonctions critiques d'un système. La méthode APTE (Analyse Prévisionnelle ou Préliminaire des Tâches d'Entretien) se présente comme un outil stratégique qui traduit l'analyse fonctionnelle en actions concrètes pour la maintenance. Elle permet de planifier et de prioriser les tâches d'entretien afin de réduire les temps d'arrêt et d'augmenter le temps de bon fonctionnement des machines. [10]

II.9.1. Objectifs et principes de la méthode APTE

La méthode APTE vise à :

- **Recenser les tâches d'entretien** : Identifier l'ensemble des opérations nécessaires pour maintenir ou restaurer le fonctionnement optimal de l'équipement.
- **Relier ces tâches aux fonctions critiques** : En s'appuyant sur l'analyse fonctionnelle, il est possible de déterminer quelles tâches impactent directement les fonctions clés de la machine.
- **Hierarchiser les interventions** : En évaluant l'impact de chaque tâche sur la performance globale (sécurité, disponibilité, performance), on peut prioriser les actions de maintenance.
- **Planifier les actions préventives et correctives** : L'APTE permet de construire un planning de maintenance qui intègre à la fois les interventions régulières et celles anticipées en fonction de l'évolution de l'état de l'équipement. [11]

II.9.2. Description et démarche méthodologique

La mise en œuvre de la méthode APTE peut se décliner en plusieurs étapes :

a. Identification des tâches d'entretien

- **Recensement** : À partir de l'analyse fonctionnelle, l'ensemble des fonctions de l'équipement est passé en revue afin de définir les tâches qui pourraient compromettre leur performance.
- **Classification** : Les tâches sont ensuite classées selon qu'elles concernent des fonctions critiques (affectant directement la production ou la sécurité) ou secondaires (confort, environnement de travail).

b. Analyse et priorisation

- **Critères d'évaluation** : Chaque tâche est évaluée selon des critères précis tels que l'impact sur la sécurité, la fréquence d'intervention, le coût et le risque associé.
- **Hierarchisation** : L'outil de l'APTE permet de prioriser les interventions en fonction de leur criticité, orientant ainsi les ressources vers les tâches à fort impact sur le bon fonctionnement de l'équipement.

c. Planification et suivi

- **Élaboration d'un plan de maintenance** : Une fois les tâches identifiées et classées, un calendrier de maintenance est élaboré, intégrant à la fois la maintenance préventive et, le cas échéant, corrective.
- **Suivi et réajustement** : La méthode intègre une dimension dynamique où les indicateurs de performance (taux de disponibilité, nombre d'incidents, etc.) permettent de réajuster la planification en continu.

II.9.3. Applications pratiques et enjeux

La méthode APTE est particulièrement utile dans des environnements industriels complexes où la diversité des tâches d'entretien nécessite une priorisation fine. Par son approche analytique, elle permet de :

- Optimiser l'allocation des ressources de maintenance.
- Réduire les temps d'arrêt imprévus en anticipant les défaillances.
- Améliorer la sécurité en identifiant les tâches ayant un impact direct sur la protection des opérateurs.
- Contribuer à une meilleure gestion des coûts en ciblant les interventions à forte valeur ajoutée.

II.9.4. Limites et perspectives

Comme toute méthode, l'APTE présente certaines limites :

- **Complexité de mise en œuvre** : Dans certains contextes, la collecte de données précises et la définition des critères d'évaluation peuvent représenter un défi.
- **Adaptabilité** : La méthode doit être adaptée aux spécificités de chaque industrie et aux évolutions technologiques des équipements.
- **Dépendance à la qualité de l'analyse fonctionnelle** : L'efficacité de l'APTE repose en grande partie sur la qualité de l'analyse initiale des fonctions.

Les perspectives d'évolution incluent l'intégration de technologies de l'IoT et de l'analyse de données pour améliorer la détection précoce des anomalies et affiner la planification des tâches de maintenance. [11]

II.10. Notion de la défaillance :

II.10.1. Définition de la Défaillance :

La **défaillance** est l'incapacité d'un équipement, d'un composant ou d'un système à accomplir la fonction pour laquelle il a été conçu, conformément aux spécifications d'origine. Elle peut être progressive (dégradation des performances) ou brutale (panne soudaine). [12]

II.10.2. La panne :

Etat d'un bien inapte à accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures. Le système de production passe de l'état de disponibilité à l'état de panne lorsqu'une défaillance survient. Une maintenance du système sera alors nécessaire pour repasser de l'état de panne à l'état opérationnel. La défaillance est la conséquence d'un défaut, dont la cause est une faute.



II.10.3. Matériel réparable :

Le matériel réparable désigne les équipements qui, après avoir subi une défaillance, peuvent être remis en état et reprendre leur fonctionnement. La durée de vie d'un tel équipement est souvent représenté par un chronogramme illustrant les différentes phases de fonctionnement et d'arrêt

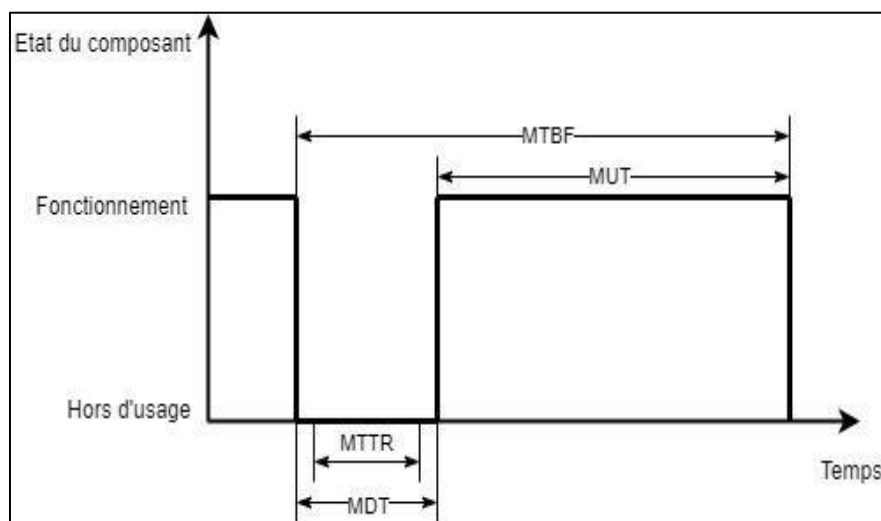


Figure II.3 : Chronogramme illustrant les différentes phases de vie d'un équipement réparable

Ce schéma intègre plusieurs indicateurs clés, notamment :

- **MDT (Mean Down Time)** : Moyenne des temps de panne.
- **MTBF (Mean Time Between Failure)** : le temps moyen de fonctionnement entre deux pannes consécutives.
- **MTTR (Mean Time To Repair)** : le temps moyen nécessaire pour effectuer la réparation et rétablir le fonctionnement de l'équipement.
- **MUT (Mean Up Time)** : le temps moyen pendant lequel l'équipement est opérationnel et en service.

Ces indicateurs permettent d'analyser la performance globale de l'équipement en termes de disponibilité et de facilité de remise en état après une panne.

II.10.4. Matériel irréparable (non réparable) :

À l'inverse, le matériel irréparable se caractérise par l'impossibilité de le remettre en fonctionnement une fois qu'une défaillance survient. Le cycle de vie de ce type d'équipement est généralement représenté par un chronogramme simplifié, qui ne comporte qu'un seul indicateur :

- **MTTF (Mean Time To Failure)** : Moyenne des temps jusqu'à la panne

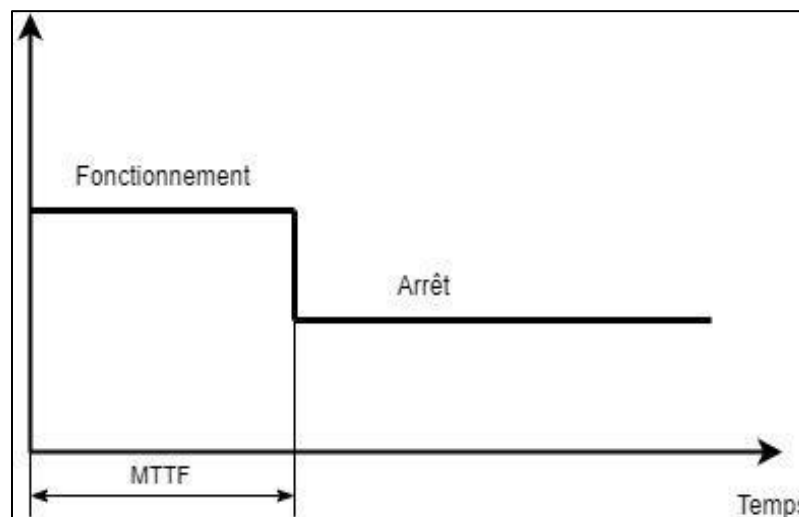


Figure II.4 : Chronogramme illustrant les différentes phases de vie d'un équipement irréparable

II.10.5. Types de Défaillances :

Les défaillances ont des causes, des manifestations et des conséquences très diverses. Aussi, pour mieux les connaître et pouvoir efficacement intervenir, il est nécessaire de distinguer plusieurs catégories.

a. Selon leur cause :

- **Défaillances d'origine intrinsèque** : Ces défaillances résultent d'une conception inadaptée, d'un défaut de fabrication ou d'une installation incorrecte. Elles incluent également les défaillances liées à l'usure, qui dépendent de la durée d'utilisation du bien, ainsi que celles dues au vieillissement, causées par le passage du temps.

Exemples : Un défaut dans la qualité du matériau, un problème de dimensionnement, une erreur d'assemblage ou encore le grippage d'un roulement à billes.

- **Défaillances d'origine extrinsèque** : Elles sont provoquées par une utilisation inappropriée ou un entretien insuffisant. Ce type de défaillance peut être évité grâce à la formation du personnel en charge de l'exploitation et de la maintenance, ainsi qu'à la mise en place de procédures détaillées et rigoureuses.

b. Selon leur degré d'importance :

Les défaillances peuvent être classées en fonction de leur impact sur le fonctionnement du système :

- **Défaillance partielle** : Cette défaillance se manifeste par une altération des caractéristiques du système dépassant les tolérances définies, sans pour autant entraîner l'arrêt total de la fonction concernée.

- **Défaillance complète** : Elle correspond à une altération des caractéristiques du système dépassant les seuils admissibles, entraînant ainsi l'incapacité totale du dispositif à assurer sa fonction.

- **Défaillance intermittente** : Il s'agit d'une perte temporaire de la fonctionnalité d'un dispositif, qui retrouve ensuite son état de fonctionnement normal sans intervention

extérieure.

