

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Badji Mokhtar - Annaba

Badji Mokhtar– Annaba UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Technologie

Département : Génie mécanique

Domaine : Sciences et techniques

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Ingénierie de la maintenance

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

### Thème:

**Etude de la maintenabilité d'une machine industrielle  
(FICEP TIPO B 254)**

Présenté par : *Titel louai*

Encadrant : Pr. *Khelif Rabia*

### *Jury de Soutenance :*

<i>Dr.Djeddi Mohammed Lamine</i>	<i>MCA</i>	<i>UBMA</i>	<i>Président</i>
<i>Dr.Khelif Rabia</i>	<i>PROF</i>	<i>UBMA</i>	<i>Encadrant</i>
<i>Dr.Kallouche Abdelkader</i>	<i>MCB</i>	<i>UBMA</i>	<i>Examineur</i>

Année Universitaire : 2024/2025

## **REMERCIEMENTS**

*Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné la volonté pour accomplir ce travail.*

*je tiens à remercier chaleureusement Monsieur **Khelif Rabia**, mon encadreur, pour sa rigueur scientifique, sa bienveillance et la qualité de ses conseils. Son expertise en ingénierie de la maintenance et son sens aigu de l'analyse ont été pour moi des repères précieux tout au long de l'élaboration de ce mémoire.*

*Je remercie aussi tous les membres du jury pour leur évaluation de cette mémoire.*

*Je suis également reconnaissant envers mes collègues de promotion, pour les échanges stimulants, l'entraide lors des phases de collecte de données et le soutien moral qu'ils m'ont apporté. Leurs remarques et retours d'expérience ont été précieux pour ajuster les hypothèses et les analyses.*

*Enfin, je remercie toutes les personnes — enseignants, techniciens, opérateurs — qui ont collaboré à la collecte et à la validation des données sur la machine FICEP TIPO B 254. Leur disponibilité et leur accueil au sein de PROMECH Annaba ont grandement facilité l'avancement de ce projet.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes parents :*

*À ma chère mère, qui a œuvré pour ma réussite par son amour, son soutien indéfectible, ses précieux conseils et tous les sacrifices consentis. Pour toute son assistance et sa présence constante dans ma vie, reçois, à travers ce travail – aussi modeste soit-il – l'expression de mes sentiments les plus sincères et de ma profonde gratitude.*

*À mon cher père, qui peut être fier et trouver ici le fruit de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte ses fruits. Merci pour les nobles valeurs, l'éducation et le soutien permanent que tu m'as transmis.*

*À ma chère sœur,*

*Pour sa présence rassurante, son écoute bienveillante et son soutien discret, qui ont toujours été un réconfort dans les moments les plus difficiles. Merci d'avoir été là, tout simplement.*

*À toute ma famille,*

*Merci pour vos encouragements, vos prières et votre confiance. Vous avez été un pilier moral tout au long de ce parcours d'efforts et d'apprentissage.*

*À mes amis fidèles,*

*Pour vos paroles motivantes, vos conseils, vos sourires et cette énergie positive qui m'ont accompagné jusqu'au bout. Vous avez rendu ce chemin plus léger et plus riche humainement.*

*Je vous dédie ce modeste travail avec toute ma reconnaissance et mon affection.*

## *Table des matières*

### REMERCIEMENTS

Dédicace

Table des matières .....	1
Table des figures .....	6
Table des tableaux .....	7
Fiche des symboles .....	8
INTRODUCTION .....	10
<b>Chapitre I : Description de la machine à étudier .....</b>	<b>11</b>
I Introduction : .....	12
II Présentation de l'entreprise : .....	12
II.1 Promech Annaba: .....	12
II.2 Historique et domaine d'activité : .....	13
II.3 Principales mission de Promech Annaba : .....	13
II.4 Dénomination : .....	14
II.5 Organigramme de l'entreprise .....	15
II.6 Différents types de maintenances préventive appliquées à Promech : .....	17
II.7 Objectifs du service maintenance : .....	17
III Choix de la machine à étudier : .....	17
III.1 Définition et Objectif de la Méthode PIEU .....	17
III.2 Principe de la Méthode .....	17
III.3 Application de la Méthode PIEU .....	19
IV Description de la machine : .....	21
IV.1 Généralités sur la machine TIPO B254 FICEP : .....	21
IV.2 Les composants de TIPO B254 FICEP : .....	22
IV.2.1 Banc de chargement à ripeurs (optionnel) : .....	22
IV.2.2 Structure de support de la motrice porte-pinces : .....	22
IV.2.3 Éléments à rouleaux : .....	22
IV.2.4 Unité de poinçonnage : .....	22
IV.2.5 Dispositif de changement des outils de poinçonnage : .....	23
IV.2.6 Unité de perçage (optionnelle) .....	23
IV.2.7 Dispositif de changement des outils de perçage (optionnel) .....	23
IV.2.8 Marqueuse à écriture à 38 positions (optionnelle) .....	23

IV.2.9	Magasin d'outils de poinçonnage.....	23
IV.2.10	Dispositif de nettoyage des copeaux avec brosse (optionnel).....	23
IV.2.11	Système d'aspiration des copeaux de perçage (option) :.....	23
IV.2.12	Unité de coupe au plasma : .....	23
IV.2.14	Système d'aspiration des fumées pour l'unité de coupe thermique (optionnel) ..	24
IV.2.15	Installation hydraulique .....	24
IV.2.16	Installation pneumatique .....	24
IV.2.17	Installation électrique.....	24
IV.2.18	Unité de commande numérique (CNC) .....	24
IV.2.19	Dispositif de déchargement des pièces finies (optionnel).....	25
IV.2.20	Convoyeur automatique de déchets de poinçonnage (optionnel).....	25
IV.2.21	Convoyeur automatique de déchets de coupe thermique (optionnel).....	25
IV.2.22	Convoyeur automatique pour pièces 500 x 500 (optionnel) .....	25
IV.2.23	Évacuateur de copeaux pour perceuse (optionnel) .....	26
IV.3	Caractéristiques principales : .....	26
V	Historique des arrêts des trois dernières années:.....	26
V.1	Le nombre et le type de pannes/défaillances sur 3 ans :.....	31
VI	Plan préventif suivi : .....	33
VII	.Conclusion :.....	35
<b>Chapitre II Etude théorique sur la maintenabilité: .....</b>		<b>36</b>
I	Introduction:.....	37
II	Notion de base :.....	37
II.1	Définition : .....	37
II.1.1	Maintenabilité (Norme américaine MIL-STD-721C) :.....	37
II.1.2	Maintenabilité (NF X60.100) : .....	37
II.2	Différence entre maintenabilité et maintenance :.....	38
II.3	La maintenabilité et la disponibilité :.....	38
II.4	Les facteurs de la maintenabilité :.....	38
II.5	Objectifs de la maintenabilité : .....	39
III	Maintenabilité intrinsèque et actions d'améliorations :.....	39
III.1	Maintenabilité intrinsèque : .....	39
III.2	Les critères de la maintenabilité intrinsèque :.....	39
III.2.1	Modularité et interchangeabilité : .....	39

III.2.2	Standardisation :.....	40
III.2.3	Accessibilité :.....	40
III.2.4	Aptitude à la pose et à la dépose :.....	40
III.2.5	Démonstrabilité : .....	40
III.2.6	Défectabilité :.....	41
III.3	Amélioration de la maintenabilité intrinsèque :.....	41
III.3.1	Intégrer la maintenabilité dans la phase de conception (Design for Maintainability DFM) : .....	41
III.3.2	Utiliser des simulations et analyses de maintenabilité :.....	41
III.3.3	Mettre en place des formations spécifiques pour les équipes de maintenance : .	42
IV	Maintenabilité extrinsèque et actions d'améliorations : .....	42
IV.1	Maintenabilité extrinsèque :.....	42
IV.2	Les critères de la maintenabilité extrinsèque :.....	42
IV.2.1	Organisation de la Maintenance :.....	42
IV.2.2	Disponibilité des Ressources et Moyens : .....	42
IV.2.3	Qualification et Formation du Personnel :.....	42
IV.2.4	Conditions Environnementales :.....	43
IV.3	Amélioration de la maintenabilité extrinsèque : .....	43
IV.3.1	Mettre en place un système de gestion optimisé des pièces de rechange pour éviter les ruptures de stock :.....	43
IV.3.2	Développer un programme de formation continue pour améliorer la compétence des techniciens : .....	44
IV.3.3	Intégrer des capteurs et des outils de maintenance prédictive basés sur l'IA et l'IoT : 44	
IV.3.4	Amélioration de l'aménagement des zones de travail pour faciliter l'accès aux équipements : .....	44
V	Modélisation de la maintenabilité :.....	45
V.1	Historique des Arrêts pour Intervention :.....	45
V.1.1	Durée des interventions :.....	45
V.1.2	Le mode de défaillances : .....	45
V.1.3	Les modes de défaillances électriques :.....	46
V.1.4	Causes principales des défaillances.....	46
V.1.5	Fréquence des interventions :.....	46
V.2	Choix de la Loi Statistique :.....	47
V.2.1	Loi exponentielle:.....	47

V.2.2	Loi normale (ou gaussienne) :.....	48
V.2.3	Loi de Weibull : .....	48
V.3	Validation de la Loi :.....	48
V.3.1	Test du khi-deux :.....	48
V.3.2	Test de Kolmogorov-Smirnov : .....	49
V.4	Principales formules de la maintenabilité :.....	49
V.4.1	Temps Moyen de Réparation (MTTR).....	50
V.4.2	Taux de réparation ( $\mu$ ).....	50
V.4.3	Disponibilité (D) : .....	51
V.4.4	Taux de Maintenabilité Instantanée $g(t)$ :.....	51
V.4.5	Probabilité de réparer un équipement en un temps donné :.....	51
V.4.6	Fiabilité et Maintenabilité :.....	51
VI	Conclusion :.....	53
<b>Chapitre III Etude de la maintenabilité de la machine FICEP TIPO B254 : .....</b>		<b>54</b>
I	Introduction.....	55
II	Etudier les temps de réparations(TTR) :.....	55
II.1	Classement des temps de réparation(TTR) :.....	55
II.2	Appliquer la loi de probabilité (Weibull) : .....	56
II.3	Test de validation : .....	58
II.4	Calculer le l'espérance mathématique (MTTR) :.....	59
II.5	Calcul de la densité de probabilité : .....	59
III	Etudier les temps d'arrêts (TA) :.....	60
III.1	Classement des temps d'arrêts (TA) : .....	60
III.2	Application de la loi de probabilité (Weibull) :.....	61
III.3	Test de validation : .....	62
III.4	Calcul de l'espérance mathématique (Moyen temps d'arrêts MDT) :.....	62
III.5	Calcul de la densité de probabilité : .....	62
IV	Comparaison graphique entre TA et TTR :.....	63
IV.1	Comparaison graphique entre la densité de TA et TTR :.....	63
IV.2	Comparaison graphique entre la fonction de répartition de TA et TTR :.....	63
IV.3	Analyse des courbes :.....	64
IV.3.1	Courbes TTR (temps de réparation pur).....	64
IV.3.2	Courbes TA (temps d'arrêt global) .....	65

V	Conclusion :	65
<b>Chapitre IV : Plan d'amélioration de la maintenabilité de la machine FICEP TIPO B254.....66</b>		
I	Introduction :	67
II	Maintenabilité intrinsèque (conception de la machine).....	67
II.1	Actions rapides et facilement applicables.....	67
II.1.1	Conception « maintenance by design :	67
II.1.2	Accessibilité des composants :	67
II.1.3	Standardisation des pièces et des outils :	68
II.1.4	Ergonomie du poste de maintenance :	68
II.1.5	Documentation technique complète :	68
II.2	Actions nécessitant des modifications structurelles .....	68
II.2.1	Unité de poinçonnage :	68
II.2.2	Unité de coupe thermique :	69
II.2.3	Convoyeurs d'entrée/sortie :	69
II.2.4	Système hydraulique :	69
II.2.5	Contrôle CNC :	69
II.3	Procédure des temps d'intervention :	70
III	Maintenabilité extrinsèque (interventions et organisation).....	71
III.1	Actions rapides et facilement applicables :	71
III.1.1	Planification et organisation de l'intervention :	71
III.1.2	Préparation en amont (outils et matériel prêts) :	71
III.1.3	Gestion logistique des pièces de rechange :	71
III.1.4	Procédures d'intervention codifiées :	72
III.1.5	Coordination et formation des équipes :	72
III.2	PROCEDURE DES TEMPS D'IMMOBILISATION .....	72
IV	Une estimation du plan d'amélioration à effectuer :	73
V	Conclusion :	74
Conclusion Générale .....		75
Bibliographie.....		76

## *Table des figures*

<b>Chapitre I : Description de la machine à étudier .....</b>	<b>11</b>
Figure II.1: Identité visuelle de PROMECH Annaba.....	12
Figure II.2: Cuve100 m3 pour stockage de carburant .....	14
Figure II.3: Atelier de Chaudronnerie .....	14
Figure II.4: Organigramme de l'entreprise .....	15
Figure II.5: Organigramme de département de maintenance.....	16
Figure IV.1: FICEP TIPO B254.....	21
Figure IV.2: La machine de FICEP TIPO B254 à Promech Annaba.....	22
Figure IV.3: La commande numérique CNC.....	25
Figure V.1: Diagramme présentant la répartition des interventions par type .....	31
<b>Chapitre II: Etude théorique sur la maintenabilité .....</b>	<b>36</b>
Figure II.1: Composantes de la disponibilité d'un équipement. ....	38
Figure IV.1: Schéma des critères généraux de la maintenabilité .....	43
Figure V.1: Courbe de maintenabilité et seuil de MTTR .....	47
Figure V.2: Représentation de la disposition réparable.....	50
<b>Chapitre III : Etude de la maintenabilité de la machine FICEP TIPO B254.....</b>	<b>54</b>
Figure II.1: le graphe de Weibull (TTR/Fe).....	56
Figure II.2: graphe de weibull avec (TTR- $\gamma$ ).....	57
Figure III.1: le graphe de weibull(TA/Fe) .....	61
Figure IV.1: courbe de la densité de la probabilité de TTR et TA.....	63
Figure IV.2: Les courbes de fonction de répartition de TTR et TA.....	64
<b>Chapitre IV : Plan d'amélioration de la maintenabilité de la machine FICEP TIPO B254.....</b>	<b>66</b>
Figure II.1: Schéma de procédure de calcul du temps d'intervention (TTR) à partir des données terrain .....	70
Figure III.1: Schéma de suivi du temps d'immobilisation de la machine .....	73

## *Table des tableaux*

<b>Chapitre I : Description de la machine à étudier .....</b>	<b>11</b>
Tableau III.1: Evaluation de la criticité .....	18
Tableau IV.1: Caractéristiques de la machine .....	26
Tableau V.1: le fiche historique de la machine .....	27
Tableau V.2: Analyse statistique des défaillances et des fréquences correspondantes.....	32
Tableau VI.1: Plan préventif suivi .....	33
<b>Chapitre II: Etude théorique sur la maintenabilité .....</b>	<b>36</b>
Tableau II.1: Principaux facteurs influençant la maintenabilité .....	38
Tableau V.1: Comparaison des principales caractéristiques de la fiabilité et de la maintenabilité.....	51
<b>Chapitre III : Etude de la maintenabilité de la machine FICEP TIPO B254.....</b>	<b>54</b>
Tableau II.1: Répartition des TTR avec estimation empirique de $F_e$ .....	55
Tableau II.2: Données ajustées pour l'application de la loi de Weibull sur les TTR.....	57
Tableau II.3 : Écart entre la fonction empirique et la fonction théorique pour le test de conformité .....	58
Tableau II.4: Densité de probabilité des temps de réparation (TTR) selon la loi de Weibull ..	60
Tableau III.1 : Répartition des TA avec estimation empirique de $F_e$ .....	60
Tableau III.2: Données ajustées pour la loi de Weibull appliquée aux TA .....	61
Tableau III.3: Écart entre $F_e$ et $M(t)$ pour le test K-S (TA).....	62
Tableau III.4: Densité de probabilité des temps d'arrêt (TA) ajustée par la loi de Weibull.....	62
Tableau IV.1: Comparaison des fonctions de répartition $F(t)$ des (TA) et (TTR) .....	64
<b>Chapitre IV : Plan d'amélioration de la maintenabilité de la machine FICEP TIPO B254.....</b>	<b>66</b>
Tableau IV.1 : Estimation des durées de maintenance par phase avant et après optimisation.	74

## *Fiche des symboles*

<b>Symbole</b>	<b>Définition</b>	<b>Unité</b>
<b>t</b>	Temps (depuis la mise en service ou le début de la mesure)	heures
<b><math>\mu</math></b>	Taux de réparation	—
<b><math>\gamma</math></b>	Paramètre de décalage de la loi de Weibull	heures
<b><math>\eta</math></b>	Paramètre d'échelle de la loi de Weibull (temps caractéristique)	heures
<b><math>\beta</math></b>	Paramètre de forme de la loi de Weibull (détermine l'évolution du taux de défaillance)	—
<b>f(t)</b>	Densité de probabilité de la loi de Weibull	—
<b>F(t)</b>	Fonction de répartition (fiabilité cumulée) de la loi de Weibull	—
<b>M(t)</b>	Fonction de maintenabilité (identique à F(t) dans ce contexte)	—
<b>TTR</b>	Temps total de réparation	heures
<b>MTTR</b>	Mean Time To Repair : Temps moyen de réparation	heures
<b>TA</b>	Temps total d'arrêts	heures
<b>MDT</b>	Mean Time of Downtime : Temps moyen total d'arrêt	heures
<b>CR</b>	Coefficient de criticité : $CR = P \setminus I \setminus E \setminus U$	—
<b>P</b>	Incidences des pannes (impact technique, économique, environnemental, sécurité)	—
<b>I</b>	Importance de l'équipement dans le processus de production	—
<b>E</b>	État de l'équipement (usure, cycle de vie)	—
<b>U</b>	Utilisation (degré d'exploitation)	—
<b>A</b>	Constante extraite du tableau de la loi de Weibull	—
<b>OT</b>	Ordre de Travail	—

## ***Résumé:***

Ce mémoire porte sur l'étude de la maintenabilité de la machine FICEP TIPO B254 au sein de l'entreprise PROMECH Annaba. À partir de données d'interventions sur trois ans, les temps de réparation et d'arrêt ont été modélisés par la loi de Weibull. Les indicateurs clés (MTTR,  $M(t)$ , MDT ) ont été calculés et interprétés. Un plan d'amélioration a été proposé, basé sur des actions techniques et organisationnelles, visant à réduire les durées d'immobilisation et à renforcer la disponibilité de l'équipement.

## ***Abstract:***

This thesis focuses on the maintainability of the FICEP TIPO B254 machine at PROMECH Annaba. Using three years of intervention data, repair and downtime were modeled with the Weibull law. Key indicators (MTTR,  $M(t)$ , MDT ) were calculated and analyzed. A technical and organizational improvement plan was proposed to reduce downtime and increase machine availability.

## ***المخلص:***

يتناول هذا البحث دراسة قابلية الصيانة لآلة FICEP TIPO B254 في مؤسسة بروماك عنابة. تم تحليل بيانات التدخلات على مدى ثلاث سنوات باستخدام قانون ويبول، وحساب مؤشرات أساسية مثل (MTTR و  $M(t)$  و MDT) تم اقتراح خطة تحسين تقنية وتنظيمية بهدف تقليل أوقات التوقف وزيادة جاهزية الآلة.

## ***INTRODUCTION :***

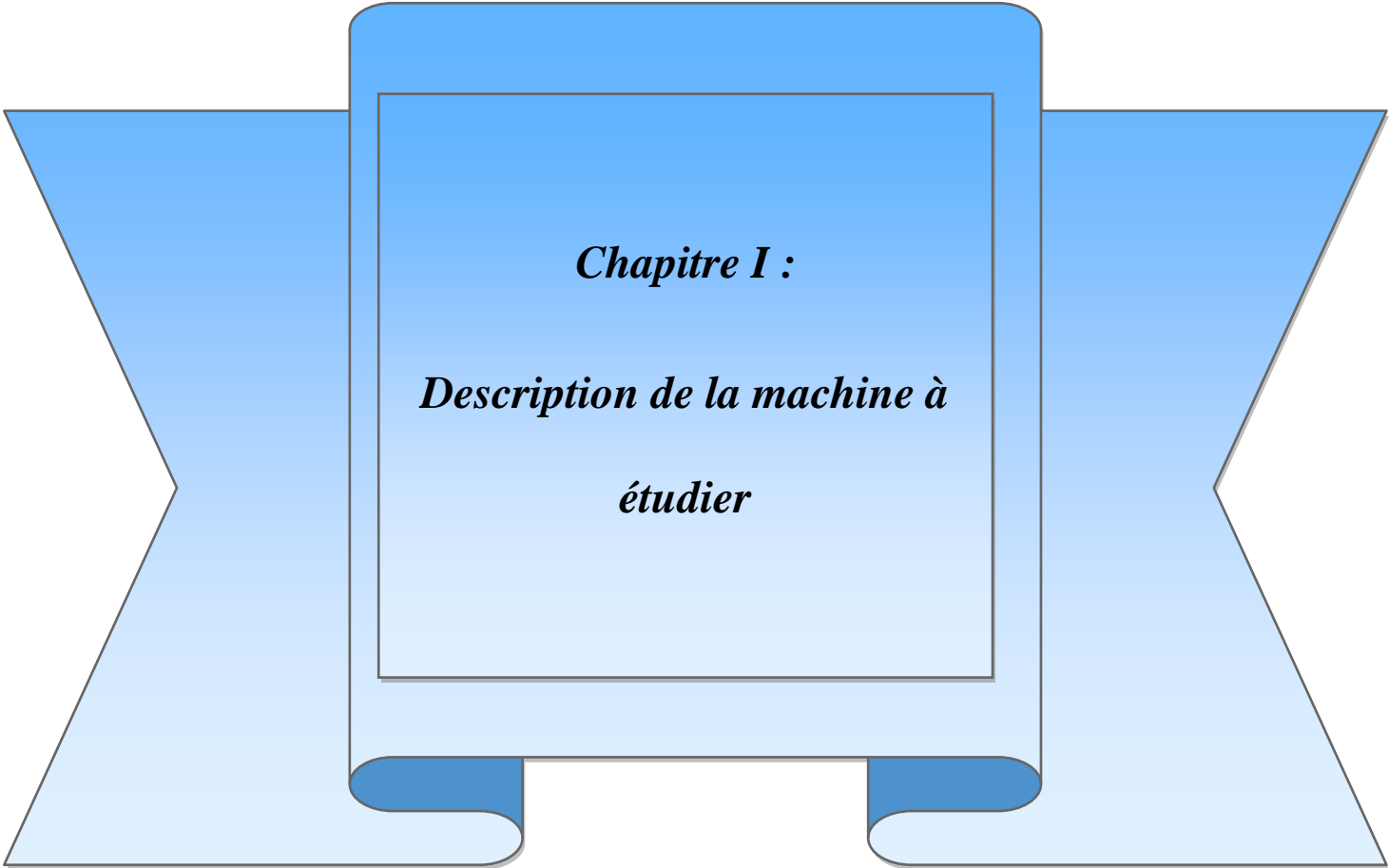
Parmi les indicateurs clés associés à la maintenance, la maintenabilité occupe une place stratégique : elle mesure la capacité à restaurer un équipement à un état de fonctionnement dans un délai minimal, avec des moyens maîtrisés.

Ce mémoire s'inscrit dans cette logique d'amélioration continue. Il porte sur l'étude de la maintenabilité de la machine FICEP TIPO B 254, un équipement central dans le processus de production de l'entreprise PROMECH Annaba. L'objectif principal est d'analyser les performances de maintenance de cette machine, d'identifier les points de blocage techniques et organisationnels, et de proposer des actions concrètes permettant de réduire les temps d'intervention, d'augmenter la disponibilité et de diminuer les coûts d'exploitation.

Le travail est structuré de manière à combiner une approche terrain avec un cadre théorique rigoureux. Après une présentation de la machine et de son historique de fonctionnement, l'étude s'appuie sur des concepts fondamentaux de la maintenabilité pour construire un diagnostic fiable. Une modélisation statistique des arrêts permet ensuite de quantifier les performances actuelles, avant de proposer un plan d'amélioration ciblé adapté au contexte opérationnel de l'entreprise.

Ce mémoire porte sur l'évaluation et l'amélioration de la maintenabilité de la machine **FICEP TIPO B254**, utilisée au sein de l'entreprise **PROMECH Annaba**. Il a pour objectif de mesurer, à partir des données opérationnelles, la performance actuelle de cette machine face aux pannes, puis de proposer des actions concrètes pour réduire les temps de réparation et de remise en service.

Le premier chapitre présente la machine et son contexte d'utilisation, avec l'analyse de son historique de pannes et le plan de maintenance préventive en place. Le second chapitre expose les concepts de base de la maintenabilité, les indicateurs clés et la méthode de modélisation statistique retenue. Le troisième chapitre valide l'ajustement d'une loi de Weibull aux temps mesurés (réparation et arrêt), et détermine les valeurs moyennes théoriques (MTTR et MTA). Le quatrième chapitre détaille un plan d'amélioration de la maintenabilité de la machine.



*Chapitre I :*  
*Description de la machine à*  
*étudier*

### I Introduction :

Ce premier chapitre vise à poser les bases concrètes de notre étude en présentant de manière détaillée la machine sélectionnée pour l'analyse de maintenabilité : la **FICEP TIPO B254**, installée au sein de l'entreprise PROMECH Annaba.

### II Présentation de l'entreprise :

#### II.1 Promech Annaba:

L'Unité PROMECH (Production Mécanique et de Chaudronnerie), est une entreprise algérienne spécialisée dans les services industriels, notamment la maintenance et l'installation des équipements de chaufferie, l'entreprise est située dans la zone industrielle d'El Hadjar, à Annaba, et fait partie de l'ENCC (Entreprise Nationale de Chaudronnerie et de Construction).

PROMECH Annaba se distingue par sa capacité à fabriquer des équipements industriels. Notamment, l'entreprise a présenté la première centrale à béton fabriqué en Algérie, démontrant ainsi son savoir-faire et son engagement envers le développement industriel du pays.



**Figure II.1:** Identité visuelle de PROMECH Annaba

### II.2 Historique et domaine d'activité :

- **1979** : Entrée en exploitation de l'usine, anciennement SNMÉTAL, elle a été créée en 1972.
- **1983** : Avec la restructuration, elle devient l'unité de mécanique lourde et chaudronnerie (UMLC) et est rattachée à l'ENCC, entreprise issue de la restructuration de la SNMÉTAL.
- **2001** : Avec la réorganisation du Groupe ENCC, l'UMLC, érigée en filiale, devient une société sous la dénomination de **PROMECHANNABA**, avec un capital social de 6.906.450.000,00 DA, dont les principales actions sont détenues par l'EPE ENCC (entreprise mère).
- **2016** : Depuis cette fusion par absorption de la filiale PROMECHANNABA par l'EPE ENCC, elle est devenue une unité.

### II.3 Principales mission de Promech Annaba :

L'Unité PROMECH Annaba a pour objet les études, la fabrication des biens d'équipement, l'expertise et l'assistance technique, la maintenance industrielle et le service après-vente dans les domaines d'activités portant sur les équipements industriels à savoir

- Équipement des travaux publics: Installations de Concassage, transporteur à bandes. Sauterelles et Centrales à Béton
- Equipements de stockage : Réservoirs sous - pression, Bacs, Cuves, Silos, Colonnes, Cheminées et autres.
- Charpente métallique et technologique : Hangars de stockage, Hangars industriels, Centrales électriques, Usines pétrochimiques, Cimenteries, Ouvrages d'art (Tabliers de ponts routiers et ferroviaires) etc...



**Figure II.2:** Cuve 100 m<sup>3</sup> pour stockage de carburant



**Figure II.3:** Atelier de Chaudronnerie

#### **II.4 Dénomination :**

##### **Groupe I METAL**

Entreprise Nationale de Charpente et Chaudronnerie « **E.N.C.C** »

Unité de Production Mécanique et de Chaudronnerie « **PROMECH ANNABA** »

PROMECH-ANNABA est une Unité de l'Entreprise Nationale de Charpente et Chaudronnerie

« **ENCC** » au capital social de 6.906.450.000.00 DA, du Groupe Industriel I.METAL. .