Exemple : Une connexion électrique défaillante qui provoque un fonctionnement aléatoire.

c. Selon leur vitesse d'apparition :

Les défaillances peuvent être différenciées selon la rapidité avec laquelle elles surviennent

- **Défaillance progressive** : Elle résulte d'une détérioration graduelle des caractéristiques du bien, pouvant entraîner une perte de performance avant l'apparition d'une panne.

- **Défaillance soudaine** : Elle se manifeste de manière brutale, sans signe avant-coureur, à la suite d'une modification instantanée des caractéristiques du bien.

d. Par combinaison des critères précédents :

Il est également possible de combiner plusieurs notions pour affiner la classification des défaillances :

- **Défaillance catalectique** : Défaillance soudaine et complète, rendant le bien immédiatement inutilisable.

Exemple : La rupture instantanée d'un composant électronique sous contrainte excessive.

- **Défaillance par dégradation** : Défaillance progressive entraînant une perte partielle des performances du bien.

Exemple : La corrosion progressive d'une pièce métallique ou l'usure d'un élément soumis à des frottements répétés.

e. Selon les conséquences :

Les défaillances peuvent être catégorisées en fonction de leur impact sur le fonctionnement global du système :

- **Défaillance critique** : Engendre des conséquences majeures pouvant perturber l'ensemble du processus industriel.

Exemple : Détérioration d'un four de moulage, entraînant l'arrêt de la production.

- **Défaillance majeure** : Affecte un élément essentiel, mais sans stopper immédiatement l'ensemble du système.

Exemple : Dysfonctionnement d'un système de supervision d'un four de moulage.

- **Défaillance mineure** : Impact limité, avec peu ou pas de répercussions sur le fonctionnement global.

Exemple : Panne du système de refroidissement en sortie de four. [12]

II.10.6. Les modes de défaillance :

Un mode de défaillance est la façon par laquelle est constatée l'incapacité d'un bien à remplir une fonction requise. C'est donc le processus qui, à partir d'une cause intérieure ou extérieure au bien, entraîne la défaillance du bien considéré.

Le mode de défaillance est relatif à une fonction. De façon très générale, un mode de défaillance à un des 4 effets suivants sur un système :

1.Perte totale de la fonction : La fonction s'interrompt complètement et ne peut plus être assurée.

2.Absence de fonction : Lorsqu'elle est sollicitée, la fonction ne s'exécute pas.

3.Fonction dégradée : La fonction est réalisée de manière imparfaite, avec une diminution des performances.

4.Fonction intempestive : La fonction s'active de manière inappropriée, sans avoir été sollicitée. [12]

Exemples de modes de défaillance :

- **Mécanique** : abrasion, cisaillement, corrosion, déformation permanente, écaillage, fatigue, grippage, etc.

- **Electrotechnique** : arc, claquage, collage, fuite, fusion, usure, rupture, etc.
- **Electromagnétisme** : aimantation, effet joule, électricité statique, etc.
- **Hydraulique** : cavitation, coup de bélier, onde de choc, turbulence, etc.
- **Thermodynamique** : choc thermique, dilatation, rayonnement thermique, etc.

II.11. Généralités sur la fiabilité, la maintenabilité et disponibilité :

Dans le domaine industriel, assurer le bon fonctionnement des équipements est essentiel pour garantir une production efficace et réduire les coûts liés aux pannes et aux interruptions d'activité. La performance des machines est principalement évaluée à travers trois paramètres clés : la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité. Ces concepts permettent d'analyser les performances des systèmes, d'anticiper les défaillances et d'optimiser les stratégies de maintenance.

II.11.1. La fiabilité :

La fiabilité est la capacité d'un équipement à fonctionner sans défaillance pendant une période donnée et dans des conditions d'utilisation définies. Elle est exprimée sous forme de probabilité et repose sur plusieurs paramètres statistiques.

II.11.1.1. Types de fiabilité :

- **Fiabilité intrinsèque** : Caractéristique propre à l'équipement, indépendante des conditions d'utilisation.
- **Fiabilité extrinsèque** : Influencée par les conditions d'exploitation et la qualité de la maintenance.
- **Fiabilité implicite** : Basée sur l'expérience et visant à réduire la fréquence et la durée des pannes.
- **Fiabilité explicite** : Modélisée mathématiquement pour déterminer avec précision la probabilité de bon fonctionnement. [14]

II.11.1.2. Objectifs de la fiabilité :

La fiabilité a pour objectif de :

- . Mesurer une garantie dans le temps.
- . Déchiffrer une durée de vie.
- . Evaluer avec précision un temps de fonctionnement.
- . Déterminer la stratégie de l'entretien.
- . Choisir le stock.

II.11.1.3. Paramètres de mesure de la fiabilité :

a. Densité de probabilité : Probabilité qu'une défaillance survienne à un instant précis

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

b. Fonction de répartition : Probabilité qu'une défaillance se produise avant un instant donné.

$$F(t) = P(T < t)$$

Notons que ces deux fonctions sont complémentaires :

$$F(t) + R(t) = 1$$

c. Fonction de fiabilité : Nous appelons $R(t)$ la fonction de fiabilité, qui représente la probabilité de fonctionnement sans défaillances pendant un temps (t) , ou la probabilité de survie jusqu'à un temps (t) . La probabilité d'avoir au moins une défaillance avant le temps (t) , qui représente la probabilité cumulative des défaillances, est appelé : « probabilité de défaillance »

d. Le taux de défaillance : Paramètres de fiabilité $\lambda(t)$ d'une entité (composant individuel ou systèmes) tel que $\lambda(t)dt$ est la probabilité de défaillance de cette entité au cours de $[t, t+dt]$ à condition qu'elle ne soit pas tombée en panne au cours de $[0, t]$

Mathématiquement, $\lambda(t)$ est la probabilité conditionnelle de défaillance par unité de temps sur $[t, t+dt]$. il est possible de démontrer que le taux de défaillance instantané est :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

En utilisant l'équation :

$$\lambda(t)dt = \frac{F(t+dt) - F(t)}{R(t)} = \frac{dF(t)}{1 - F(t)}$$

$\lambda(t)$ s'exprime également par l'inverse d'un temps, mais n'est pas une densité de probabilité. L'expérience montre que pour la plupart des composants, le taux de défaillance suit une courbe en baignoire représenté sur la figure suivante :

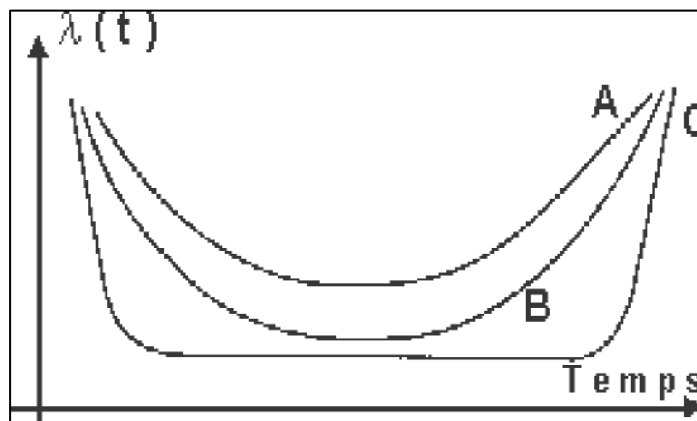


Figure II.5 : Courbe du taux de défaillance

Les courbes du taux de défaillance, dans la figure précédente ont une même forme générale dite en baignoire, mais présentent néanmoins des différences suivant la technologie principale du système étudié :

- A. en mécanique.
- B. en électromécanique.
- C. en électronique.

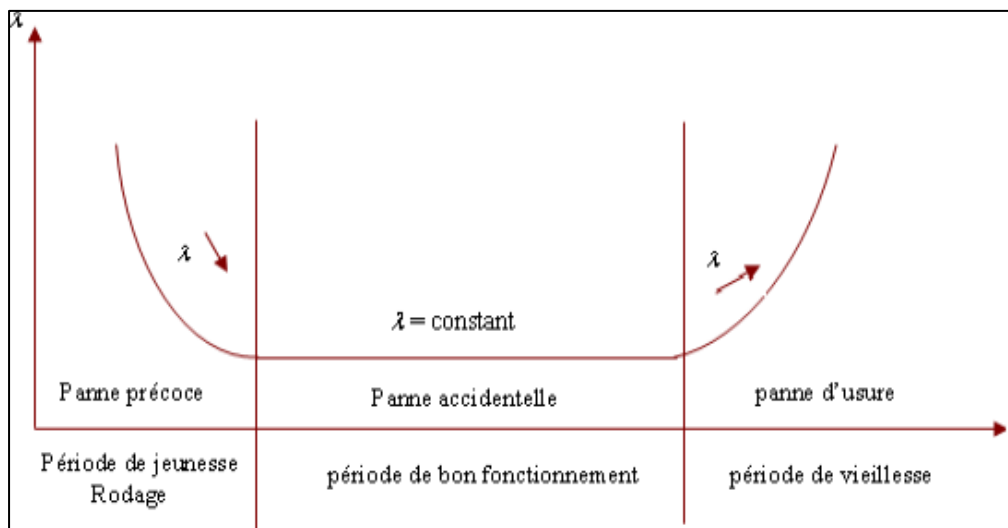


Figure II.6 : La courbe en baignoire

1.La période de jeunesse ou de rodage : Cette période correspond à l'apparition de défaillance due à des défauts de fabrication ou à des contrôles insuffisants.

Les essais de rodage des dispositifs ont pour but d'éliminer cette période.

Les défaillances qui surviennent en ce début de vie sont par dégradation. On les qualifie comme des défaillances précoces

2. La période de bon fonctionnement (maturité) : En général, la seconde période correspond à l'apparition des défaillances aléatoires, qui surviennent sans cause systématique et de manière imprévisible, avec un taux d'occurrence relativement constant. Ce phénomène est observé aussi bien pour des équipements complexes que pour des composants électroniques. Plusieurs explications sont avancées pour justifier ce taux constant, souvent attribué à un ensemble de facteurs liés à la fabrication des dispositifs.

En simplifiant, on peut considérer que ces défaillances résultent d'un grand nombre de causes indépendantes, propres aux processus de production.

3.La période de vieillissement : La dernière période correspond à l'usure du dispositif. Pour les pièces mécaniques, il s'agit d'une usure au sens strict, tandis que pour les dispositifs électroniques, elle résulte d'une évolution physico-chimique.