La société est implantée sur une superficie totale de 299.124,50 M<sup>2</sup> dont :

- Capacité de production : 10 000 T/An
- Implantée sur une superficie de : 299 124 M<sup>2</sup>
- Superficie bâtie : 55 598 M<sup>2</sup>
- Ateliers de production : 43 400 M<sup>2</sup>
- Aire de stockage pour matière première : 24 233 M<sup>2</sup>
- Aire de stockage pour produit fini : 48 685 M<sup>2</sup>

## II.5 Organigramme de l'entreprise

Un organigramme est une représentation visuelle de la structure interne d'une organisation. Il montre les différents départements ou unités de l'entreprise, ainsi que les relations hiérarchiques et les chaînes de commandement.

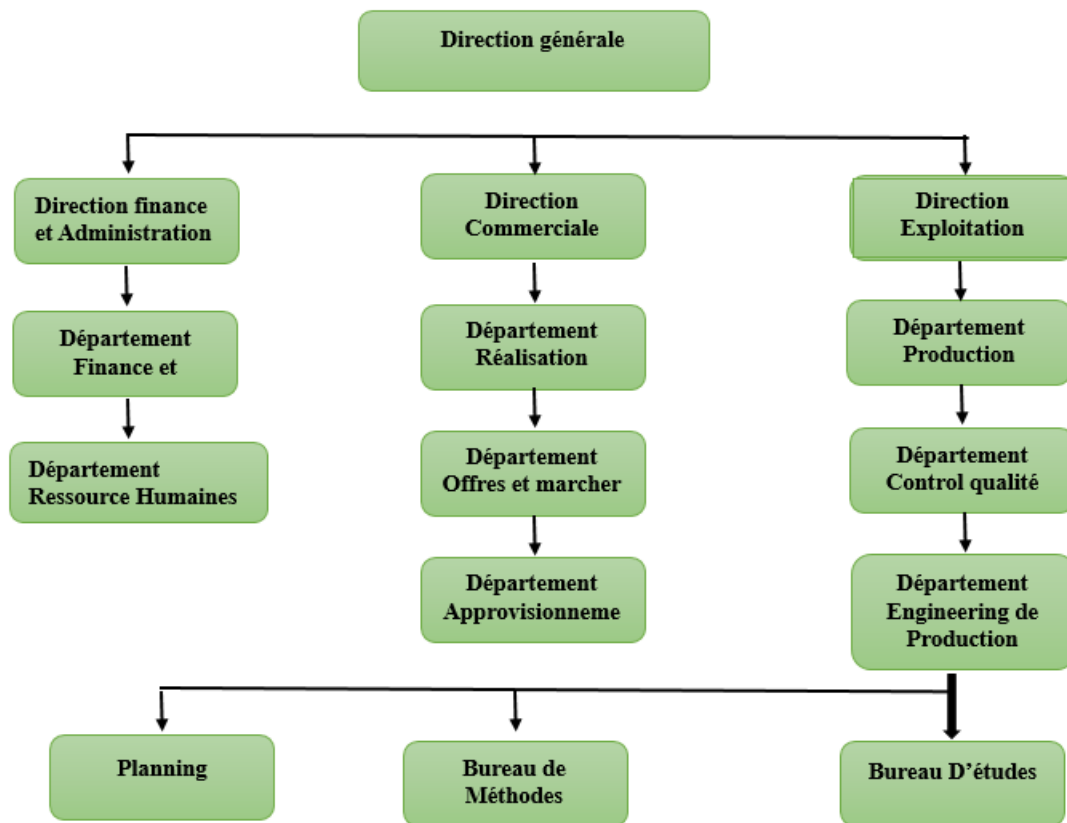


Figure II.4: Organigramme de l'entreprise



GROUPE IMETAL  
 المؤسسة الوطنية للهياكل المعدنية و النحاسية  
 Entreprise Nationale de Charpente et de Chaudronnerie  
**E.N.C.C Spa**  
 Société par actions au Capital Social de 6.906.450.000 DA

Unité **PROMECH**

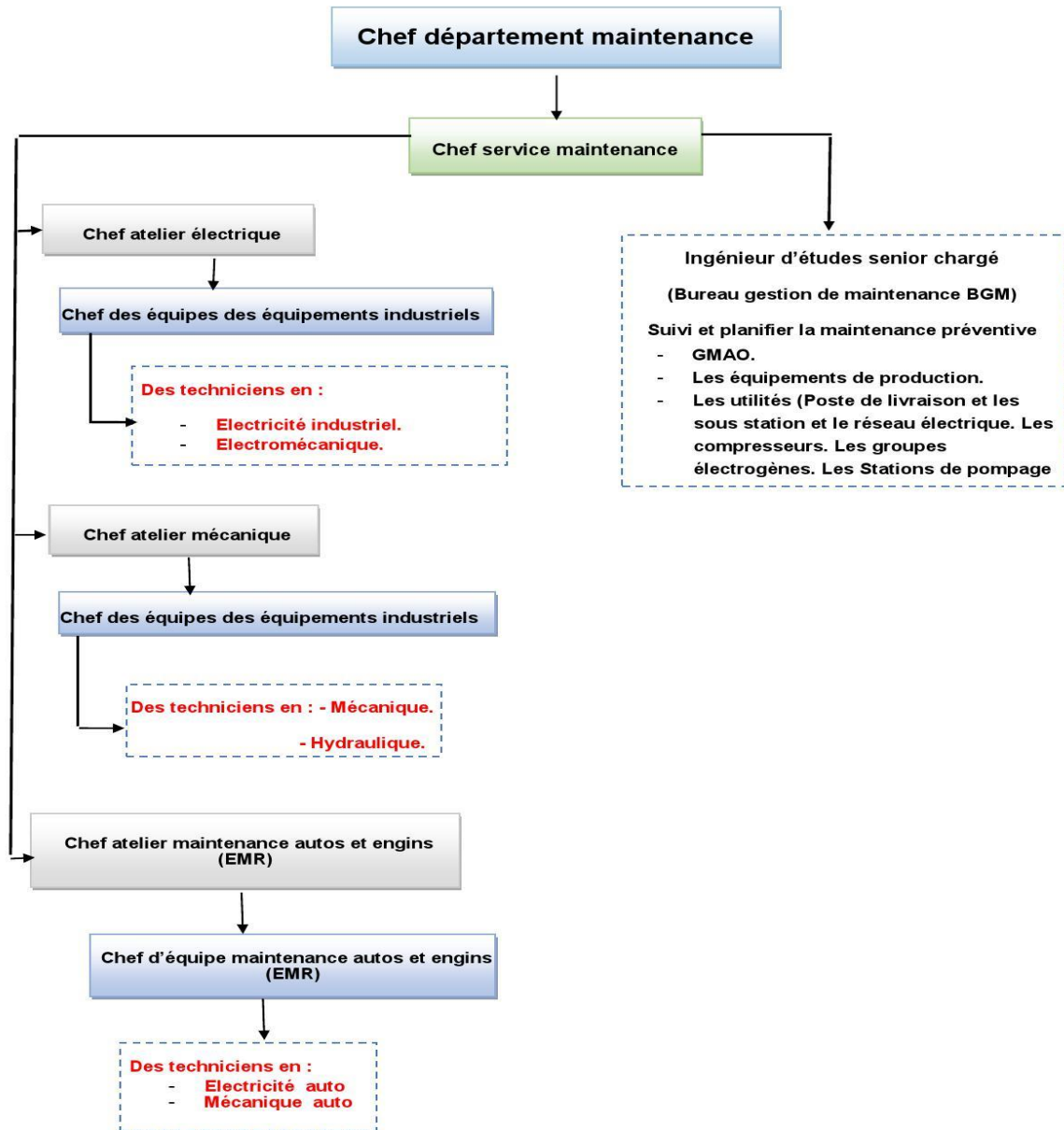


Figure II.5: Organigramme de département de maintenance

### II.6 Différents types de maintenances préventive appliquées à Promech :

- Visite systématique : les visites sont réalisées selon un calendrier préétabli, qui sera exprimé par une mesure (niveau d'huile, température) ou une appréciation visuelle. De plus, l'opérateur supervise l'état de la machine.
- Remplacement systématique.
- Visite en marche : la visite effectuée pendant le fonctionnement.

### II.7 Objectifs du service maintenance :

- Optimiser la fiabilité du matériel ;
- Assurer la qualité des produits ;
- Amélioration de la planification des tâches ;
- Garantir la sécurité des individus ;
- Mieux gérer les relations humaines.

## III Choix de la machine à étudier :

### III.1 Définition et Objectif de la Méthode PIEU

La méthode PIEU, développée par Yves Lavina, est une approche multicritère destinée à évaluer la criticité des équipements. Elle se base sur l'appréciation de quatre critères essentiels lorsque les historiques de panne ne sont pas disponibles. L'objectif principal est de quantifier la criticité en attribuant une note sur des échelles définies par des experts, selon les spécificités de chaque secteur industriel.

### III.2 Principe de la Méthode

La méthode repose sur un consensus entre experts qui remplissent une grille d'évaluation portant sur quatre axes :

- **P (Incidences des pannes)** : mesure l'impact technique, économique, environnemental et sécuritaire d'une panne sur l'équipement.
- **I (Importance)** : évalue la place de l'équipement dans le processus de production et l'impact de sa défaillance.

## Chapitre I : Description de la machine à étudier

- **E (État)** : indique l'état actuel de l'équipement, incluant son âge, son niveau d'usure et sa phase dans son cycle de vie (début, opération, fin ou pré-rebut).
- **U (Utilisation)** : reflète le degré d'exploitation de l'équipement.

Chaque critère est pondéré selon des valeurs comprises entre 0,1 (indiquant une importance maximale) et 3 (moins critique)

La criticité globale de l'équipement est alors calculée selon la formule :

Poids				
Critères	0.01	1	2	3
P – Incidence des pannes	Répercussions graves sur l'entité	Répercussions sur la qualité et génération	Corrections Des soins Possibles	Aucune répercussion sur la qualité des soins
I – Importance de l'équipement	Stratégique, pas de délestage sur d'autres équipements, sous traitance impossible	Important pas de délestage possible, sous-traitance possible	Secondaire, délestage possible	Equipement de secours
E – État	À rénover, à réformer	À réviser À	À surveiller	À L'état spécifié
U – Taux d'utilisation	Saturé	Élevé	Moyen	Faible

**Tableau III.1:** Evaluation de la criticité

$$\text{Criticité de l'équipement} = P \times I \times E \times U$$

### Interprétation des Résultats :

- Si  $CR < 1$ , l'équipement est considéré comme très critique.
- Si  $1 < CR < 10$ , il est moyennement critique.
- Si  $CR > 10$ , l'équipement est jugé moins critique.

### III.3 Application de la Méthode PIEU

Lors d'un audit de maintenance, la méthode PIEU permet de déterminer quels équipements nécessitent une attention prioritaire en matière de politique de maintenance. Par exemple, lors d'une visite sur le terrain avec le responsable de l'équipement et le chef de maintenance, on évalue chaque critère pour différents appareils.

Nous présentons dans ce qui suit, un extrait de ces tableaux :

Nous constatons que la Machine de **FICEP TIPO B254** est la très critique, elle fera alors l'objet de notre l'étude.

<b>Equipement 1 :Tipo B254 FICEP</b>		$CR=P \times I \times E \times U$ $0.01 \times 0.01 \times 3 \times 0.01 = 0.000003$ $CR > 10$ très critique
<b>Les critères</b>	<b>Note</b>	
<b>Incidences des pannes (P)</b>	<b>0.01</b>	
<b>Importance de l'équipement (I) :</b>	<b>0.01</b>	
<b>Etat de l'équipement (E) :</b>	<b>3</b>	
<b>Taux d'utilisation (U)</b>	<b>0.01</b>	
<b>Equipement2:OXYTOME 40HPC RS</b>		$CR=P \times I \times E \times U$ $1 \times 1 \times 2 \times 1 = 2$ $1 < CR = 2 > 10$ moyennement critique
<b>Les critères</b>	<b>Note</b>	
<b>Incidences des pannes (P)</b>	<b>1</b>	
<b>Importance de l'équipement (I) :</b>	<b>1</b>	
<b>Etat de l'équipement (E) :</b>	<b>2</b>	
<b>Taux d'utilisation (U)</b>	<b>1</b>	

<p><b>Equipement 3 : Perceuse horizontale p/chaîne boultonne</b></p> <table border="1" data-bbox="268 367 890 734"> <thead> <tr> <th>Les critères</th> <th>Note</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><b>Incidences des pannes (P)</b></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td><b>Importance de l'équipement (I) :</b></td> <td>2</td> </tr> <tr> <td><b>Etat de l'équipement (E) :</b></td> <td>3</td> </tr> <tr> <td><b>Taux d'utilisation (U)</b></td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>	Les critères	Note	<b>Incidences des pannes (P)</b>	1	<b>Importance de l'équipement (I) :</b>	2	<b>Etat de l'équipement (E) :</b>	3	<b>Taux d'utilisation (U)</b>	2	<p>CR=P x I x E x U  <math>1 \times 2 \times 3 \times 2 = 12</math>  CR&gt;10  moins critique</p>
Les critères	Note										
<b>Incidences des pannes (P)</b>	1										
<b>Importance de l'équipement (I) :</b>	2										
<b>Etat de l'équipement (E) :</b>	3										
<b>Taux d'utilisation (U)</b>	2										
<p><b>Equipement4:Liberty FICEP</b></p> <table border="1" data-bbox="284 920 879 1256"> <thead> <tr> <th>Les critères</th> <th>Note</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><b>Incidences des pannes (P)</b></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td><b>Importance de l'équipement (I) :</b></td> <td>2</td> </tr> <tr> <td><b>Etat de l'équipement (E) :</b></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td><b>Taux d'utilisation (U)</b></td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>	Les critères	Note	<b>Incidences des pannes (P)</b>	1	<b>Importance de l'équipement (I) :</b>	2	<b>Etat de l'équipement (E) :</b>	1	<b>Taux d'utilisation (U)</b>	2	<p>CR=P x I x E x U  <math>1 \times 2 \times 1 \times 2 = 4</math>  CR&gt;10  Moyennement critique</p>
Les critères	Note										
<b>Incidences des pannes (P)</b>	1										
<b>Importance de l'équipement (I) :</b>	2										
<b>Etat de l'équipement (E) :</b>	1										
<b>Taux d'utilisation (U)</b>	2										
<p><b>Equipement 5 :Fraiseuse Aléuseuse</b></p> <table border="1" data-bbox="236 1375 900 1724"> <thead> <tr> <th>Les critères</th> <th>Note</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><b>Incidences des pannes (P)</b></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td><b>Importance de l'équipement (I) :</b></td> <td>2</td> </tr> <tr> <td><b>Etat de l'équipement (E) :</b></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td><b>Taux d'utilisation (U)</b></td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>	Les critères	Note	<b>Incidences des pannes (P)</b>	1	<b>Importance de l'équipement (I) :</b>	2	<b>Etat de l'équipement (E) :</b>	1	<b>Taux d'utilisation (U)</b>	3	<p>CR=P x I x E x U  <math>1 \times 2 \times 1 \times 3 = 6</math>  <math>1 &lt; CR &gt; 10</math>  moyennement critique</p>
Les critères	Note										
<b>Incidences des pannes (P)</b>	1										
<b>Importance de l'équipement (I) :</b>	2										
<b>Etat de l'équipement (E) :</b>	1										
<b>Taux d'utilisation (U)</b>	3										

Equipement 6 : Tour voset Alpine		$CR = P \times I \times E \times U$ $2 \times 2 \times 3 \times 2 = 24$ $CR > 10$ moins critique
Les critères	Note	
Incidences des pannes (P)	2	
Importance de l'équipement (I) :	2	
Etat de l'équipement (E) :	3	
Taux d'utilisation (U)	2	

#### IV Description de la machine :



Figure IV.1: FICEP TIPO B254

##### IV.1 Généralités sur la machine TIPO B254 FICEP :

- **Modèle** : TIPO B254
- **Fabricant** : FICEP S.p.A., basée en Italie.
- **Année de fabrication** : 2015

La **FICEP TIPO B254** est une machine-outil CNC polyvalente conçue pour le traitement automatisé des plaques d'acier. Elle intègre plusieurs opérations essentielles telles que le poinçonnage, le perçage, le taraudage, le fraisage, le marquage et la découpe thermique, offrant ainsi une solution complète pour la fabrication de pièces en acier.



**Figure IV.2:** La machine de FICEP TIPO B254 à Promech Annaba

### **IV.2 Les composants de TIPO B254 FICEP :**

#### **IV.2.1 Banc de chargement à ripeurs (optionnel) :**

Un dispositif dédié au chargement et à l'alignement des tôles brutes. Il permet de positionner correctement le matériau avant le traitement.

#### **IV.2.2 Structure de support de la motrice porte-pinces :**

La structure qui supporte la motrice chargée d'alimenter le système porte-pinces, essentiel pour fixer la tôle pendant le poinçonnage et la découpe.

#### **IV.2.3 Éléments à rouleaux :**

Un système de rouleaux qui facilite le transport et le positionnement de la tôle le long de la ligne de production.

#### **IV.2.4 Unité de poinçonnage :**

La section de la machine dédiée au poinçonnage, permettant de perforer ou de former la tôle en appliquant une force importante via un poinçon.

### **IV.2.5 Dispositif de changement des outils de poinçonnage :**

Un système automatisé ou semi-automatisé permettant de remplacer rapidement les outils de poinçonnage pour adapter la machine à différents types d'opérations.

### **IV.2.6 Unité de perçage (optionnelle)**

Une unité additionnelle qui permet de percer la tôle pour créer des trous ou préparer des fixations, complétant ainsi les opérations de poinçonnage.

### **IV.2.7 Dispositif de changement des outils de perçage (optionnel)**

Un mécanisme permettant d'échanger les forets ou outils de perçage, afin d'adapter l'unité aux différents diamètres et types de perçage.

### **IV.2.8 Marqueuse à écriture à 38 positions (optionnelle)**

Un dispositif de marquage capable de réaliser des inscriptions sur la tôle à 38 positions différentes, utile pour la traçabilité ou le contrôle qualité.

### **IV.2.9 Magasin d'outils de poinçonnage**

Un espace de stockage intégré pour ranger et gérer les différents outils de poinçonnage utilisés par la machine.

### **IV.2.10 Dispositif de nettoyage des copeaux avec brosse (optionnel)**

Un système de nettoyage qui utilise des brosses pour éliminer les copeaux et débris issus du poinçonnage, assurant ainsi une bonne visibilité et sécurité sur la ligne.

### **IV.2.11 Système d'aspiration des copeaux de perçage (option) :**

Un système d'extraction qui recueille les copeaux générés par l'unité de perçage, contribuant à un environnement de travail plus propre

### **IV.2.12 Unité de coupe au plasma :**

La section de la machine dédiée à la découpe thermique par plasma, permettant de réaliser des coupes nettes et précises dans la tôle.

### **IV.2.13 Torche pour oxycoupage (optionnelle) :**

Une torche supplémentaire destinée à l'oxycoupage, une autre technique de découpe thermique, qui offre une alternative ou un complément à la découpe plasma.

### **IV.2.14 Système d'aspiration des fumées pour l'unité de coupe thermique (optionnel)**

Un dispositif d'extraction qui évacue les fumées et les particules générées lors des opérations de coupe thermique, améliorant ainsi la qualité de l'air dans l'atelier.

### **IV.2.15 Installation hydraulique**

L'ensemble des composants hydrauliques (pompes, vérins, tuyauterie) qui assurent l'alimentation en fluide pour les mouvements et les actions mécaniques de la machine.

### **IV.2.16 Installation pneumatique**

Le système qui utilise l'air comprimé pour activer certains organes ou fonctions, comme le déplacement des pinces et le contrôle de certaines opérations.

### **IV.2.17 Installation électrique**

L'ensemble des circuits et composants électriques qui alimentent la machine et assurent son pilotage, y compris les dispositifs de sécurité et de commande.

### **IV.2.18 Unité de commande numérique (CNC)**

Le cœur du système de contrôle qui permet de programmer, coordonner et exécuter les différents cycles de travail de la machine via une interface informatique.



**Figure IV.3:** La commande numérique CNC

### **IV.2.19 Dispositif de déchargement des pièces finies (optionnel)**

Un système automatisé qui permet de retirer les pièces traitées de la machine une fois le cycle terminé, facilitant ainsi la manutention post-production.

### **IV.2.20 Convoyeur automatique de déchets de poinçonnage (optionnel)**

Un système de transport destiné à évacuer automatiquement les déchets générés lors du poinçonnage, améliorant l'efficacité du nettoyage et la continuité de la production.

### **IV.2.21 Convoyeur automatique de déchets de coupe thermique (optionnel)**

Un dispositif similaire destiné à l'évacuation des déchets issus des opérations de coupe thermique.

### **IV.2.22 Convoyeur automatique pour pièces 500 x 500 (optionnel)**

Un convoyeur dédié au transport des pièces finies de dimensions spécifiques (500 x 500 mm), optimisant le flux de production.

#### **IV.2.23 Évacuateur de copeaux pour perceuse (optionnel)**

Un système d'extraction conçu pour éliminer les copeaux générés lors des opérations de perçage, assurant ainsi un environnement de travail propre et sécuritaire.

#### **IV.3 Caractéristiques principales :**

Avant d'aborder l'analyse de la maintenabilité, il est important de présenter les principales caractéristiques techniques de la machine TIPO B254, afin de mieux comprendre son fonctionnement, sa structure et les contraintes liées à sa maintenance.

**Tableau IV.1:** Caractéristiques de la machine

<b>Dimensions max. de la tôle [mm]</b>	2540x6000
<b>Force nominale de poinçonnage [kN]</b>	1000
<b>Outils de poinçonnage [nb]</b>	4
<b>Diamètre max. de poinçonnage [mm]</b>	32
<b>Épaisseur max. de poinçonnage [mm]</b>	25
<b>Têtes de perçage [nb]</b>	1
<b>Outils de perçage par tête [nb]</b>	4
<b>Diamètre max. de perçage [mm]</b>	40
<b>Épaisseur max. de perçage [mm]</b>	100
<b>Puissance de la broche [kW]</b>	20,1
<b>Vitesse max. de la broche [tr/min]</b>	4000
<b>Torches à plasma [nb max.]</b>	2
<b>Chalumeaux d'oxycoupage [nb max.]</b>	2
<b>Poids de la machine [kg]</b>	24000

#### **V Historique des arrêts des trois dernières années:**

Afin d'établir un diagnostic précis, nous mènerons d'abord l'historique des arrêts de la machine sur les trois dernières années afin d'identifier les tendances et les causes principales.

**Tableau V.1:** le fiche historique de la machine

N°	Type de maintenance	Catégorie de maintenance	Travaux à effectuer	Date de demande	Date de réalisation	Temps d'intervention	Temps d'arrêt
1	Corrective	Corrective curative	Remplacement d'un module défectueux	10/01/2023 08:00	10/01/2023 10:00	1:45	2 :00
2	Corrective	Corrective curative	Réglage des connecteurs électriques	31/01/2023 09:00	31/01/2023 11:00	1:15	1 :30
3	Préventive	Préventive systématique	Inspection générale, vérification et graissage des organes mobiles	21/02/2023 08:30	21/02/2023 10:30	1:45	2 :00
4	Corrective	Corrective curative	Réparation d'un défaut de programmation CNC	14/03/2023 09:15	14/03/2023 11:15	1:30	2 :00
5	Préventive	Préventive systématique	Réalignement et recalibrage de la table de travail	04/04/2023 10:00	04/04/2023 11:30	0 :45	1 :00
6	Corrective	Corrective palliative	Ajustement temporaire de la CNC suite à une anomalie	25/04/2023 08:45	25/04/2023 10:15	1 :15	1 :30
7	Préventive	Préventive systématique	Nettoyage complet et inspection approfondie des filtres	16/05/2023 09:00	16/05/2023 11:00	0 :45	1 :00

## Chapitre I : Description de la machine à étudier

8	Corrective	Corrective curative	Réparation du système d'aspiration	06/06/2023 08:30	06/06/2023 10:00	1 :15	1 :30
9	Préventive	Préventive conditionnelle	Réglage de la commande numérique et vérification de la calibration	27/06/2023 09:00	27/06/2023 11:00	1:30	2 :00
10	Corrective	Corrective curative	Ajustement des pressions dans le circuit hydraulique	18/07/2023 08:00	18/07/2023 10:00	1:45	2 :00
11	Préventive	Préventive conditionnelle	Vérification des niveaux d'huile et nettoyage des filtres	08/08/2023 09:00	08/08/2023 10:30	1 :15	1 :30
12	Corrective	Corrective curative	Remplacement d'une pièce de roulement usée	29/08/2023 08:30	29/08/2023 10:00	0 :45	1 :30
13	Corrective	Corrective curative	Réparation du système de refroidissement	19/09/2023 09:00	19/09/2023 11:00	1:30	2 :00
14	Corrective	Corrective palliative	Ajustement temporaire du système de vitesse	10/10/2023 08:30	10/10/2023 10:30	1:30	2 :00
15	Préventive	Préventive systématique	Graissage complet et révision générale des organes mécaniques	31/10/2023 09:00	31/10/2023 10:00	0:45	1 :00

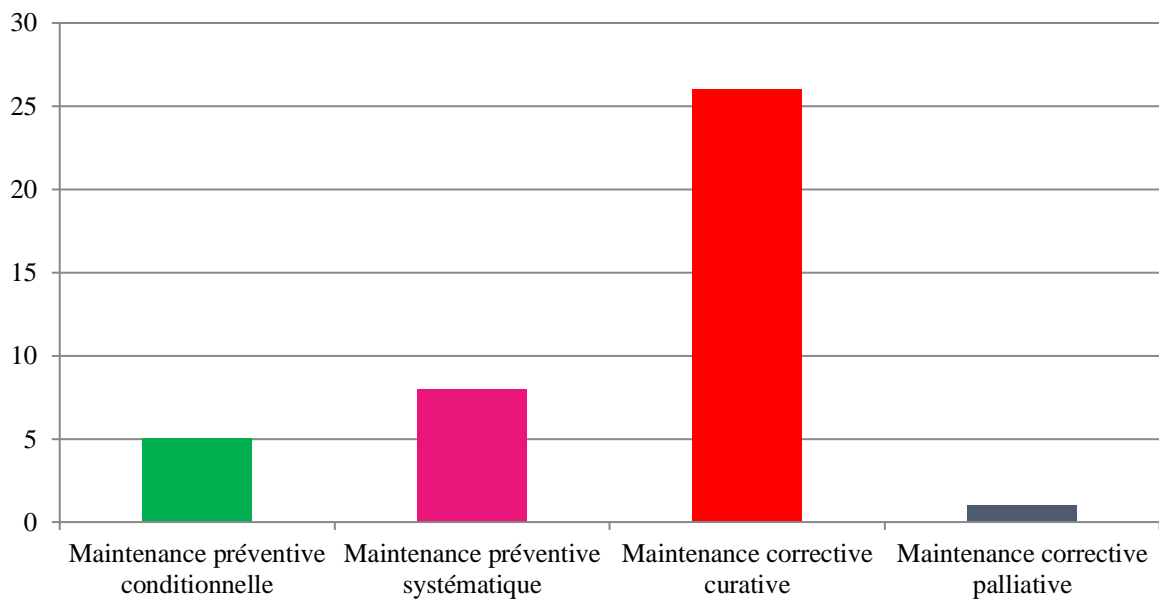
## Chapitre I : Description de la machine à étudier