Cette phase est marquée par une dégradation irréversible des caractéristiques, généralement davantage liée à la conception du produit qu'à son processus de fabrication. Les défaillances survenant durant cette période sont qualifiées de défaillances par dégradation, communément appelées défaillances d'usure. [14]

II.11.1.4. Loi de Weibull :

La loi de Weibull est une loi de probabilité continue très utilisée dans l'analyse de la fiabilité et l'étude de la durée de vie des équipements. Elle permet de modéliser le temps jusqu'à la survenue d'un événement (comme une défaillance) en intégrant la variabilité des modes de défaillance. La loi est caractérisée par trois paramètres :

- **Le paramètre de forme (β)**, qui détermine l'évolution du taux de défaillance dans le temps. Pour $\beta < 1$, le taux diminue avec le temps (phase de "jeunesse" ou de burn-in), pour $\beta = 1$, il est constant (cas de la loi exponentielle) et pour $\beta > 1$, il augmente, indiquant une phase d'usure progressive.
- **Le paramètre d'échelle (η)**, qui représente la durée caractéristique de vie du composant ou système. Il fixe l'échelle temporelle à laquelle les défaillances deviennent significatives.
- **Le paramètre de position (γ)**, qui détermine le point de départ effectif de l'analyse du temps jusqu'à la défaillance. Dans de nombreuses applications, ce paramètre est nul, mais il peut être utilisé pour modéliser un décalage temporel initial.

II.11.2. Caractéristiques de la loi de Weibull :

La densité de probabilité : Elle caractérise la probabilité de panne juste à temps.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t-\gamma}{\eta} \right]^{\beta-1} e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta} \right]^\beta}$$

La fonction de répartition : Elle représente la probabilité de pannes cumulée de défaillance entre (0) et (t).

$$F(t) = 1 - e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta} \right]^\beta}$$

La fonction de fiabilité : C'est la probabilité cumulée de non – défaillance au-delà du temps.

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^\beta}$$

Le taux de défaillance :

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

Remarque : si ($\beta=1, \gamma=0$)

$$\lambda(t) = \frac{1}{\eta} = \frac{1}{MTBF}$$

La courbe théorique de distribution est montrée à la figure. On peut remarquer l'influence du paramètre β (coefficient de forme).

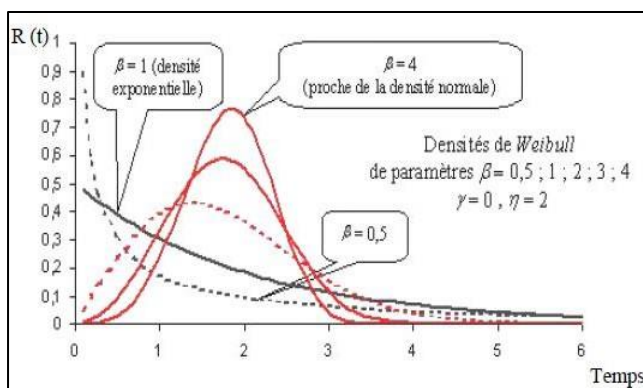


Figure II.7 : Courbe théorique de distribution de fiabilité

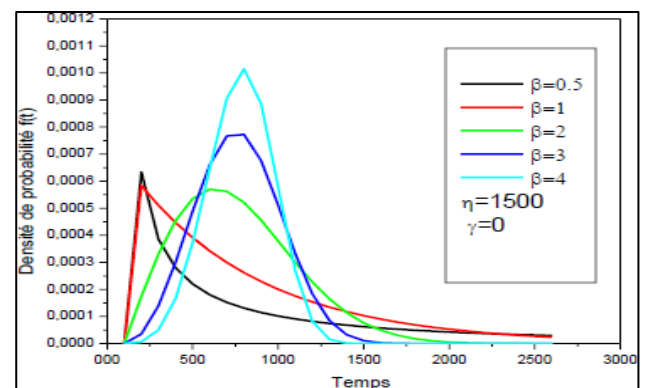


Figure II.8 : Courbe théorique de Weibull

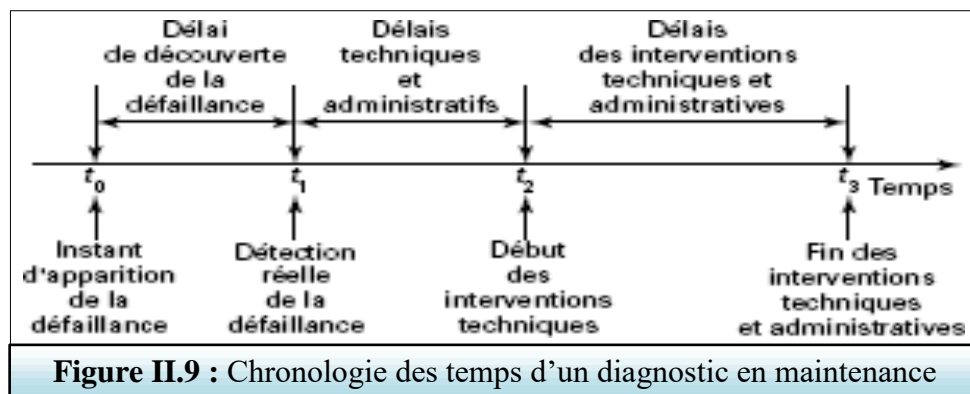
Si l'on désigne par t la variable aléatoire qui, à tout matériel choisi au hasard, associe son temps de bon fonctionnement avant défaillance, lorsque β est constant, on montre que t suit une loi exponentielle. Pour couvrir tous les cas, Weibull a choisi pour λ une fonction dépendant de trois paramètres : γ , β et η . L'expression de $\lambda(t)$ est donnée par la formule précédente

Avec $t > \gamma$, $\beta > 0$, $\eta > 0$ (le paramètre important étant β paramètre "de forme", les autres terminent l'ajustement). Ainsi, lorsque la variable aléatoire t , correspondant au temps de bon fonctionnement, suit la loi de Weibull de paramètres γ , β et η . On montre que sa densité est donnée par l'expression précédente. [14,15]

II.11.3. La Maintenabilité :

Les défaillances, par leur nature imprévisible, surviennent sans avertissement, ce qui rend essentiel pour tout responsable d'une installation industrielle de réagir rapidement afin de limiter les conséquences.

Pour bien comprendre les enjeux de la maintenabilité, il est important de concevoir un diagramme chronologique qui illustre les différentes étapes entre le moment où la défaillance se produit et celui où l'installation est pleinement opérationnelle à nouveau. Ce diagramme aide à visualiser les délais nécessaires pour détecter la défaillance, diagnostiquer le problème, effectuer les réparations, valider le bon fonctionnement de l'équipement et finalement remettre l'installation en service. Le diagramme de la figure résume tous les instants importants de cette chronologie.



II.11.3.1. Définition de la maintenabilité :

La maintenabilité désigne la capacité d'un bien à être restauré ou maintenu dans un état qui lui permet de remplir la fonction pour laquelle il a été conçu, lorsque la maintenance est effectuée dans des conditions spécifiques, en utilisant des méthodes et des moyens définis.

En d'autres termes, la maintenabilité correspond à la possibilité de remettre rapidement un système en état de fonctionnement. C'est aussi la probabilité de restaurer un système dans

les conditions de performance requises et dans un délai donné, à condition que la maintenance soit réalisée selon des procédures et moyens précis.

À partir de ces concepts, on distingue trois types de maintenabilité :

- **La maintenabilité intrinsèque** : Elle résulte de la conception même du produit, dès la phase de développement, en se basant sur un cahier des charges intégrant des critères de maintenabilité tels que la modularité et l'accessibilité.
- **La maintenabilité prévisionnelle** : Elle est également « planifiée » dès le départ, mais elle se base sur les objectifs de disponibilité du système.
- **La maintenabilité opérationnelle** : Elle est évaluée à partir des données historiques des interventions de maintenance. L'analyse de la maintenabilité permet ainsi d'estimer des indicateurs tels que le **MTTR** (Mean Time To Repair) et les lois probabilistes associées à la maintenabilité, sur des modèles similaires à ceux utilisés pour la fiabilité.

La maintenabilité d'un équipement dépend en grande partie de la facilité avec laquelle ses composants peuvent être démontés et remplacés, ainsi que de leur interchangeabilité. [14]

II.11.3.2. Caractéristiques de la maintenabilité :

II.11.3.2.1. La fonction de maintenabilité : est un critère crucial lors de la phase de conception d'un système ou d'un équipement, car elle influence directement la disponibilité et les coûts liés à la maintenance. En améliorant la maintenabilité, on minimise le temps d'arrêt et on optimise la performance opérationnelle du système.

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

Ou :

M (t) : fonction de maintenabilité est constant ;

μ : taux de réparation.

II.11.3.2.2. La moyenne des temps techniques de réparation (MTTR) :

$$MTTR = \frac{\text{Temps cumulé pour réparation}}{\text{Nombre d'intervention}}$$

II.11.3.2.3. Le taux de réparation : On appelle taux de réparation μ (t) d'un système réparable au temps t la probabilité que l'entité soit réparée entre t et t+dt sachant qu'elle n'était pas réparée sur l'intervalle [0, t]

$$\mu = \frac{1}{MTTR}$$

II.11.4. La disponibilité :

La norme AFNOR X 60-500 définit la disponibilité comme l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires de maintenance soit assurée.

II.11.4.1. Les différentes sortes de disponibilité :

II.11.4.1.1 Disponibilité intrinsèque : Cette disponibilité est évaluée en prenant en compte les moyennes des temps de bon fonctionnement et les moyennes des temps de réparation.

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

Ou :

D : Disponibilité intrinsèque ;

MTBF: Moyenne de temps de bon fonctionnement ;

MTTR : Moyenne de temps technique de réparation.

II.11.4.1.2 Disponibilité instantanée : C'est la probabilité pour qu'un dispositif puisse accomplir une fonction requise dans des conditions données et un instant donné.

$$D = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} * e^{-t(\mu + \lambda)}$$

Ou :

D : La disponibilité instantanée ;

II.11.4.2. Amélioration de la disponibilité :

- L'allongement de la MTBF (action sur la fiabilité) ;

- La réduction de la MTTR (action sur la maintenabilité) ;
- Fiabilité ;
- Maintenabilité ;
- Logistique.