16	Préventive	Préventive systématique	Réglage des paramètres de la CNC et recalibrage	21/11/2023 08:30	21/11/2023 10:00	1 :15	1 :30
17	Corrective	Corrective curative	Réparation du module d'affichage défectueux	12/12/2023 09:00	12/12/2023 10:00	0:30	1 :00
18	Corrective	Corrective curative	Changement d'une fin de course défectueux	14/01/2024 10 :00	14/01/2024 14 :00	03 :00	04 :00
19	Corrective	Corrective curative	Programmation CNC (réglage complet du cycle)	04/02/2024 12 :00	04/02/2024 14 :30	01 :30	02 :30
20	Corrective	Corrective curative	Réglage de la matrice et paramétrage des forets	06/03/2024 08 :30	06/03/2024 12 :30	02 :00	04 :00
21	Corrective	Corrective curative	Programmation CNC	31/03/2024 09 :30	31/03/2024 11 :30	01:00	02 :00
22	Préventive	Préventive systématique	Graissage porte-outil	16/04/2024 10 :00	16/04/2024 12 :00	01:00	02 :00
23	Corrective	Corrective curative	Réparation de la fin de course de la table	09/05/2024 10 :00	09/05/2024 12 :00	01:00	02 :00
24	Corrective	Corrective curative	Alignement de la matrice	26/05/2024 10 :00	26/05/2024 11 :30	01:00	01 :30
25	Corrective	Corrective curative	Réparation électrique	13/06/2024 10 :30	13/06/2024 12 :00	01:00	01 :30
26	Préventive	Préventive conditionnelle	Changement anti-retour oxygène	24/06/2024 10 :30	24/06/2024 12 :30	01:30	02 :00

## Chapitre I : Description de la machine à étudier

27	Corrective	Corrective curative	Réglage de la table	08/07/2024 13:00	08/07/2024 15:00	01:00	02 :00
28	Corrective	Corrective curative	Réglage des galets	18/07/2024 10:30	18/07/2024 12:00	01:00	01.30
29	Corrective	Corrective curative	Réglage fin de course de la table	10/09/2024 10 :30	10/09/2024 12 :00	01:00	01 :30
30	Corrective	Corrective curative	Remplacement de capteur	29/09/2024 10 :30	29/09/2024 12 :00	01:00	01 :30
31	Corrective	Corrective curative	Réglage des glissières	16/10/2024 09 :00	16/10/2024 10 :30	01:00	01 :30
32	Préventive	Préventive systématique	Graissage porte-outil	10/11/2024 09:00	10/11/2024 10 :00	00 :30	01 :00
33	Préventive	Préventive conditionnelle	Changement anti-retour gaz	03/12/2024 09:00	03/12/2024 11:00	01:00	02 :00
34	Corrective	Corrective curative	Réparation de la fin de course de la table	19/12/2024 08:45	19/12/2024 10:15	01 :00	1 :30
35	Corrective	Corrective curative	Remplacement de contacts électriques défectueux	25/12/2024 09:00	25/12/2024 10 :30	01 :15	1 :30
36	Préventive	Préventive conditionnelle	Vérification et recalibrage des paramètres hydrauliques	15/01/2025 08:30	15/01/2025 10:00	0:45	1 :30
37	Corrective	Corrective curative	Réglage du système d'aspiration des copeaux	05/02/2025 09:00	05/02/2025 10:30	0 :45	1 :30

38	Corrective	Corrective curative	Réparation d'un dysfonctionnement des capteurs	26/02/2025 08:30	26/02/2025 10:00	0 :45	1 :30
39	Corrective	Corrective palliative	Ajustement rapide suite à une anomalie de programmation	19/03/2025 09:00	19/03/2025 10:30	0 :30	1 :30
40	Préventive	Préventive systématique	Inspection globale, nettoyage complet et vérification de sécurité	09/04/2025 08:30	09/04/2025 10:30	0 :30	1 :00



**Figure V.1:** Diagramme présentant la répartition des interventions par type

### V.1 Le nombre et le type de pannes/défaillances sur 3 ans :

Ce tableau ci-dessous récapitule le nombre et les types de pannes/défaillances observés au cours de cette période, permettant une analyse quantitative et qualitative approfondie.

Tableau V.2: Analyse statistique des défaillances et des fréquences correspondantes

<b>Panne spécifique</b>	<b>Fréquence (nb d'interventions)</b>	<b>Causes précises</b>	<b>Classification / Type</b>
<b>Fin de course défectueuse</b>	5	Usure du mécanisme, défaut de détection, mauvais réglage des interrupteurs de fin de course	Mécanique – Intrinsèque
<b>Réglage et alignement de la matrice</b>	6	Déviaton d'alignement due à l'usure des glissières et guides, nécessité de recalibrage régulier	Mécanique – Intrinsèque
<b>Erreurs de programmation CNC / paramétrage</b>	5	Erreurs logicielles, dérives de paramètres, ajustements temporaires pour rétablir le cycle CNC	Électronique – Extrinsèque (palliative/curative)
<b>Dysfonctionnement électrique / électronique</b>	7	Usure des composants (contacts, modules d'affichage, câblages), corrosion, interférences électromagnétiques	Électrique – Extrinsèque
<b>Capteur défectueux</b>	2	Défaillance due à l'usure ou aux conditions d'exploitation (vibrations, températures) nécessitant un	Électronique – Extrinsèque

		remplacement	
<b>Dysfonctionnements hydrauliques</b>	3	Variations de pression, fuites, contamination ou usure des joints dans le circuit hydraulique	Fluidique – Intrinsic/Extrinsic (selon contexte)
<b>Problèmes de système d'aspiration ou de refroidissement</b>	3	Obstructions dans les conduits, défaillance des ventilateurs, accumulation de copeaux perturbant le flux d'air	Mécanique/Fluidique – Extrinsic
<b>Remplacement de module ou pièce critique</b>	4	Défaillance majeure d'un module (panne de commande, défaut du capteur) due à une usure avancée ou défaut de fabrication	Mécanique/Électronique – Intrinsic

## VI Plan préventif suivi :

Pour compléter ce diagnostic, nous présenterons ensuite le plan de maintenance préventive actuellement en place.

**Tableau VI.1:** Plan préventif suivi

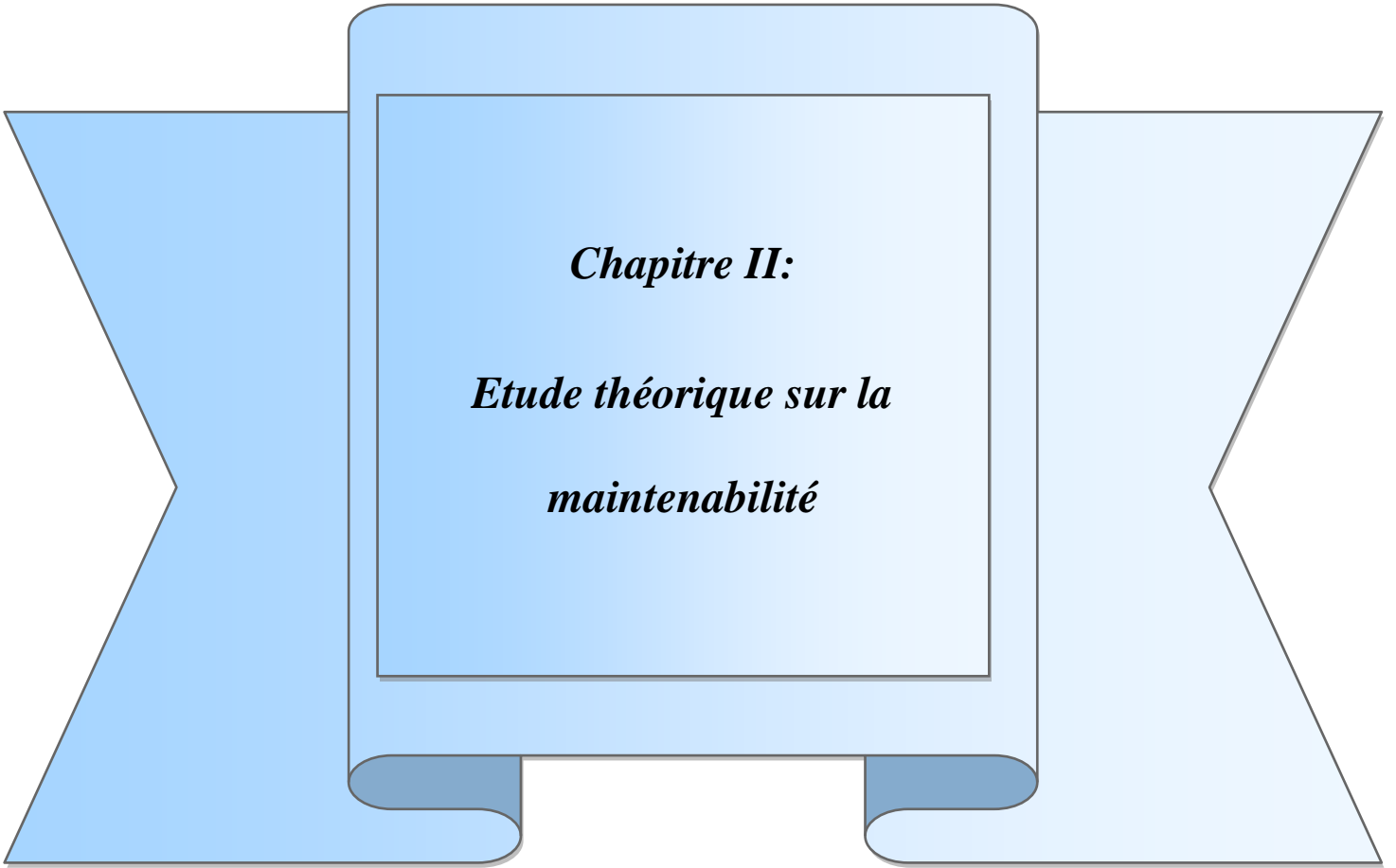
Intervalle	Objectifs	Tâches principales	Durée d'intervention	Délai d'arrêt	Période de réalisation
Quotidienne	Surveillance immédiate et prévention des anomalies	-Inspection visuelle des zones critiques	15 à 30 minutes	15 à 30 minutes (arrêt partiel, sans	Tous les jours de production

		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Vérification rapide des niveaux de lubrification et fluides</li> <li>-Nettoyage léger des filtres et conduits</li> </ul>		impact majeur)	
<b>Hebdomadaire</b>	Détection précoce des premiers signes de dégradation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrôle détaillé des capteurs et fin de course</li> <li>- Vérification des réglages (CNC, hydraulique et électrique)</li> <li>- Contrôle du système de refroidissement et d'aspiration</li> </ul>	1 à 2 heures	1 à 2 heures (arrêt complet pour tests et ajustements)	Une fois par semaine
<b>Mensuelle</b>	Prévenir l'accumulation de saletés et les dérives	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nettoyage complet des filtres, conduits d'aspiration et des ventilateurs</li> <li>- Calibration des capteurs et vérification des réglages CNC</li> <li>- Vérification et remplissage des fluides</li> </ul>	3 à 4 heures	3 à 4 heures (temps d'arrêt total de la machine)	Une fois par mois

<b>Semestrielle</b>	Audit global des systèmes critiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inspection approfondie des systèmes mécaniques (fin de course, guides, matrices)</li> <li>- Test et vérification des circuits électriques, hydrauliques et pneumatiques</li> <li>- Remplacement préventif des composants usés</li> </ul>	6 à 8 heures (soit une demi-journée complète)	Une demi-journée complète (arrêt total, planifié en période de faible activité)	Tous les 6 mois
<b>Annuelle</b>	Révision complète et remise à neuf du système	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Démontage partiel pour inspection interne</li> <li>- Nettoyage en profondeur</li> <li>- Recalibrage complet des systèmes</li> <li>- Mise à jour du logiciel CNC et formation du personnel</li> </ul>	1 à 2 jours complets	1 à 2 jours complets (arrêt complet pour maintenance lourde)	Annuellement (planifié pendant une période de faible production)

## **VII. Conclusion :**

Ce premier chapitre a permis de dresser un état des lieux complet de la machine TIPO B254 au sein de l'entreprise PROMECH Annaba. À travers la méthode PIEU, le choix de cet équipement a été objectivement justifié. L'étude de son historique de pannes et la présentation de son plan de maintenance préventive ont permis d'identifier les principales sources d'arrêt et les pratiques en place. Ces éléments constituent une base solide pour la modélisation de la maintenabilité et la proposition d'actions d'amélioration adaptées dans les chapitres suivants.



### I Introduction:

Le concept de maintenabilité doit tenir compte des caractéristiques de conceptions de fabrication et de mise en place influençant l'aptitude du dispositif à satisfaire à certaines exigences d'utilisations, est habituellement mesuré en terme de durée des opérations de maintenance, d'exigences de maintenance préventive.

### II Notion de base :

#### II.1 Définition :

##### II.1.1 Maintenabilité (Norme américaine MIL-STD-721C) :

Mesure de l'aptitude d'un dispositif (item) à être maintenu ou remis dans des conditions spécifiées lorsque la maintenance de celui-ci est réalisée par des agents ayant les niveaux spécifiés de compétences, utilisant les procédures prescrites, à tous les niveaux prescrits de maintenance et de réparation.

##### II.1.2 Maintenabilité (NF X60.100) :

Dans des conditions données, la maintenabilité est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits. Maintenabilité = être rapidement dépanné.

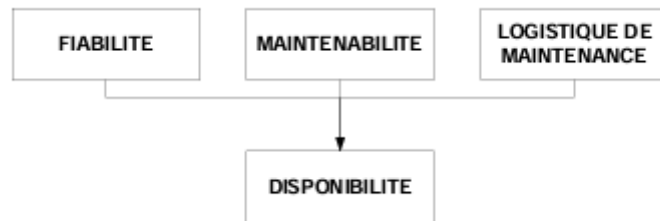
La maintenabilité est conditionnée par la conception de l'équipement :

- Outils nécessaires au diagnostic de la panne incorporés ou non et à la réparation (dont dispositif de Maintenance conditionnelle)
- Contrôle du bon fonctionnement (points de mesure, afficheurs, etc.)
- Documentation appropriée (dont modes opératoires)
- Réparation ou mesure en marche (isoler certains circuits, etc.)
- Accessibilité, démontabilité (détrompeur, repérage, outils communs), interchangeabilité
- Manutention simple (potence intégrée, rails, etc.)

**II.2 Différence entre maintenabilité et maintenance :**

La maintenabilité est une caractéristique du système et est définie en termes de probabilité. En revanche, la maintenance est une action réalisée par les techniciens de maintenance sur le système pour le remettre en état.