II.11.4.3. La relation entre les notions FMD :

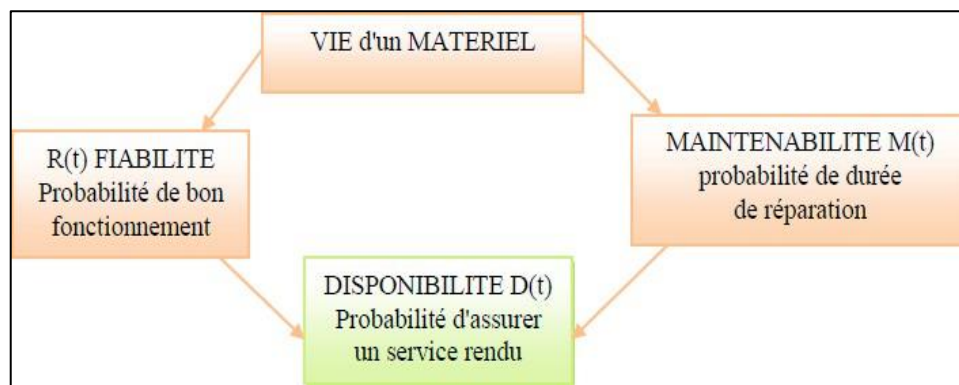
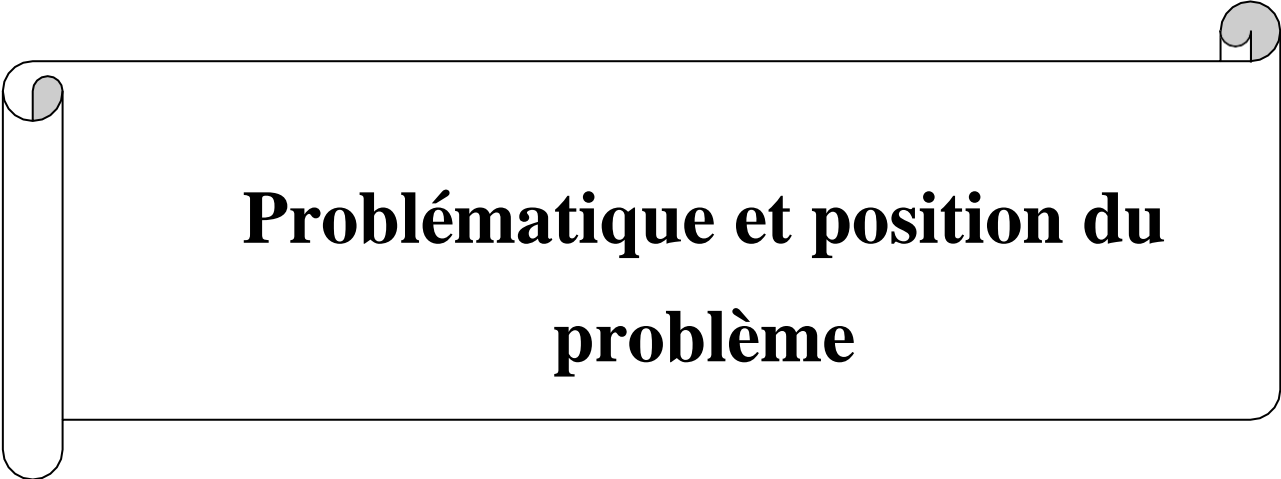


Figure II.10 : La relation entre les notions FMD

Pour qu'un matériel soit disponible il faut s'assurer que sa fiabilité est optimum et qu'il est aussi maintenable. [14]



Problématique et position du problème

Problématique et position du problème

La performance des équipements de production est un enjeu stratégique pour assurer une production continue et maîtriser les coûts d'exploitation. Le bon fonctionnement des machines, souvent évalué à travers leur disponibilité, impacte directement la productivité et la rentabilité des entreprises. Cependant, plusieurs facteurs agissent négativement sur cette dernière. L'usure des composants, les pannes imprévues, des stratégies de maintenance peu ou mal adaptées ainsi que des arrêts prolongés, entraînent inmanquablement des pertes financières significatives.

Malgré les progrès réalisés en matière de maintenance préventive et conditionnelle, de nombreuses entreprises rencontrent encore des difficultés à anticiper avec précision les défaillances et à adopter une approche de maintenance efficace. Il est souvent compliqué de trouver un équilibre optimal entre la fiabilité des équipements et la gestion des coûts d'intervention.

Dans ce contexte, il devient essentiel d'explorer des solutions innovantes pour améliorer le temps de bon fonctionnement des équipements industriels. L'intégration des nouvelles technologies, telles que la maintenance prédictive basée sur l'intelligence artificielle et l'Internet des objets (IoT), ainsi que l'optimisation des stratégies de maintenance, pourrait offrir une réponse efficace à ces défis.

Dès lors, la question centrale de ce mémoire est la suivante : **comment optimiser ou améliorer le temps de bon fonctionnement d'une machine en mettant en place une stratégie de maintenance efficace ?** Quels leviers technologiques, organisationnels et méthodologiques peuvent être mobilisés pour minimiser les temps d'arrêt, accroître la fiabilité des équipements et réduire les coûts de maintenance ?

Dans notre démarche, nous avons choisi d'analyser les principaux paramètres qui influencent directement le temps de bon fonctionnement (TBF) d'un équipement. Pour cela, une recherche bibliographique a été menée, permettant de retracer les avancées et les approches proposées par différents auteurs sur le sujet.

Cette étude nous a permis de constater que les travaux existants portent majoritairement sur l'amélioration de la fiabilité, l'optimisation de la disponibilité et le choix des méthodes de maintenance à appliquer avec un intérêt croissant pour la maintenance prédictive.

Dans ce contexte, l'optimisation du TBF se révèle être un indicateur central, car elle reflète à la fois une réduction significative du taux de défaillance et une amélioration notable de la fiabilité des équipements.

Le présent mémoire s'articulera autour de quatre chapitres. Le premier proposera une présentation succincte de l'entreprise d'accueil. Le second exposera les généralités sur la maintenance, enrichies par notre revue bibliographique. Le troisième chapitre sera dédié à l'étude de l'équipement analysé, en l'occurrence la fraiseuse PMO 1.5, avec une application de la méthode de Weibull pour déterminer les indicateurs de maintenance. Enfin, le dernier chapitre proposera une démarche visant à optimiser le TBF, à travers une sélection d'actions concrètes destinées à améliorer la fiabilité et à minimiser les défaillances.

Recherche bibliographique

1.Modèles et Théories de Maintenance :

Maintenance Préventive et Predictive :

Moubray (1997), dans son ouvrage *Reliability-Centered Maintenance*, souligne l'importance d'une approche axée sur la fiabilité. Il met en avant que l'application de la maintenance préventive, à travers des inspections régulières et des interventions planifiées, contribue à limiter les pannes imprévues.

De son côté, **Mobley (2002)**, dans *Maintenance Engineering*, explique que la maintenance prédictive repose sur des outils analytiques permettant de surveiller l'état des équipements et d'anticiper les défaillances avant qu'elles ne surviennent.

Maintenance Proactive :

La maintenance proactive, telle que présentée par **Smith et Hawkins (2004)** dans *Lean Maintenance*, se concentre sur l'atténuation des facteurs pouvant causer des défaillances plutôt que d'attendre leur survenue. Selon ce modèle, une analyse détaillée des défaillances antérieures permet d'améliorer la conception des systèmes, réduisant ainsi les périodes d'arrêt futures.

2.Technologies Contemporaines :

L'avancement des technologies, notamment l'Internet des Objets (IoT) et l'analyse des données, offre de nouvelles opportunités pour surveiller en temps réel l'état des machines. Les études montrent que l'utilisation de capteurs pour collecter des données peut améliorer considérablement la capacité à prévoir les pannes (**Nakamura, 2016**).

Kumar et al. (2018) discutent dans leur étude sur l'analyse des données que l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage automatique peut prédire avec précision les pannes imminentes des machines. Les systèmes d'aide à la décision basés sur ces analyses permettent aux managers de planifier les interventions de manière optimale, maximisant ainsi le TBF.

3.Culture de la Maintenance :

Il a été démontré que l'engagement de l'ensemble du personnel dans une culture de maintenance proactive influe directement sur le TBF. Les travaux de **Chiaramonti (2018)** révèlent que la formation régulière et la sensibilisation aux pratiques de maintenance favorisent une meilleure performance des machines.

Dans leur étude sur le Lean Management, **Hines et al. (2004)** soulignent la nécessité d'instaurer une culture basée sur le partage des responsabilités. Ils affirment que la collaboration des équipes est essentielle pour détecter les problèmes de maintenance et proposer des solutions, ce qui permet d'accroître la réactivité et de réduire les temps d'arrêt.

Cas Pratiques et Études de Cas :

Une étude de cas sur une usine automobile par **Taj et al. (2015)** a démontré que l'application de la maintenance centrée sur la fiabilité permettait de réduire les temps d'arrêt de 30 %. Les entreprises observées ont mis en œuvre des routines de maintenance planifiées en fonction des données de performance des machines, ce qui a permis d'optimiser le TBF.

John Moubray (1991, Reliability-Centered Maintenance)

"La maintenance centrée sur la fiabilité consiste à adapter les interventions aux modes de défaillance spécifiques, permettant ainsi de maximiser le temps de bon fonctionnement des équipements."

B. S. Blanchard (2003, *Systems Engineering and Analysis*)

"La fiabilité d'un système est directement liée à la qualité de sa maintenance, et une amélioration continue de la maintenabilité est indispensable pour assurer une performance durable."

R. Keith Mobley (2002, *An Introduction to Predictive Maintenance*)

"La maintenance prédictive permet d'intervenir avant la survenue d'une défaillance, transformant ainsi la maintenance en une stratégie proactive visant à maximiser le TBF."

André Birgé (2007, *Maintenance Industrielle : Stratégies et Méthodes*)

"Optimiser le temps entre les défaillances nécessite une analyse approfondie des causes de panne et une adaptation dynamique des stratégies de maintenance aux besoins réels de l'équipement."