**II.3 La maintenabilité et la disponibilité :**



**Figure II.1:** Composantes de la disponibilité d’un équipement.

Il met en évidence:

- Que la maintenabilité est un des leviers d’action pour améliorer la disponibilité et donc la productivité d’un équipement.
- Que la fiabilité et la maintenabilité sont 2 notions parallèles de même importance (et dont les démarches d’analyse sont semblables).

**II.4 Les facteurs de la maintenabilité :**

Pour bien cerner ce qui conditionne la facilité et la rapidité d’intervention sur un équipement, il convient de rappeler les principaux facteurs qui influencent directement la maintenabilité d’un système industriel.

**Tableau II.1:** Principaux facteurs influençant la maintenabilité

Facteurs liés à l’EQUIPEMENT	Facteurs liés au CONSTRUCTEUR	Facteurs liés à la MAINTENANCE
-documentation - aptitude au démontage - facilité d'utilisation	-Conception - qualité du service après-vente - facilité d'obtention des pièces de rechange - coût des pièces de rechange	-préparation et formation des personnels - moyens adéquats - études d'améliorations (maintenance amélioratives)

### II.5 Objectifs de la maintenabilité :

- ❖ Réduction du Temps d'Intervention (MTTR - Mean Time To Repair) : Permettre des interventions rapides et efficaces.
- ❖ Facilitation de l'Accès et de la Réparation : Concevoir les équipements pour que les critiques des composants soient facilement accessibles.
- ❖ Optimisation des ressources : Minimiser le coût des opérations de maintenance en particulier la main-d'œuvre et les outils nécessaires.
- ❖ Amélioration de la Disponibilité : Augmenter le taux de disponibilité d'un système en particulier les temps d'arrêt dus aux réparations.
- ❖ Normalisation et documentation : Mettre en place des procédures claires et utiliser des composants standardisés pour faciliter les réparations.

## III Maintenabilité intrinsèque et actions d'améliorations :

### III.1 Maintenabilité intrinsèque :

La maintenabilité intrinsèque du bien intègre les dispositions de conception l'actif qui facilite sa maintenance (taille, poids, disposition, modularité...). Ces dispositions sont peu influencées par le lieu, l'utilisation de la machine, les intervenants de maintenance et leur organisation.

### III.2 Les critères de la maintenabilité intrinsèque :

Les critères à considérer dans la construction de la maintenabilité intrinsèque sont :

#### III.2.1 Modularité et interchangeabilité :

La conception modulaire d'un équipement repose sur l'idée de la simplification de sa fabrication, mais aussi de la simplification de sa maintenance grâce à l'interchangeabilité des modules. La facilité de l'interchangeabilité (carte électronique par exemple) est un facteur favorisant le transfert de tâches vers les opérations dans le cas TPM. Le module de remplacement peut provenir.

D'un stock interne (module neuf ou remis en stock après réparation) ;

D'un stock externe (module ou composant tenu en stock chez le fournisseur) ;

Du bien lui-même (par échange de deux éléments constitutifs, redondance) ;

D'un bien identique hors service ou déclassé (cannibalisation) ;

D'un bien différent comportant le même module ;

D'un atelier de fabrication. Dans le cas d'un composant, il doit être fabriqué dans le respect des spécifications et des tolérances normalisées (joint d'étanchéité, coussinet de palier, etc.).

Cela offre une gamme large de solutions pour organiser une intervention. L'interchangeabilité suppose le respect des normes (ajustements, filetages, produits, lubrifiants, raccords, connexions, etc.).

### III.2.2 Standardisation :

Elle vise à la simplification par réduction aussi bien en matière de fabrication que de logistique et de maintenance. En maintenance, elle s'exerce à tous les niveaux techniques et commerciaux, en permettant la réduction des stocks aussi bien que la rapidité et la simplicité des interventions.

### III.2.3 Accessibilité :

Elle est caractérisée par la rapidité avec laquelle un élément peut être atteint. Elle doit être d'autant mieux maîtrisée que la fréquence probable des opérations de maintenance est grande. C'est le cas des filtres, des graisseurs, des points de réglage, de mesure, de surveillance, etc. Dans certains cas, l'accessibilité peut être définie sur des bases réglementaires touchant à la sécurité (exemple : échafaudage) ou ergonomiques (dimensions de l'ouverture d'un « trou d'homme » ou d'une trappe de visite).

### III.2.4 Aptitude à la pose et à la dépose :

Elle concerne les modules qui nécessitent un échange standard en préventif ou en cas de défaillance. Elle concerne les liaisons à supprimer pour isoler le module de son ensemble.

### III.2.5 Démontrabilité :

Elle concerne l'accès plus ou moins facile et plus ou moins rapide à des composants potentiellement « fragiles » et inaccessibles lorsque le sous-ensemble est monté. Elle se caractérise par des manœuvres rapides (portes de visites et capots avec verrous et charnières)

demandant un minimum d'outils standards et facilitées par une documentation efficace (perspective éclatée montrant le fractionnement des éléments).

### **III.2.6 Détectabilité :**

Elle concerne la réduction des temps de localisation et de diagnostic, principalement pour les PC des équipements. Un logiciel de recherche et de localisation des défauts, les outils d'aide au diagnostic, une supervision, mais aussi un simple voyant ou le repérage des câbles et des points de mesure sont autant d'éléments de réduction des temps d'investigation. La réalisation d'une AMDEC amène le concepteur à évaluer le critère « détectabilité » et à proposer des solutions si nécessaire.

### **III.3 Amélioration de la maintenabilité intrinsèque :**

#### **III.3.1 Intégrer la maintenabilité dans la phase de conception (Design for Maintainability DFM) :**

La conception pour la maintenabilité (DfM) est la première étape d'un programme de maintenance efficace et durable, reliant les objectifs de maintenance et les résultats souhaités au processus de conception. Il s'agit de la pratique consistant à intégrer les considérations d'exploitation et de maintenance dans la planification et la conception de projets afin d'obtenir l'efficacité, la sécurité et l'économie des tâches de maintenance pendant la durée de vie d'une installation.

#### **III.3.2 Utiliser des simulations et analyses de maintenabilité :**

Comme :

- L'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) est une méthode d'analyse préventive utilisée dans le domaine industriel pour identifier les modes de défaillance potentiels d'un système, évaluer leurs impacts, et définir des actions correctifs..

-L'arbre de défaillance ;Les arbres de défaillances sont utilisés dans l'ingénierie de sûreté des industries « à risque » et peuvent être utilisés comme un outil d'évaluation de la conception, ils permettent d'identifier les scénarios conduisant à des accidents dans les phases amont du cycle de vie d'un système et peuvent éviter des changements de conception autant plus coûteux qu'ils sont tardifs. Ils peuvent aussi être utilisés comme un outil de diagnostic,

prévoyant la ou les défaillances des composants la ou les plus probables lors de la défaillance d'un système.

### **III.3.3 Mettre en place des formations spécifiques pour les équipes de maintenance :**

Les équipes de maintenance se doivent de disposer maintenant d'un large éventail de connaissances, non seulement les compétences techniques, mais également la prise en compte des coûts, la planification des interventions et le choix d'une politique de maintenance. Ces modifications structurelles impliquent des formations intégrant l'ensemble de ces aspects.

## **IV Maintenabilité extrinsèque et actions d'améliorations :**

### **IV.1 Maintenabilité extrinsèque :**

est constituée des autres conditions qui sont à réaliser pour maintenir le bien dans son état spécifié .Elle va intégrer l'ensemble des tâches à réaliser par les intervenants pour s'approcher de la machine avant l'intervention, puis la remonter après l'intervention, la tester et quitter les lieux. L'organisation du travail prend donc une part importante dans la maintenabilité extrinsèque, mais les solutions techniques (l'environnement physique immédiat ou non de la machine) et leurs répercussions sont aussi très importantes.

### **IV.2 Les critères de la maintenabilité extrinsèque :**

#### **IV.2.1 Organisation de la Maintenance :**

La gestion de maintenance englobe toutes les activités liées à la planification, à l'organisation, à l'exécution et au suivi des opérations de maintenance préventive, corrective et prédictive.

#### **IV.2.2 Disponibilité des Ressources et Moyens :**

La disponibilité des ressources fait référence à la mesure dans laquelle les ressources nécessaires (telles que le personnel, l'équipement, le matériel, le temps et le budget) sont accessibles et prêtes à être utilisées dans un projet, un processus ou une organisation .

#### **IV.2.3 Qualification et Formation du Personnel :**

Doté d'une bonne condition physique, le technicien de maintenance est rigoureux et méthodique tout en ayant le goût du contact. Il sait analyser une situation, prendre des décisions et intervenir rapidement en cas de panne.

### IV.2.4 Conditions Environnementales :

Influence de la température, de l'humidité, de la poussière et des vibrations sur la maintenabilité et accessibilité et sécurité des zones d'intervention (zones confinées, hauteurs, etc.).

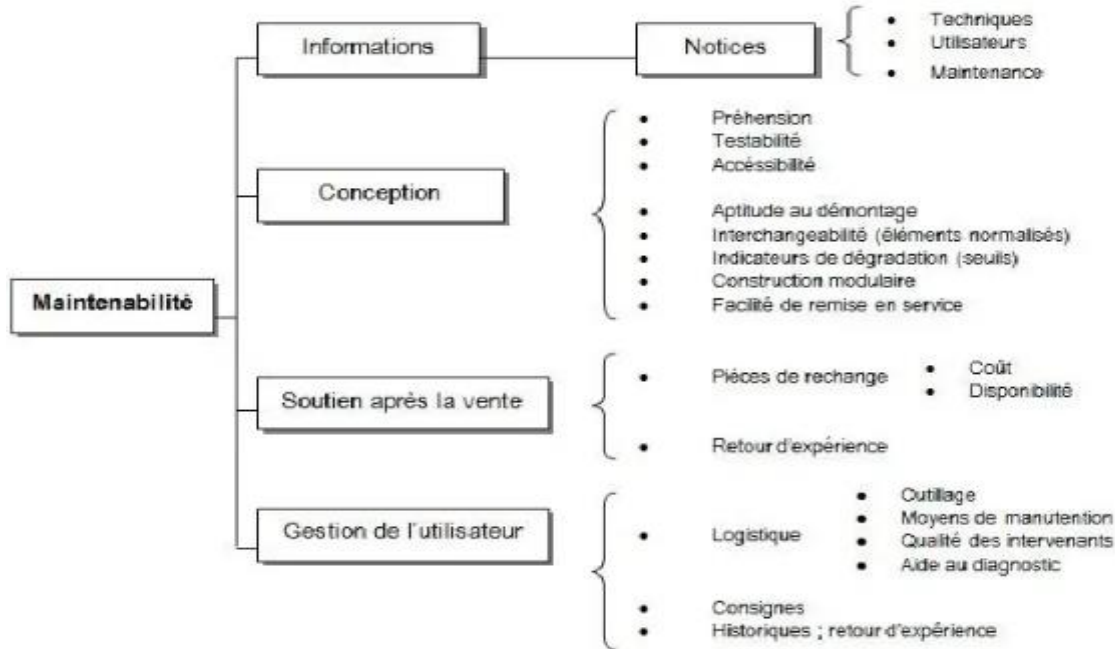


Figure IV.1: Schéma des critères généraux de la maintenabilité

### IV.3 Amélioration de la maintenabilité extrinsèque :

#### IV.3.1 Mettre en place un système de gestion optimisé des pièces de rechange pour éviter les ruptures de stock :

##### La méthode ABC :

La classification ABC consiste à diviser les stocks en trois catégories :

- ❖ **Catégorie A** : pièces critiques à forte valeur de consommation. Elles nécessitent un suivi précis et un stockage adapté pour garantir leur disponibilité.
- ❖ **Catégorie B** : pièces intermédiaires avec une consommation modérée. Ces pièces doivent être suivies de manière régulière.
- ❖ **Catégorie C** : pièces à faible consommation, moins critiques. Leur réapprovisionnement est moins fréquent.

➤ La méthode PIEU :

Cette méthode classe les pièces selon quatre critères :

- **P** : Incidence de la panne.
- **I** : Importance de la pièce.
- **E** : État de la pièce.
- **U** : Fréquence d'utilisation.

Ces critères permettent de prioriser les pièces à stocker et d'éviter les ruptures pour les pièces critiques.

➤ Le MTBF (Mean Time Between Failures):

Le MTBF calcule le temps moyen entre deux pannes pour évaluer la fiabilité des équipements. Cette analyse permet de mieux prévoir les besoins en pièces de rechange.

### **IV.3.2 Développer un programme de formation continue pour améliorer la compétence des techniciens :**

- Acquérir une vision détaillée sur le processus de maintenance et ses objectifs.
- S'appropriier les méthodes et outils pour implémenter, et améliorer les indicateurs de ce processus
- Mettre en œuvre des méthodes et outils pour améliorer rapidement et visiblement les performances de la maintenance et indirectement celles du système de production.
- Exploitation des données de l'historique et pratique de la maintenance prédictive

### **IV.3.3 Intégrer des capteurs et des outils de maintenance prédictive basés sur l'IA et l'IoT :**

L'Internet des objets, associé à une GMAO de dernière génération, permet aux entreprises d'adopter une stratégie de maintenance prédictive afin d'optimiser la maintenabilité de leurs équipements.

### **IV.3.4 Amélioration de l'aménagement des zones de travail pour faciliter l'accès aux équipements :**

- Accessibilité des Équipements
- Sécurité et Ergonomie des Postes de Travail
- Intégration des Technologies Numériques

## V Modélisation de la maintenabilité :

### V.1 Historique des Arrêts pour Intervention :

L'analyse de la maintenabilité nécessite une collecte rigoureuse des données sur les arrêts des équipements :

#### V.1.1 Durée des interventions :

Les temps de maintenance comprennent les temps de **maintenance préventive** et les temps de **maintenance corrective**. Ceux-ci comprennent les temps **actifs** et les temps **annexes**. Les temps actifs de maintenance corrective comprennent :

1. - Temps de localisation de la défaillance,
2. - Temps de diagnostic
3. - Temps de dépannage ou de réparation,
4. - Temps de contrôle et d'essais finals

Les temps annexes de maintenance comprennent :

1. - Temps administratifs (temps de saisie, de traitement de document, etc.),
2. - Temps logistiques ou durées d'attente des ressources nécessaires à l'exécution de la maintenance,
3. - Temps techniques annexes (exemple : phase de refroidissement d'un équipement),
4. - Temps de préparation de travail (études, méthodes, ordonnancement, etc.)

#### V.1.2 Le mode de défaillances :

Les modes de défaillances mécaniques en fonctionnement :

**a)Choc** : il s'agit le plus souvent « d'accident » de conduite, de manipulation et, à ce titre, à exclure des calculs de fiabilité.

**b) surchauffe** : dépassement de charge nominale entraînant une déformation permanente ou une rupture (traction, flexion, flambage)

c) **Fatigue thermique** : elle entraîne dilatations, déformations plastiques, brûlures ou fusion.

d) **Fluage** : déformation devenant permanente avec le temps, sous l'effet conjugué de contraintes mécaniques et thermiques.

e) **L'usure, conséquence du frottement**, est expliqué par la « délamination » (fatigue des sous-couches) avec perte de matière des surfaces en contact. Trois phases d'usure : le rodage initial l'usure « douce », ou grippage épidermique, le grippage, usure rapide par transfert de métal.

### V.1.3 Les modes de défaillances électriques :

a) **Rupture de liaisons électriques** : c'est le plus souvent la conséquence d'une cause extrinsèque, telle qu'un choc, une surchauffe ou une vibration donnant parfois une défaillance « fugitive ». Exemple : rupture de soudure sur un poste radio, cause de défaillance principale de ces appareils.

b) **Collage ou usure des contacts** : les contacts, par différents modes de défaillances, sont souvent les « maillons faibles » d'un circuit électrique.

c) **Le « claquage » d'un composant**, telle qu'une résistance, un transistor... ces modes de défaillance présentent un caractère catalectique, qui les rend difficile à prévenir.

### V.1.4 Causes principales des défaillances.

❖ **Défaillances de causes intrinsèques** : défauts dus à une mauvaise conception du l'équipement, à une fabrication non conforme du l'équipement ou à une mauvaise installation du l'équipement. Les défauts par usure (liées à la durée de vie d'utilisation) et par vieillissement (liées au cours du temps) sont des défauts provoqués.

❖ **Défaillances de causes extrinsèques** : défauts de mauvais emploi, par fausses manœuvres, dues à la maintenance, conséquences d'une autre défaillance.

### V.1.5 Fréquence des interventions :

Indiquer le nombre de fois par période de x semaines où l'intervention doit être effectuée pour l'équipement.

### V.2 Choix de la Loi Statistique :

. Les Paramètres nécessaires a la mesure Maintenabilité :

→ Maintenabilité :  $M(t) = 1 - P$

Avec:  $P$  : probabilité qu'un système n'est pas réparé sur un intervalle  $[0,1]t$ ; Sachant que ce système est défaillant.

Les temps de réparation suivent souvent des lois statistiques spécifiques :

#### V.2.1 Loi exponentielle:

utilisée pour des réparations rapides et aléatoires.

$$M(t) = 1 - e^{-\int_{t_0}^t \mu d\mu}$$

Si on considère  $\mu$  Constant alors:  $M(t) = 1 - e^{-\mu t}$

→ Moyenne des temps de réparation:

$$MTTR = \frac{\sum ti}{\sum def}$$

→ Taux de réparation ( $\mu$ ) :

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \text{ (Nombre d'intervention par unité de temps).}$$

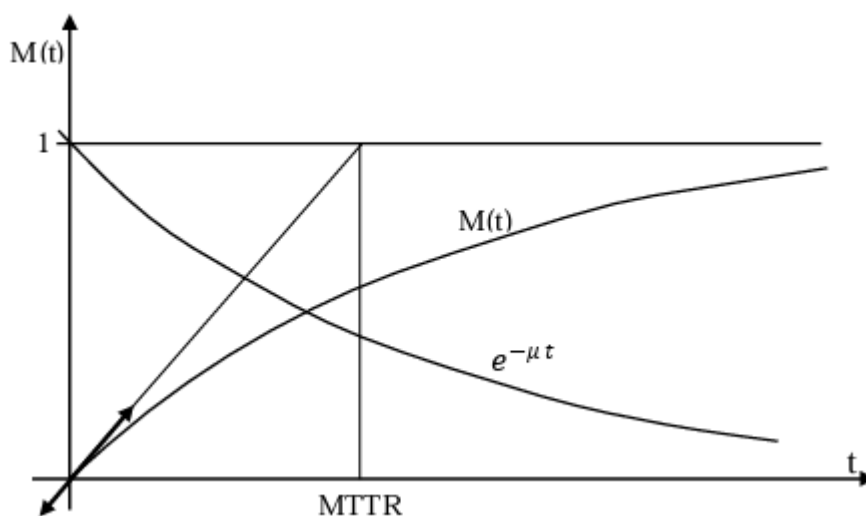


Figure V.1: Courbe de maintenabilité et seuil de MTTR

### V.2.2 Loi normale (ou gaussienne) :

Pertinente pour des réparations où des processus complexes sont impliqués :  $f(x, \mu, \sigma) =$

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Avec  $\sigma$  est l'écart type

### V.2.3 Loi de Weibull :

Elle modélise des scénarios où la défaillance évolue dans le temps.

$$\text{La densité : } g(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} * e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

$$\text{La fonction de répartition : } F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

Avec :

- $t$  représente le temps,
- $\beta$  est le **paramètre de forme** qui détermine l'évolution du taux de défaillance dans le temps,
- $\eta$  est le **paramètre d'échelle** qui représente le temps caractéristique à partir duquel le défaut devient significatif.

### V.3 Validation de la Loi :

La validation consiste à comparer les données réelles aux modèles théoriques par des tests statistiques comme :

#### V.3.1 Test du khi-deux :

Dans le contexte de la maintenabilité, le test du khi-deux peut être appliqué pour :

- Valider la répartition des temps de réparation.
- Vérifier l'adéquation d'un modèle de défaillance (par exemple, pour une loi de Weibull) aux données historiques d'interventions.
- Détecter des écarts entre le comportement théorique attendu et le comportement observé, permettant ainsi d'ajuster les modèles de maintenance et les stratégies d'intervention.

Ce test est basé sur l'écart entre les valeurs observées et le modèle théorique.

$$E = \sum_{i=1}^r \frac{(ni - Npi)^2}{N \cdot Pi}$$

Une fonction indicatrice des écarts est:

r: nombre de classes

ni: nombre d'individus par classe

N: nombre d'individus total dans l'échantillon

Npi: nombre d'individus attendu théoriquement dans la classe i

Pi: probabilité de se trouver dans la classe

### V.3.2 Test de Kolmogorov-Smirnov :

Dans l'analyse de maintenabilité :

- Il permet de valider si les temps de réparation suivent une loi de Weibull, une loi exponentielle ou une loi normale.
- Il est utile pour évaluer la pertinence des modèles de maintenance prédictive.

$$D Ni = |F(ti) - Fe(ti)|$$

Fe(t): Fonction de répartition réelle.

Obtenue par: -méthode des rangs moyens:

$$Fe(ti) = \frac{\sum ni}{N} + 1$$

-méthode des rangs médians:

Fe(ti) =  $(\sum ni - 0,3) / (N + 0,4)$  F(t) : fonction de répartition théorique.

C'est  $DNi < D_{n,\alpha}$  (donc la loi est validée)

### V.4 Principales formules de la maintenabilité :

La maintenabilité peut se caractériser par sa MTTR (Mean Time To Repair) ou encore Moyenne des Temps Techniques de Réparation.

La figure ci-dessous schématise les états successifs que peut prendre un système réparable :

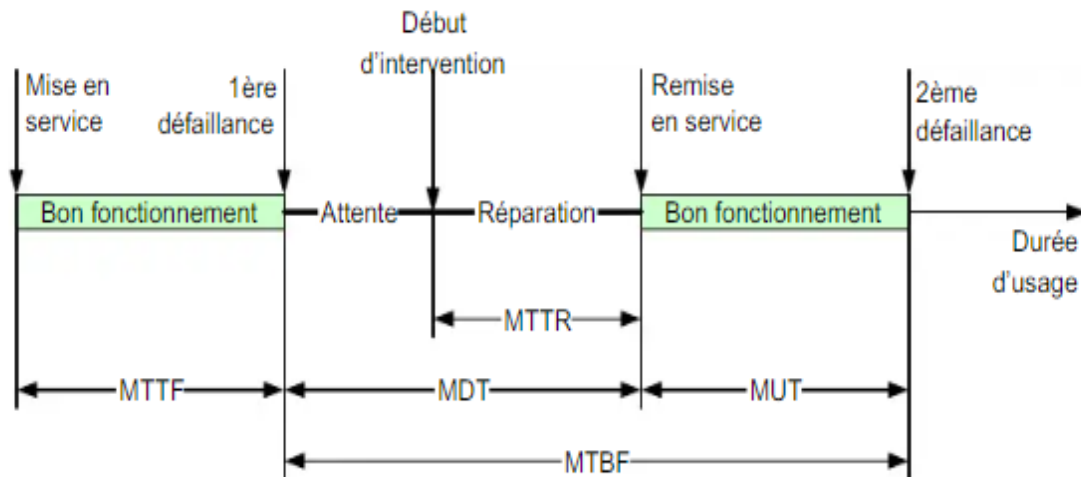


Figure V.2: Représentation de la disposition réparable

**MTTF (mean time to [first] failure)** : Temps moyen avant première défaillance

**MTBF (mean time betweenfailure)** : Temps moyen entre deux défaillances **successives**

**MDT ou MTI (mean down time)** : Temps moyen d'indisponibilité ou temps moyen d'arrêt propre

**MUT (mean up time)** : Temps moyen de disponibilité

**MTTR (mean time to repair)** : Temps moyen de réparation

#### V.4.1 Temps Moyen de Réparation (MTTR)

Le **MTTR** représente le temps moyen nécessaire pour réparer un équipement en panne.

$$MTTR = \frac{\sum ti}{\sum def}$$

#### V.4.2 Taux de réparation ( $\mu$ )

Le taux de réparation est l'inverse du **MTTR** , exprimant la rapidité avec laquelle les réparations sont effectuées :

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \text{ (Nombre d'intervention par unité de temps).}$$

### V.4.3 Disponibilité (D) :

La disponibilité d'un système est le rapport entre le temps de fonctionnement et le temps total (fonctionnement + réparation).

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

où :

- **MTBF (Mean Time Between Failures)** est le temps moyen entre deux pannes.
- **MTTR** est le temps moyen de réparation.

### V.4.4 Taux de Maintenabilité Instantanée $g(t)$ :

La fonction de densité de la maintenabilité, représentant la probabilité qu'une réparation soit achevée à un instant donné, est :

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

### V.4.5 Probabilité de réparer un équipement en un temps donné :

Cette probabilité suit une loi exponentielle :

$$P(T \leq t) = 1 - e^{-\mu t}$$

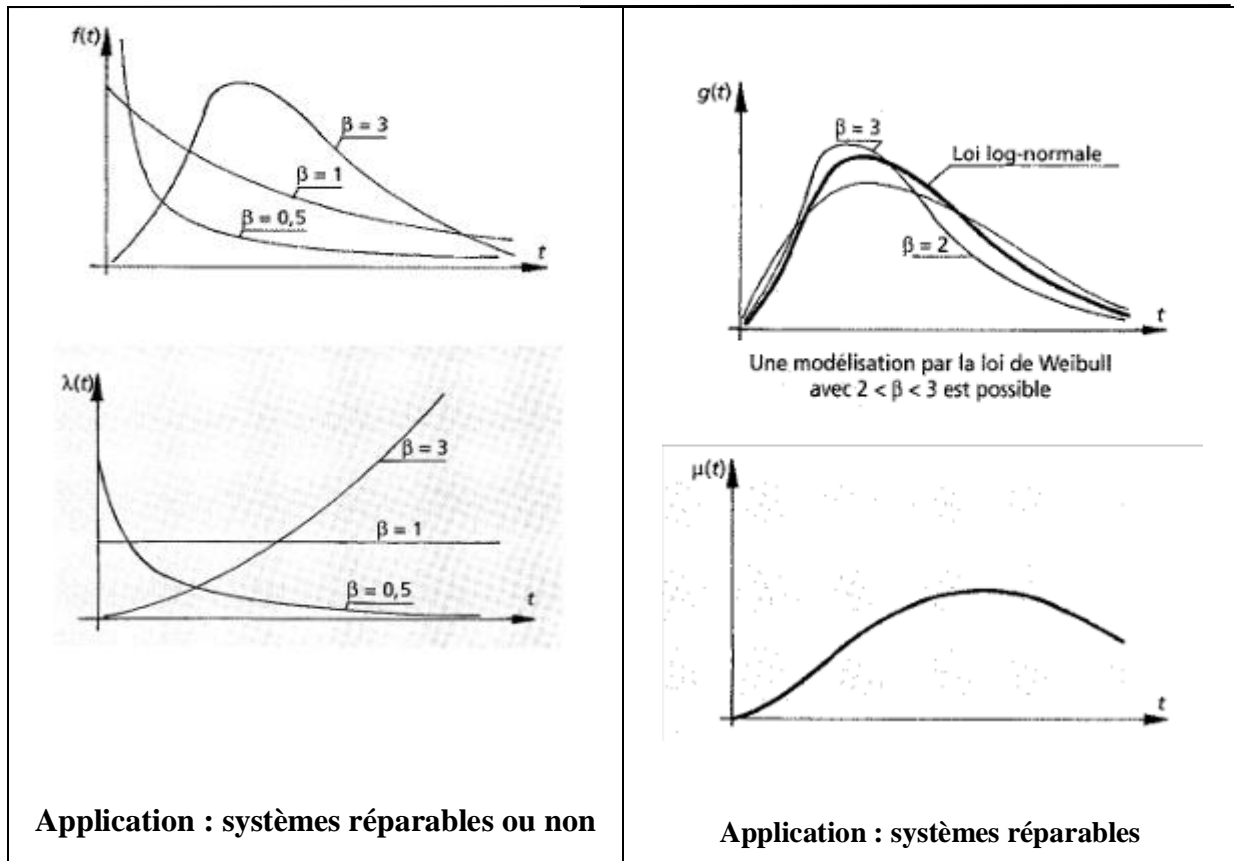
### V.4.6 Fiabilité et Maintenabilité :

Avant d'aller plus loin dans l'analyse, il est utile de faire la distinction entre deux notions souvent associées mais fondamentalement différentes : la fiabilité et la maintenabilité.