Patrick O'Connor (Practical Reliability Engineering)

« La fiabilité et la maintenabilité ne sont pas des réflexions après coup. Elles doivent être intégrées dès la conception pour garantir une performance optimale tout au long du cycle de vie des équipements. »

Ramesh Gulati (Expert en Excellence Opérationnelle)

« La quête de l'excellence en maintenance repose sur l'intégration d'une culture proactive, la digitalisation des processus et une formation continue des équipes, éléments essentiels pour optimiser le TBF. »

Stéphane Monnet (Recherche sur la Maintenance Prédictive dans l'Industrie 4.0)

« L'industrie 4.0 offre une opportunité unique pour réinventer la maintenance à travers l'analyse prédictive et la connectivité des machines, garantissant une amélioration significative du TBF. »

B. Ramani et A. Kumar (Étude sur la Gestion Intégrée de la Maintenance)

« L'intégration des technologies numériques dans la gestion de la maintenance transforme les données en actions concrètes, améliorant ainsi la fiabilité et le TBF. »

Angelo Birolini (2004, *Reliability Engineering: Theory and Practice*)

« La fiabilité ne se résume pas à la prévention des défaillances ; elle inclut également la rapidité et l'efficacité des interventions de maintenance, qui définissent le véritable temps de bon fonctionnement. »

John Moubray (1991, *Reliability-Centered Maintenance*)

« La minimisation des temps d'arrêt est au cœur de la maintenance centrée sur la fiabilité. En intervenant précisément sur les points critiques, on limite les interruptions imprévues et on augmente directement le TBF, garantissant ainsi une meilleure performance globale des équipements. »

B. S. Blanchard (2003, *Systems Engineering and Analysis*)

« La capacité à réduire efficacement les temps d'arrêt par une gestion intégrée de la maintenance est le levier principal pour optimiser le TBF. Une stratégie proactive et bien coordonnée permet d'assurer une continuité opérationnelle essentielle pour la performance des systèmes. »

Angelo Birolini (2004, *Reliability Engineering: Theory and Practice*)

« Optimiser le TBF passe par une stratégie rigoureuse de réduction des temps d'arrêt, qu'ils soient planifiés ou imprévus. En améliorant la rapidité et l'efficacité des interventions de maintenance, on renforce la fiabilité des systèmes et on assure une production continue. »

Jean-Claude Garreau (2005, *Maintenance Industrielle : Concepts et Pratiques*)

« Une gestion efficace de la maintenance, axée sur la réduction des temps d'arrêt, est indispensable pour maximiser le TBF. Une intervention rapide et une analyse fine des causes de panne permettent de transformer les arrêts en simples interruptions gérables, assurant ainsi une haute disponibilité. »

Henri Fayol - Théoricien en management :

« Un bon management des ressources humaines favorise une culture qui valorise l'entretien préventif et contribue à l'optimisation du temps de fonctionnement. »

Martin J. F. Hedges - Consultant en ingénierie de la maintenance :

« Une approche systématique de la gestion de la maintenance et des performances des machines est essentielle pour atteindre un temps de fonctionnement optimal. »

Daniel T. Sampson - Auteur de "Asset Management" :

« Le véritable potentiel d'une machine réside dans sa capacité à fonctionner sans interruption ; ainsi, l'optimisation du TBF doit être une priorité. »

Tetsuya Nakamura - Expert en TPM (Total Productive Maintenance) :

« L'engagement de chacun dans l'entretien des équipements contribue à la maximisation du temps de fonctionnement et à la réduction des pertes. »

James W. Wright - Expert en performance des équipements :

« Maximiser le temps de fonctionnement signifie non seulement minimiser les pannes, mais aussi optimiser la planification et l'exécution de la maintenance. »

Benjamin Blanchard et Wolter J. Fabrycky - Auteurs de "Systems Engineering and Analysis" :

« Une gestion efficace des actifs exige des méthodes pour prendre en compte la disponibilité et les performances des machines afin d'optimiser leur temps de fonctionnement. »

A decorative scroll frame with a vertical bar on the left and rounded corners, containing the chapter title.

Caractérisation technique et diagnostic FMD de la fraiseuse PMO 1.5

III. Caractérisation technique et diagnostic FMD de la fraiseuse PMO 1.5

III.1. Description de la fraiseuse :

La fraiseuse PMO 1.5 est une machine-outil polyvalente, couramment utilisée dans les ateliers de production et de maintenance pour réaliser des opérations d'usinage de haute précision. Elle opère en retirant de la matière grâce à un outil rotatif, appelé fraise, qui suit des trajectoires précises définies sur différents axes.

Elle permet notamment d'usiner des surfaces planes, de créer des rainures, des cavités ou des formes complexes, et peut aussi être utilisée pour le perçage ou l'alésage. Il s'agit d'une machine conventionnelle, commandée manuellement, appréciée pour sa robustesse et sa fiabilité dans les environnements industriels exigeants.

Elle est particulièrement utilisée dans la mécanique lourde, la maintenance industrielle et la fabrication de pièces uniques ou en séries limitées. Installée dans les locaux de FERROVIAL, elle contribue activement à la fabrication et à la restauration de composants destinés aux wagons et aux machines de forgeage. [16]

III.2. Principaux composants :

La fraiseuse PMO 1.5 se compose des éléments suivants :

- **1.Bâti** : Structure rigide qui supporte l'ensemble de la machine.
- **2.Table de travail** : Plateau mobile sur lequel est fixée la pièce à usiner. Se déplace selon les axes X (longitudinal), Y (transversal) et Z (vertical).
- **3.Tête de broche** : Élément motorisé qui supporte la fraise. Elle assure la rotation de l'outil à différentes vitesses.
- **4.Broche** : Organe tournant qui transmet le mouvement à l'outil.
- **5.Moteur principal** : Fournit l'énergie nécessaire à la rotation de la broche.
- **6.Système de lubrification** : Assure la lubrification des glissières et des éléments mobiles pour limiter l'usure.
- **7.Commandes manuelles** : Volants, leviers et manettes permettant le déplacement de la table et la sélection des vitesses.

- **8.Système de refroidissement** : Circuit de liquide réfrigérant permettant de maintenir une température optimale de coupe.
- **9.Boîte de vitesse** : sert à ajuster la vitesse de rotation de la broche, qui entraîne l'outil de coupe.

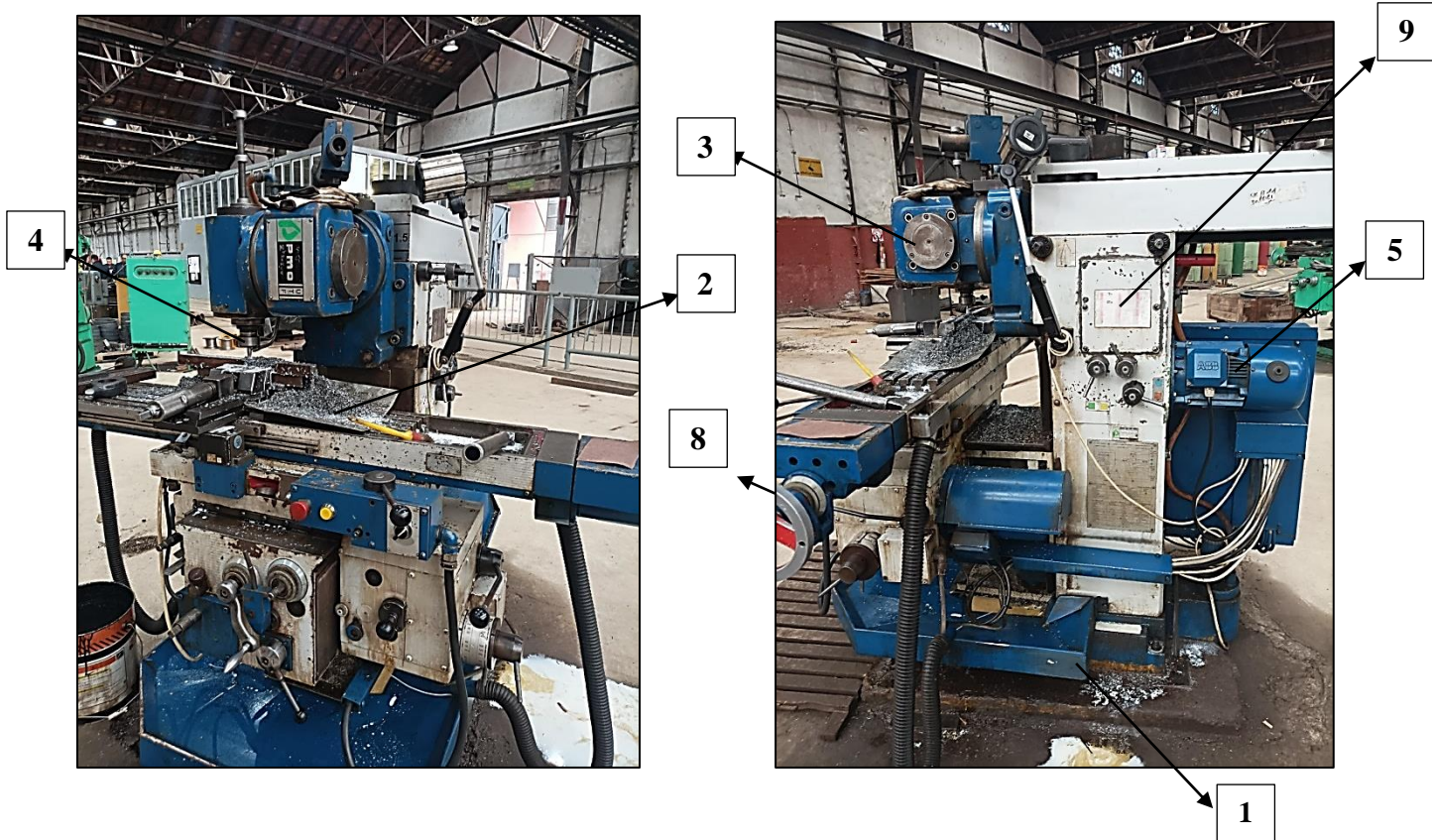


Figure III.1 : Les composants de la fraiseuse PMO 1.5

III.3. Fonctionnement de la fraiseuse :

Le principe de son fonctionnement repose sur la rotation d'une fraise montée sur la broche, combinée au déplacement de la pièce sur la table. L'opérateur règle la vitesse de rotation en fonction du matériau et de l'outil, puis déplace manuellement la table pour réaliser l'opération souhaitée.

Les étapes typiques de fonctionnement sont :

- a) Fixation de la pièce sur la table (souvent à l'aide d'un étau ou de brides).
- b) Sélection et montage de l'outil adapté.
- c) Réglage de la vitesse de rotation et des paramètres de coupe.
- d) Usinage par déplacement de la pièce sous la fraise.

- e) Lubrification/refroidissement pendant la coupe.
- f) Contrôle de la pièce après usinage. [16]

III.4. Différents types de fraises :



Figure III.2 : Les différents types de fraises

1. Choix des outils de fraisage :

Visualisation	Identification de l'outil	Type d'opérations réalisées	Schéma d'usinage
	Fraise 1 taille à surfacer	Surfaçage en roulant ou de profil	
	Fraise cloche à surfacer	Surfaçage en bout ou de face	
	Fraise 2 tailles à queue conique	Surfaçages combinés à prédominance en roulant Surfaçage en roulant	

Visualisation	Identification de l'outil	Types d'opérations réalisées	Schéma d'usinage
	Fraise à surfacer	Surfaçage en bout	
	Fraise à surfacer et à dresser	Surfaçages combinés à prédominance en bout	
	Fraise à rainurer	Rainurage de profil	
	Fraise 3 tailles à dentures alternées	Rainurage en bout	

Figure III.3 : Les types de fraises et leurs opérations


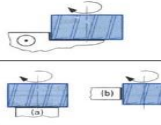



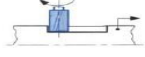




	Fraise 2 tailles à alésages et à entraînement par tenon	Surfaçages combinés à prédominance en bout Restrictivement : - surfaçage en bout (a) - surfaçage en roulant (b)	
	Fraise 2 tailles à queue cylindrique	Rainurage de profil peu précis	
	Fraise à rainurer deux lèvres à coupe centrale	Rainurage de profil en pleine matière Exemple : rainure de clavetage	
	Fraise 3 tailles à dentures alternées	Rainurage en bout Qualité usuelle obtenue /9	
	Fraise 3 tailles extensible à denture alternées	Rainurage en bout qualité usuelle obtenue : 7-8	

Figure III.4 : Les types de fraises et leurs opérations

III.5. Importance dans le cadre de l’étude :

La fraiseuse PMO 1.5 est un équipement stratégique dans l’atelier d’usinage. Sa disponibilité impacte directement la productivité de l’entreprise. En analysant son historique de maintenance, il est possible de calculer ses indicateurs essentiels tels que :

- MTBF (Mean Time Between Failures),
- MTTR (Mean Time To Repair),
- Taux de disponibilité,
- Et d’autres KPI de fiabilité.

Cette étude permettra de diagnostiquer les défaillances récurrentes, d’optimiser les plans de maintenance, et d’augmenter le temps de bon fonctionnement de la machine. [16]

III.6. Exploitation de l’historique de maintenance de la fraiseuse PMO 1.5 :

L’étude de la fraiseuse PMO 1.5 s’appuie sur l’analyse de son historique de maintenance, recueilli au sein de l’atelier entre [mars/2022] et [novembre/2024]. Cet historique comprend les interventions préventives planifiées, les maintenances correctives non planifiées, ainsi que les observations réalisées par les techniciens lors des arrêts machine. [16]

Tableau III.1 : Historique de la fraiseuse PMO 1.5

Fraiseuse PMO 1,5				
Date début d'arrêt	Date de fin d'arrêt	Les pannes	TTR	TBF (h)
04/03/2022 09:30	04/03/2022 10:30	Lubrifiant non conforme pompe centrale	1	0
09/03/2022 10:30	09/03/2022 12:00	Pas de rotation dans quelque vitesse	1,5	120
09/04/2022 12:00	09/04/2022 14:00	Bruit pendant a normal pendant la rotation des vitesses	2	744
28/05/2022 10:30	28/05/2022 14:00	Descente libre de mécanisme de frinage	3,5	1172,5
03/06/2022 10:00	03/06/2022 14:00	Montée dure Vis et noix (table)	4	140
08/06/2022 10:00	08/06/2022 14:00	Blocage de la table	4	116
26/06/2022 08:30	26/06/2022 10:30	Jeu et vibration de table	2	426,5
10/07/2022 09:30	10/07/2022 13:00	Descente dure de Mécanisme de freinage (table)	3,5	335
04/08/2022 08:45	11/08/2022 10:00	Coupure du mécanisme de fonctionnement de la boîte d'avance	169,25	595,75
28/10/2022 14:00	29/10/2022 09:30	Pas de rotation globale de la boîte vitesse	19,5	1876
04/11/2022 10:30	04/11/2022 11:45	Pas d'avance rapide dans tous les sens	1,25	145
02/12/2022 15:10	03/12/2022 11:00	Bruit a normale au niveau moteur avances rapide	19,833	675,4166667
28/12/2022 09:00	30/12/2022 12:00	Mauvais engrainement de denture de la boîte d'avance	51	598
17/02/2023 10:15	17/02/2023 16:00	Jeu et vibration de table	5,75	1174,25
18/02/2023 15:20	19/02/2023 11:45	Coupure fils d'alimentation bobine d'embrayage	20,417	23,33333333
24/03/2023 08:45	24/03/2023 14:30	Rotation de la boîte vitesse défectueux	5,75	789
03/06/2023 09:00	03/06/2023 09:45	Problème clairage	0,75	1698,5
25/11/2023 09:00	26/11/2023 10:30	Goupille élastique de raccordement cassé	25,5	4199,25
27/11/2023 12:00	27/11/2023 14:00	Problème au niveau de la broche	2	25,5
28/11/2023 08:45	28/11/2023 12:00	Coincement la Broche	3,25	18,75
03/12/2023 09:00	07/12/2023 11:00	Fissure et Encrassement la glissière de belier	98	117
13/12/2023	13/12/2023	Fuite Circuit pompe	1,667	146

13:00	14:40			
14/12/2023 08:45	14/12/2023 12:00	Obturation circuit pompe	3,25	18,08333333
27/01/2024 13:30	28/01/2024 11:00	Mauvais réglage de mécanisme d'engrenage boîte d'avance	21,5	1057,5
22/02/2024 13:30	22/02/2024 14:30	Court circuit Moteur broche	1	602,5
01/03/2024 10:30	17/03/2024 16:00	Fatigue de la broche	389,5	188
06/04/2024 12:30	06/04/2024 16:00	Moteur d'avances rapide hors service	3,5	476,5
11/04/2024 09:45	12/04/2024 13:30	Rupture interne / blocage de la pompe centrale	27,75	113,75
05/05/2024 13:00	05/05/2024 14:30	Bruit a normale au niveau moteur avances	1,5	551,5
06/06/2024 10:00	07/06/2024 13:00	Rupture accouplement de la pompe centrale	27	763,5
13/07/2024 11:30	14/07/2024 12:00	Pas d'avance rapide dans l'un des axes	24,5	862,5
15/07/2024 09:30	20/09/2024 12:00	Arbre de transmission de moteur cassée	1	21,5
23/09/2024 12:30	28/09/2024 12:00	Réparation chappe bélier	119,5	72,5
30/09/2024 12:30	30/09/2024 15:45	Blocage de la table	3,25	48,5
21/10/2024 09:30	24/10/2024 16:00	Usure sur les billes et la vis sans fin de déplacement table	78,5	497,75
28/11/2024 09:00	28/11/2024 10:30	Galets du mécanisme de freinage usé	1,5	833
29/11/2024 09:45	29/11/2024 11:30	Déclenchement de DISJ	1,75	23,25
30/11/2024 12:30	30/11/2024 16:20	l'embrayage de vitesse non fonctionne pas	3,833	25

Comme indiqué avant l'analyse repose sur un ensemble de données collectées au sein de l'atelier durant la période d'étude. Ces informations proviennent principalement des fiches d'intervention renseignées manuellement par les techniciens de maintenance, du registre quotidien des arrêts machines, du planning de maintenance préventive élaboré par le responsable technique, ainsi que des comptes rendus d'inspection périodique.

L'exploitation de ces sources a permis d'identifier plusieurs catégories de pannes affectant les équipements. Les dysfonctionnements recensés sont d'ordres divers :

- **Mécaniques** : apparition de jeux anormaux au niveau des glissières, usure prononcée des vis sans fin, ou encore blocage d'axes en cours de fonctionnement.

- **Électriques** : défaillance du moteur principal ou anomalies constatées dans l'armoire de commande.
- **Hydrauliques** : notamment des fuites détectées dans le système de lubrification centralisée.
- **Liés aux outils** : tels que des cas de casse d'outil ou de serrage inadéquat de la fraise, entraînant des interruptions de production.

Ces éléments constituent la base de l'étude de fiabilité et d'optimisation du fonctionnement des machines.

III.6.1 Etude FMD de la machine :

À partir des défaillances identifiées et des données collectées dans l'atelier, une évaluation précise des performances de la fraiseuse PMO 1.5 a été entreprise. L'étude repose sur le calcul des indicateurs fondamentaux de Fiabilité, de Maintenabilité et de Disponibilité, en lien direct avec les interventions réellement constatées. Afin de mieux caractériser le comportement de la machine face aux pannes dans le temps, l'approche a été complétée par une modélisation selon la loi de Weibull. Cette méthode permet de dégager des tendances de défaillance utiles pour ajuster les stratégies de maintenance et réduire les arrêts imprévus.

III.6.1.1 Calcul des indicateurs :

III.6.1.1.1 Détermination des paramètres de Weibull :

Méthodologie de calcul :

Voici les étapes que j'ai suivies pour étudier la fiabilité de ma fraiseuse PMO 1.5 en utilisant la loi de Weibull, afin de déterminer les paramètres β et η :

- Premièrement, j'ai classé de manière croissante les 38 valeurs des TBFs.
- Calcul de la probabilité accumulée $F(i)$: J'ai utilisé la formule :

$$F(i) = \frac{i}{(N + 1)}$$

Où : i est le rang de chaque panne (de 1 à 38 après tri)

N=38 est le nombre total des pannes.

- J'ai calculé le pourcentage de la probabilité accumulée $F(i)\%$

Tableau III.2 : Application du modèle de Weibull

N°	TBF (h)	i	$F(t) = i/(N+1)$	$F(t)\%$
1	0	1	0,025641026	2,564102564
2	18,0833333	2	0,051282051	5,128205128
3	18,75	3	0,076923077	7,692307692
4	21,5	4	0,102564103	10,25641026
5	23,25	5	0,128205128	12,82051282
6	23,3333333	6	0,153846154	15,38461538
7	25	7	0,179487179	17,94871795
8	25,5	8	0,205128205	20,51282051
9	48,5	9	0,230769231	23,07692308
10	72,5	10	0,256410256	25,64102564
11	113,75	11	0,282051282	28,20512821
12	116	12	0,307692308	30,76923077
13	117	13	0,333333333	33,33333333
14	120	14	0,358974359	35,8974359
15	140	15	0,384615385	38,46153846
16	145	16	0,41025641	41,02564103
17	146	17	0,435897436	43,58974359
18	188	18	0,461538462	46,15384615
19	335	19	0,487179487	48,71794872
20	426,5	20	0,512820513	51,28205128
21	476,5	21	0,538461538	53,84615385
22	497,75	22	0,564102564	56,41025641
23	551,5	23	0,58974359	58,97435897
24	595,75	24	0,615384615	61,53846154
25	598	25	0,641025641	64,1025641
26	602,5	26	0,666666667	66,66666667
27	675,4166667	27	0,692307692	69,23076923
28	744	28	0,717948718	71,79487179
29	763,5	29	0,743589744	74,35897436
30	789	30	0,769230769	76,92307692
31	833	31	0,794871795	79,48717949
32	862,5	32	0,820512821	82,05128205
33	1057,5	33	0,846153846	84,61538462
34	1172,5	34	0,871794872	87,17948718
35	1174,25	35	0,897435897	89,74358974
36	1698,5	36	0,923076923	92,30769231
37	1876	37	0,948717949	94,87179487

38	4199,25	38	0,974358974	97,43589744
----	---------	----	-------------	-------------

D'après le papier de Weibull (Figure III.5) :

$$\beta = 1.28$$

$$\eta = 21,115$$

$$\gamma = 2,14$$

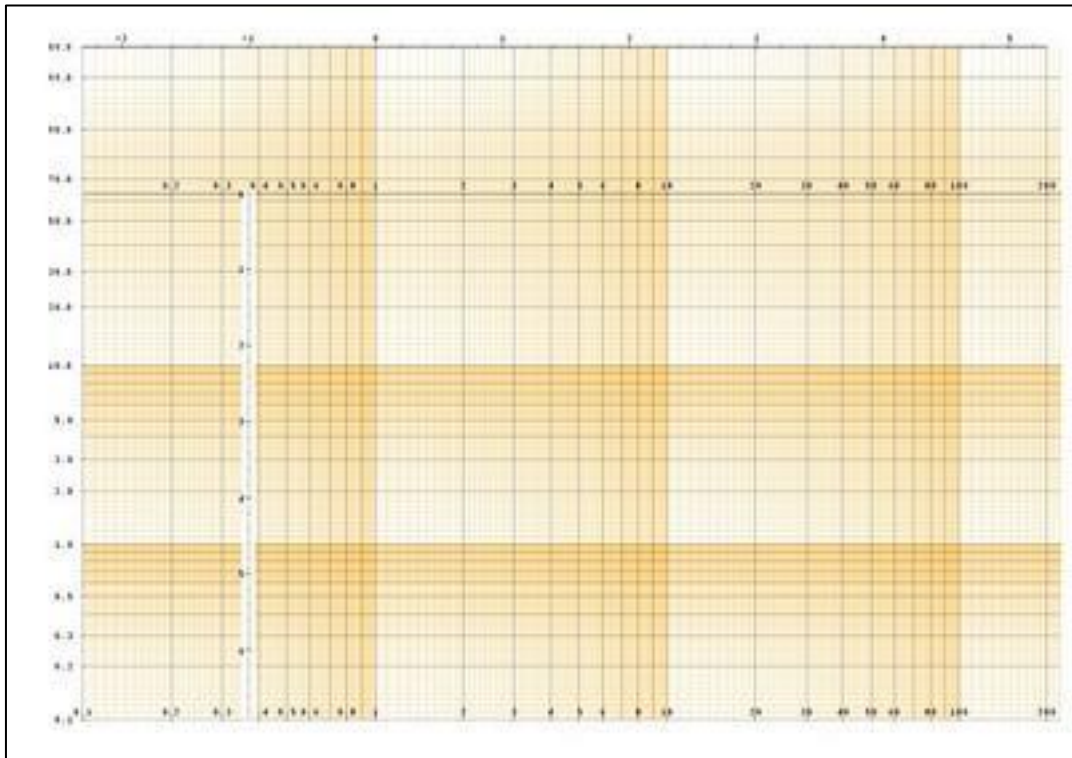


Figure III.5 : Le papier de Weibull

III.6.1.1.2 Calcul du MTBF :

Le MTBF (Mean Time Between Failures) est une mesure clé de la fiabilité moyenne. Pour la loi de Weibull, il est calculé à l'aide de la fonction gamma Γ :

$$\text{MTBF} = \eta * \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

- **Calcul de $\Gamma(1+(1/\beta))$:**

En utilisant l'excel avec $\beta=1.28$, la fonction gamma est égale approximativement à 0,92654

On sait que $\eta=21,115$

Donc, $MTBF = 21,115 * 0,92654 = 19,563h$

III.6.1.1.3. Calcul de la fiabilité $R(t)$:

On calcul la fiabilité avec $t=MTBF=19,563$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

$$R(MTBF) = e^{-\left(\frac{MTBF-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

$$R(19,563) = e^{-\left(\frac{19,563-2,14}{21,115}\right)^{1,28}} = 0.45$$

Ainsi, à $t=19,563$ heures, la fiabilité est d'environ 45 %

III.6.1.1.4. Calcul de la probabilité de défaillance $F(t)$:

La probabilité de défaillance $F(t)$ est le complément de la fiabilité :

$$F(t) = 1 - R(t)$$

à $t=MTBF$: $F(19,563) = 1 - 0,45 = 0,55$

On à **55%** de chance pour que notre fraiseuse tombe en panne quand $t=19,563$

III.6.1.1.5. Calcul du taux de défaillance $\lambda(t)$:

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

On prend $t = \text{MTBF}$

$$\lambda(19,563) = \frac{1,28}{21,115} * \left[\frac{19,563 - 2,14}{21,115} \right]^{1,28-1} = 0.057 \text{ def/h}$$

III.6.1.1.6. Calcul de la densité de probabilité $f(t)$:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t - \gamma}{\eta} \right]^{\beta-1} * e^{-\left[\frac{t - \gamma}{\eta} \right]^{\beta}}$$

Lorsque $t = \text{MTBF}$

$$f(t) = \frac{1,28}{21,115} \left[\frac{19,563 - 2,14}{21,115} \right]^{1,28-1} * e^{-\left[\frac{19,563 - 2,14}{21,115} \right]^{1,28}} = 0,026$$

On prend comme exemple 17 valeurs de t depuis le (Tableau III.1) :

Tableau III.3 : Etude du modèle de Weibull

i	TBF	F(t)	R(t)	f(t)	$\lambda(t)$
2	18,0833333	0,51	0,49	0,02277	0,05603
3	18,75	0,5207455	0,4792545	0,02285	0,05668
4	21,5	0,5913413	0,4086587	0,02271	0,05916
5	23,25	0,6320091	0,3679909	0,0223	0,06061
6	23,3333333	0,6338643	0,3661357	0,02227	0,06068
7	25	0,6694453	0,3305547	0,02169	0,06198
8	25,5	0,6795629	0,3204371	0,02149	0,06235
9	48,5	0,9352	0,0648	0,00862	0,07555
10	72,5	0,990606	0,009394	0,00189	0,08491
11	113,75	0,999781	0,000219	$7,025 * 10^{-5}$	0,09662
12	116	0,999824	0,000176	$5,763 * 10^{-5}$	0,09716
13	117	0,999841	0,000159	$5,274 * 10^{-5}$	0,0974
14	120	0,999881	0,000119	$4,036 * 10^{-5}$	0,09811

15	140	0,999984	0,000016	$6,345 \cdot 10^{-5}$	0,10251
16	145	0,9999905	0,0000095	$3,928 \cdot 10^{-6}$	0,10354
17	146	0,9999914	0,0000086	$3,566 \cdot 10^{-6}$	0,10374
18	188	0,999999907	0,000000093	$4,996 \cdot 10^{-8}$	0,11145

III.6.1.1.7. Calcul de la maintenabilité :

$$MTTR = \frac{\sum TTR}{N}$$

$$MTTR = 30,375 \text{ h} \longrightarrow \mu = \frac{1}{MTTR} = 0,032$$

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

Pour $t=MTBF$ $M(t) = 1 - e^{-0.032 \cdot t}$

$$M(t) = 0.465$$

Tableau III.4 : Tableau de la maintenabilité

i	TTR	M(t)
1	1,5	0,04686621
2	2	0,061995
3	3,5	0,10595574
4	4	0,12014662
5	4	0,12014662
6	2	0,061995
7	3,5	0,10595574
8	169,25	0,99555511
9	19,5	0,46420304
10	1,25	0,03921056
11	19,833	0,46988218
12	51	0,80446189
13	5,75	0,1680642
14	20,417	0,47969703
15	5,75	0,1680642
16	0,75	0,02371429
17	25,5	0,55780309
18	2	0,061995

III.6.1.1.8. Calcul de la disponibilité intrinsèque :

$$D_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = 0,39$$

III.6.1.1.9. Calcul de la disponibilité instantané :

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{1}{MTBF} = 0,051$$

$$D(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} * e^{-t(\mu + \lambda)}$$

$$T=MTBF=19,563h$$

$$D(t) = 0,197$$

Tableau III.5 : Tableau de la disponibilité

TBF	D(t)
18,08333	0,493065
18,75	0,482042
21,5	0,442449
23,25	0,421528
23,33333	0,420589
25	0,403426
25,5	0,398758
48,5	0,301349
72,5	0,273866
113,75	0,248795
116	0,247755
117	0,247295
120	0,245946
140	0,237901
145	0,236093
146	0,235745
188	0,223074



Les solutions pour l'amélioration du MTBF et la réduction du MTTR

IV. Solutions pour l'amélioration du MTBF et la réduction du MTTR

IV.1. Introduction :

Dans l'industrie moderne, où la compétitivité repose sur l'efficacité des équipements, la disponibilité des machines est devenue un enjeu stratégique. Accroître le temps moyen entre pannes et réduire le temps moyen de réparation permet non seulement d'améliorer la performance, mais aussi de diminuer les coûts d'exploitation. Ce chapitre explore différentes méthodes et outils techniques pour atteindre cet objectif, en s'appuyant sur les meilleures pratiques de maintenance.

IV.2 : Résumé des solutions proposées

Tableau IV.1 : Comment les solutions agissent sur le MTBF et le MTTR

Solutions proposées	Impact sur MTBF	Impact sur MTTR	Commentaire
Maintenance préventive	↑ Augmente	↔ Neutre	Moins de pannes par prévention
Maintenance prédictive	↑ Augmente	↔ Neutre ou légère baisse	Détection anticipée
Gestion des stocks	↔ Neutre	↓ Réduit	Pièces disponibles plus vite
Redondance des systèmes	↑ Augmente	↔ Neutre	Pannes tolérées grâce aux doublons
Optimisation des intervalles	↑ Augmente	↔ Neutre	Moins de pannes grâce au bon timing
Analyse des causes racines (RCA)	↑ Augmente	↓ Réduit indirectement	Suppression des causes majeures
Formation des opérateurs	↔ Neutre	↓ Réduit	Réparations plus rapides
Simulation par Markov	↑ Planification intelligente	↓ Meilleure anticipation	Aide à mieux organiser les actions
Digital Twin / Monte Carlo	↑ Anticipation de pannes	↓ Réponse rapide	Optimisation grâce aux simulations
Suivi des KPI	↑ et ↓ (indirect)	Suivi des performances	Surveillance pour ajuster vite

IV.3. KPI (Key Performance Indicator):

Parmi les solutions indiquées sur le tableau précédent, nous avons opter sur le suivi des KPI.

Ce choix considère les indicateurs opportuns réduisant les TTRs. Il nous paraît une solution facile à concrétiser et à on tirer bénéfice. [17]

Le suivi des KPI se base sur la détermination des indicateurs ou taux, concernant :

IV.3.1 : Les indicateurs pour les équipements pris en charge par le service maintenance :

Tableau IV.2 : Les indicateurs des équipements

Maintenances planifiées en % du total des maintenances	Nombre d'Ordres de Maintenance planifiés ÷ Nombre d'Ordres de Maintenance total
Maintenances non-planifiées en % du total des maintenances	Nombre d'Ordres de Maintenance non-planifiés ÷ Nombre d'Ordres de Maintenance total
Disponibilité des équipements critiques	Nombre équipements critiques disponibles ÷ nombre total d'équipements critiques
Disponibilité des équipements	Temps effectif de production
Taux de Rendement Synthétique TRS	Taux de disponibilité * Taux de performance * Taux de qualité
Taux de disponibilité	Temps de production effectif ÷ Temps de production théorique
Taux de performance	Temps de Cycle * Production effective ÷ Temps de Production effectif
Taux de qualité	(Production totale – Production rejetée) ÷ Production totale

IV.3.2 : Les indicateurs de qualité

Tableau IV.3 : Les indicateurs de qualité

Reprises en % du total des actions de maintenance	Nombre d'action de maintenance qui sont une répétition de la précédente ÷ nombre total d'actions de maintenance
Temps d'arrêt	Temps d'arrêt d'équipement ÷ temps total de production
	Temps d'arrêt pour maintenances non-planifiées

	Temps d'arrêt pour maintenances planifiées
Temps Moyen entre Pannes MTBF	$(\text{Temps opérationnel} - \text{temps d'arrêt}) \div \text{nombre de pannes}$

IV.3.3 : Les indicateurs de service :

Tableau IV.4 : Les indicateurs de service

Temps Moyen de Réparation MTTR	Temps moyen entre la survenue d'un incident et sa résolution
Arriérés de maintenance en % du total des ordres de maintenance	$\text{Nombre d'ordres de maintenance en retard} \div \text{Nombre total d'ordres de maintenance}$

IV.3.4 : Les indicateurs de ressources humaines :

Tableau IV.5 : Les indicateurs des ressources humaines

Heures de maintenance en % du temps total de production	$\text{Nombre d'heures passées en maintenance} \div \text{temps total de production}$
Maintenance préventive	$\text{Nombre d'heures passées en maintenance préventive} \div \text{Nombre total d'heures passées en maintenance}$
	$\% \text{ d'heures-homme en maintenance préventive}$
Programmation	$\text{Nombre d'heures de maintenance réelles} \div \text{Nombre d'heures de maintenance planifiées}$
	$\text{Heures-homme planifiées} \div \text{heures-homme totales}$
Ordres de travail retardés par manque de ressources humaines	$\text{Nombre d'ordres de travail retardés pour cause de manque d'effectif} \div \text{Nombre d'ordres de travail total}$

Bien sûr, il ne faut pas négliger les solutions qui viennent compléter le suivi des KPI, en citant :

- Augmentation de l'entretien préventif (systématique et conditionnel).
- Application de la maintenance prédictive.

- Assurer une gestion de stocks efficace.
- Optimiser les intervalles d'intervention : il s'agit ici de trouver un compromis économique entre les couts de maintenance préventive et les couts induits par les défaillances. [18]

$$C(t) = C_p + (C_f * \lambda(t))$$

C_p : est le cout de maintenance préventive, C_f : est le cout de défaillance

- Analyser les causes à la racine (RCA) : pour la suppression des causes majeures (Ishikawa, courbe ABC...).
- La formation continue du personnel de maintenance (remise à niveau) : Former les équipes améliore les temps d'intervention et la qualité des réparations.

Courbe d'apprentissage : $T_n = (T_1 * n) - b$

Où : T_n : est le temps de réparation à la nième intervention,

T_1 : le temps initial,

b : le taux d'apprentissage.

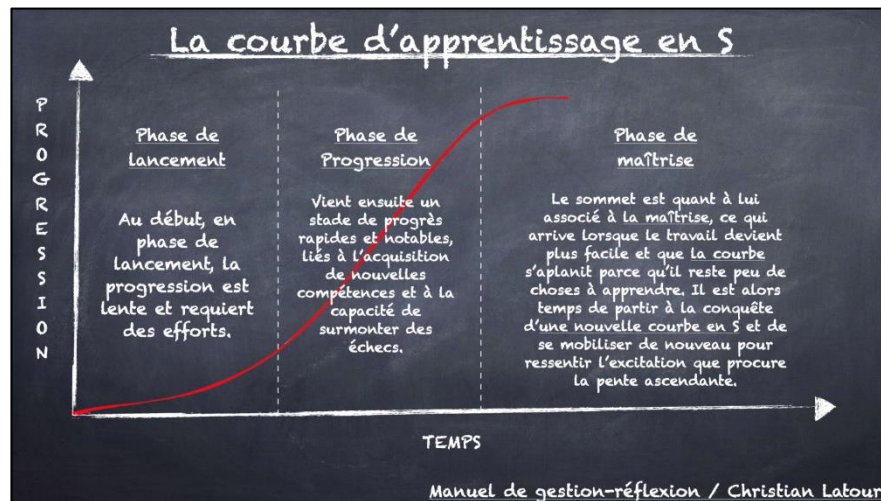


Figure IV.1 : Courbe théorique d'apprentissage [19]

Conclusion :

L'amélioration de la fiabilité et la réduction des durées de réparation nécessitent une approche globale mêlant prévention, prédiction, optimisation des ressources, analyse des défaillances et développement des compétences. En s'appuyant sur des outils modernes tels que la simulation avancée et les indicateurs de performance, les entreprises peuvent assurer une compétitivité durable tout en maîtrisant leurs couts de maintenance.

A decorative scroll frame with a light gray background and a black border. The frame has a vertical scroll on the left side and a horizontal scroll on the top right side. The text "Conclusion Générale" is centered within the frame.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les indicateurs de maintenance doivent être à leur optimum, de façon à prévoir une disponibilité accrue des équipements de production. Afin d'arriver à ces objectifs une multitude de solutions peuvent être adoptées en considérant leurs limites d'application.

Les responsables qu'ils soient de la production ou de la maintenance sont responsables de la bonne tenue des équipements en assurant une fiabilité maximale d'où des temps de bon fonctionnement aussi longs que possible. En consultant les sources bibliographiques, la majorité des chercheurs s'appuient sur le niveau de fiabilité considéré comme un indicateur majeur ; ce qui entraînera nécessairement un taux de défaillance minimal et des temps de bon fonctionnement plus importants.

Dans ce document, il a été question d'établir des solutions pour améliorer le paramètre TBF de la fraiseuse PMO 1.5 (FERROVIAL) en déterminant tout d'abord les indicateurs actuels ; tel que la fiabilité, le taux de défaillance, disponibilité et maintenabilité. Ceci a été possible grâce à un historique de la machine.

Dans notre approche nous avons cité les solutions possibles et réalisables dans le but de réduire les TTRs ce qui conduira à des taux de défaillance réduits et des TBFs allongés. Nous nous sommes penchés sur des actions de suivi de la méthode KPI (Key Performance Indicators) qui sera d'un intérêt certain. Cette méthode a été développée dans le chapitre quatre.

Toutes les fonctions de maintenance, Gestion des stocks, la politique de maintenance adoptée, l'optimisation des intervalles d'interventions, analyse de l'origine des causes de défaillance, la formation du personnel (production et maintenance) ; doivent être considérés sérieusement dans l'objectif final est d'accroître les indicateurs opérationnels des équipements de production.

Dans la perspective de développer ce thème, il sera intéressant :

- d'optimiser les TBFs ;

- de montrer les interactions entre les différentes fonctions d'un service maintenance ;

- De déterminer les budgets de maintenance en fonction des besoins d'une stratégie de maintenance optimisée

References bibliographiques

- [1] : FERROVIAL. Présentation de l'entreprise. Document interne, Annaba, 2024.
- [2] : AFNOR. Gestion des actifs – Principes généraux. Paris : ISO, ISO 55000, 2014.
- [3] : AFNOR. Maintenance – Terminologie. Paris : Association française de normalisation, NF EN 13306, 2001.
- [4] : ISO. Systèmes de management de la qualité – Exigences. Genève : Organisation internationale de normalisation, ISO 9001, 2015.
- [5] : **F. Monchy**, Maintenance – Méthodes et organisation, Dunod, 2000.
- [6] : **DHILLON B. S.** Maintainability, Maintenance and Reliability for Engineers. Boca Raton : CRC Press, 2006.
- [7] : [Mobility-work.com/fr/blog/niveaux-maintenance-afnor/](https://mobility-work.com/fr/blog/niveaux-maintenance-afnor/)
- [8] : **J. Louis Matheron**, La maintenance industrielle, Éditions Eyrolles, 2002.
- [9] : **Molley, R. Keith**, An introduction to predictive maintenance, 2nd ed, Elsevier, 2002
- [10] : **Mr Benamira**, Ingénierie de la maintenance, support de cours, Master 1 Ingénierie de la maintenance, année universitaire 2023–2024.
- [11] : **Brétesché, B.** (2000). La méthode APTE® de l'analyse de la valeur. Éditions Petrelle
- [12] : **Blanchard, B. S., & Fabrycky, W. J.** (2010). Systems Engineering and Analysis 4th éd,prentice Hall,2006.
- [13] : **LYONNET P**, « La maintenance : Mathématiques et Méthodes » édition Lavoisier, Tec et Doc. Paris 1992
- [14] : Université Ibn Khaldoun de Tiaret, la fiabilité, maintenabilité et disponibilité, support pédagogique, Département de Génier mécanique
- [15] : **WEIBULL W.** « A statistical distribution function of wide applicability ». Journal of Applied Mechanics, vol. 18, n° 3, 1951, pp. 293–297.
- [16] : Dossier technique de la fraiseuse PMO 1.5, FERROVIAL, Annaba
- [17] : **Elfezazi, S., Mokhlis, A., Benmoussa, R., et al.** (2003). Vers un outil basé sur l'analyse fonctionnelle pour la mise en œuvre des indicateurs de performance de la fonction maintenance. Revue Française de Gestion Industrielle, 22(3), 411

[18] : Dekker, R. (1996). Application of maintenance optimization Models: A Review and Analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 51(3), 229-240

[19] : Wright, T.P. (1936). Factors Affecting the Cost of airplanes. *Journal of Aeronautical Science*, 3(4), 122-128.