**Tableau V.1:** Comparaison des principales caractéristiques de la fiabilité et de la maintenabilité

FIABILITE	MAINTENABILITE
Probabilité « durée de bon fonctionnement »	Probabilité de « durée de réparation »
$R(t) = P(T_p > t)$	$M(t) = P(T_R < t)$
Variable aléatoire : temps de fonctionnement	Variable aléatoire : temps de réparation

Densité de défaillance : probabilité du temps avant défaillance : $f(t)$	Densité de probabilité du temps de réparation : $g(t)$
Fiabilité : $R(t) = \int_t^{+\infty} f(t) dt = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$	Maintenabilité : $M(t) = \int_0^t g(t) dt = 1 - e^{-\int_0^t \mu(t) dt}$
Taux de défaillance $\lambda(t)$ : $R(t) = \int_t^{+\infty} f(t) dt = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$	Taux de réparation $\mu(t)$ : $\mu(t) dt = \frac{g(t)}{1 - M(t)}$
MTBF= mean time between failures $MTBF = \int_0^{+\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{+\infty} R(t) dt$	MTTR= mean time to repair $MTTR = \int_0^{+\infty} t \cdot g(t) dt$
Relation fondamentale: $f(t) = \lambda(t) \cdot e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$	Relation fondamentale: $g(t) = \mu(t) \cdot e^{-\int_0^t \mu(t) dt}$
<b>Lois usuelles: Si <math>\lambda =</math> constant, loi exponentielle:</b> $R(t) = e^{-\lambda t}$ <b>Si <math>\lambda(t)</math> est variable, loi de Weibull (loi à 3 paramètres)</b>	<b>Lois usuelles: Si <math>\mu =</math> constant, loi exponentielle:</b> $M(t) = 1 - e^{-\mu t}$



## VI Conclusion :

Ce chapitre a permis de poser les bases fondamentales de la maintenabilité en explorant ses deux dimensions essentielles : l'intrinsèque, liée à la conception de l'équipement, et l'extrinsèque, influencée par l'environnement organisationnel et humain. À travers l'étude des notions, des indicateurs clés (MTTR, fonction, taux de réparation) et des lois statistiques comme celle de Weibull, nous avons établi un cadre méthodologique solide qui servira de référence pour l'analyse détaillée de la machine TIPO B254 dans les chapitres suivants.

***Chapitre III :***

***Etude de la maintenabilité de  
la machine FICEP TIPO***

***B254***

## I Introduction

Avant de procéder à la modélisation statistique de la maintenabilité de la machine Tipo B254, il convient de rappeler les fondements de notre analyse : nous disposons d'un historique détaillé des interventions (pannes, temps d'arrêt et temps de réparation) recueilli sur une période de 16 mois. L'objectif est désormais de traduire ces données opérationnelles en indicateurs robustes (fonction de maintenabilité  $M(t)$ , MTTR, taux de réparation  $\mu$ ), puis de vérifier leur adéquation à des lois de probabilité (Weibull, exponentielle, normale).

Cette étape de modélisation permettra non seulement de quantifier la capacité de la Tipo B254 à être rétablie en fonctionnement — selon différents horizons temporels et conditions d'usage mais aussi d'orienter la politique de maintenance vers une stratégie prédictive, fondée sur des paramètres fiables. Nous allons donc commencer par préparer les données (classement des temps de réparation, calcul de la fonction empirique de maintenabilité), puis appliquer successivement les méthodes de régression graphiques et les tests de conformité pour sélectionner le modèle statistique le plus représentatif.

## II Etudier les temps de réparations(TTR) :

### II.1 Classement des temps de réparation(TTR) :

Avant de passer à l'analyse de la maintenabilité, il est important d'organiser les temps de réparation relevés sur la machine. Ce classement permet de visualiser la distribution des durées d'intervention et de préparer les calculs nécessaires à l'ajustement statistique. Il constitue une base essentielle pour construire la fonction de maintenabilité et identifier les tendances dans les performances de remise en état.

**Tableau II.1:** Répartition des TTR avec estimation empirique de  $F_e$

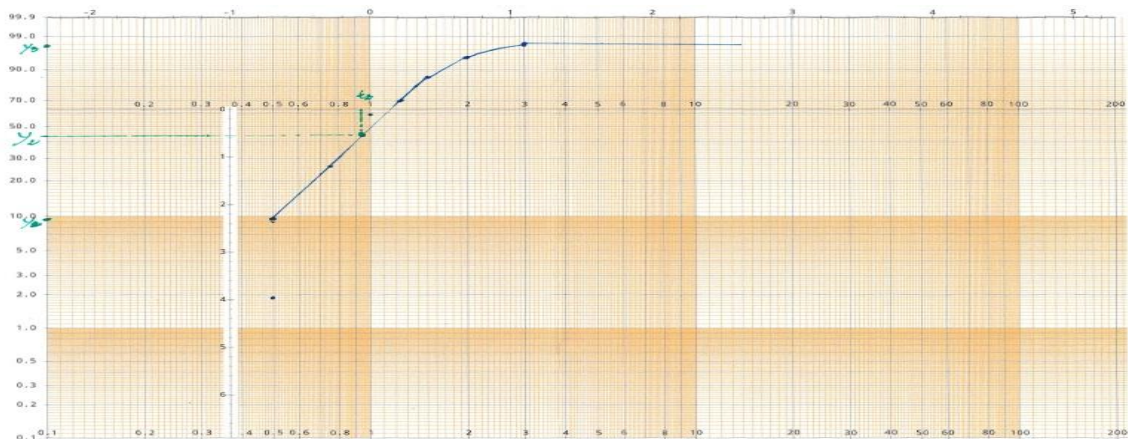
Ordre	TTR (h)	n(i)	$\Sigma n(i)$	$F_e(TTR_i) = (\Sigma n(i)/N+1)$	$F_e\%$
1	0,50	4	4	0,0975	9,75%
2	0,75	7	11	0,268	26,8%
3	1,00	12	23	0,560	56%

4	1,25	6	29	0,707	70,7%
5	1,50	6	35	0,8536	85,36%
6	1,75	3	38	0,9268	92,68%
7	2,00	1	39	0,9512	95,12%
8	3,00	1	40	0,9756	97,56%

## II.2 Appliquer la loi de probabilité (Weibull) :

La loi de Weibull a été choisie pour modéliser la maintenabilité de la machine Tipo B254 car elle est particulièrement adaptée aux phénomènes de défaillance mécanique. Sa flexibilité permet de représenter différentes formes d'évolution du taux de défaillance : constant, croissant ou décroissant, selon la valeur du paramètre de forme  $\beta$ . De plus, la loi de Weibull est largement utilisée en maintenance industrielle pour analyser les temps de réparation et les durées de fonctionnement, car elle s'ajuste bien aux comportements réels observés sur des équipements complexes comme les machines de production.

- 1- Nous traçons d'abord le graphique de (TTR/Fe) sur le papier de Weibull (papier d'Allan) afin de déterminer graphiquement les paramètres  $\beta$ ,  $\eta$  et  $\gamma$ .



**Figure II.1:** le graphe de Weibull (TTR/Fe)

- 2- Nous constatons que le graphe n'est pas droit, ce qui indique que  $\gamma > 0$ . nous avons considéré deux points de référence :  $F_e(TTR_1)=0,0975$  associé à  $t_1=0,5$  et  $F(TTR_3)=0,9756$  associé à  $t_3=3$ . À partir de ces valeurs, nous avons calculé une moyenne intermédiaire notée  $F_e(TTR_2)$ , puis réalisé une projection graphique afin d'estimer la valeur correspondante du temps  $t_2$ , que nous avons déterminée à  $t_2=0,95$

3- Nous calculons  $\gamma$  selon la formule :

$$\frac{t_1*t_3-t_2^2}{t_1+t_3-2t_2} \rightarrow \frac{0.5*3-0.95^2}{0.5+3-2*0.95} = 0.375$$

Nous retraçons alors le graphe, ce qui nous permet d'obtenir une droite. Le paramètre  $\beta$ , indiquant l'évolution du taux de défaillance, est supérieur à 1 ( $\beta > 1$ ), ce qui signifie que les réparations deviennent plus difficiles avec le temps. Finalement, nous appliquons la loi de

Weibull:  $M(t)=1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$

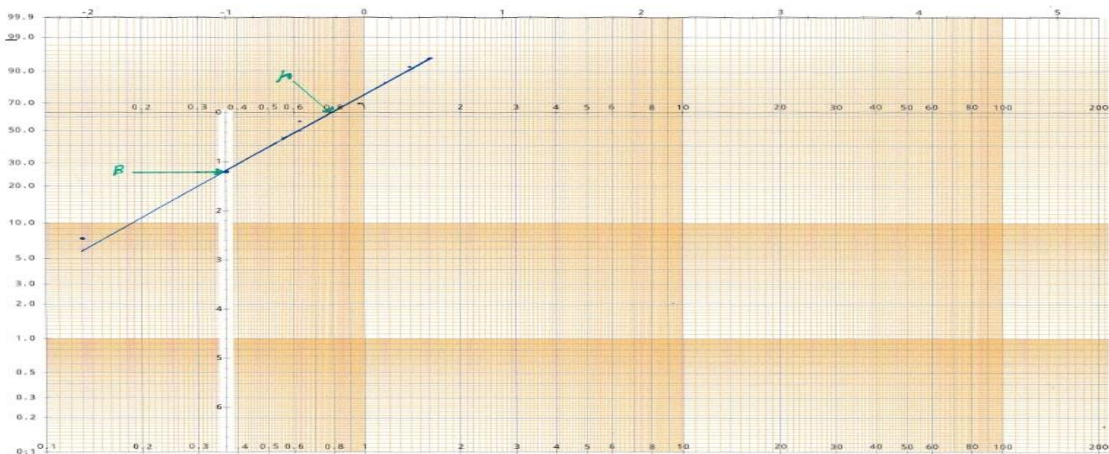


Figure II.2: graphe de weibull avec (TTR- $\gamma$ )

avec  $\gamma = 0,375$ ,  $\eta = 0,78$  et  $\beta = 1,2$ soit :  $\longrightarrow M(T) = 1 - e^{-\left(\frac{t-0.375}{0.78}\right)^{1,2}}$

Tableau II.2: Données ajustées pour l'application de la loi de Weibull sur les TTR

Ordre	TTR- $\gamma$	M(t)
1	0,125	0,10516549
2	0,375	0,33983385
3	0,625	0,53538843
4	0,875	0,68269096
5	1,125	0,78815928
6	1,375	0,8611646
7	1,625	0,91043046
8	2,625	0,98629296

### II.3 Test de validation :

Pour valider la loi statistique choisie pour modéliser la maintenabilité de la machine Tipo B254, le test de Kolmogorov-Smirnov (test K-S) a été retenu. Ce test présente l'avantage d'être simple à appliquer et adapté aux **petits échantillons**, comme c'est le cas dans cette étude. Contrairement à d'autres tests (par exemple, le test du Khi-deux qui nécessite une construction de classes), le test de Kolmogorov-Smirnov compare directement la fonction de répartition empirique des données avec la fonction de répartition théorique attendue, sans avoir besoin de regrouper les observations. Il permet ainsi de vérifier de manière précise et fiable si la loi statistique choisie (Weibull) est compatible avec le comportement observé des temps de réparation.

La procédure du test de Kolmogorov-Smirnov commence par le calcul de l'écart entre la fonction de répartition empirique  $F_e$  et la fonction théorique. Ensuite, on identifie la valeur absolue maximale de cet écart, appelée  $D_{max}$ . Cette valeur est ensuite comparée à une valeur critique obtenue à partir de la table du test de Kolmogorov-Smirnov. Si  $D_{max} > D_{\alpha}$ , on conclut que l'hypothèse d'ajustement aux données est rejetée.

**Tableau II.3 :** Écart entre la fonction empirique et la fonction théorique pour le test de conformité

$F_e(TTR_i) = (\sum n(i)/N+1)$	$M(t)$	<b>D</b>
0,0975	0,10516549	0,00760452
0,268	0,33983385	<b><u>0,07154116</u></b>
0,560	0,53538843	0,02558718
0,707	0,68269096	0,02462612
0,8536	0,78815928	0,06549925
0,9268	0,8611646	0,06566466
0,9512	0,91043046	0,04078905
0,9756	0,98629296	0,0106832

**À partir du calcul, nous avons trouvé :**

$D_{n,max} = \mathbf{0,07154116}$ .

D'après la table de Kolmogorov-Smirnov et en admettant un risque d'erreur  $\alpha = 5 \%$ , nous avons :

$$Dn.\alpha = D_{40,0,05} = 0,139.$$

Comme

$$Dn.\max < Dn.\alpha \text{ soit } 0,07154116 < 0,139,$$

Nous pouvons conclure que le modèle de Weibull est validé.

#### II.4 Calculer le l'espérance mathématique (MTTR) :

Pour trouver le MTTR il faut appliquer l'équation suivante

$$\longrightarrow \boxed{MTTR = A\eta + \gamma}$$

Avec : A Coefficient lié à  $\beta$

Nous avons trouvé A dans tableau de la loi de Weibull :

$$\longrightarrow \boxed{\beta = 1,2 \text{ donc } A = 0,9407}$$

On applique :  $MTTR = 0,9407 \times 0,78 + 0,375$

$$\longrightarrow \boxed{MTTR = 1,108746 \text{ (h/int)}}$$

#### II.5 Calcul de la densité de probabilité :

Avant de calculer la densité, il faut appliquer la formule suivante :

$$\longrightarrow \boxed{g(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \times \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \times e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

$$\text{on applique : } \boxed{g(t) = \left(\frac{1,2}{0,78}\right) \times \left(\frac{t-0,375}{0,78}\right)^{1,2-1} \times e^{-\left(\frac{t-0,375}{0,78}\right)^{1,2}}$$

**Tableau II.4:** Densité de probabilité des temps de réparation (TTR) selon la loi de Weibull

TTR(h)	TTR- $\gamma$ (h)	f(t)
0,5	0,125	<b>0,9545</b>
0,75	0,375	<b>0,8772</b>
1	0,625	<b>0,6838</b>
1,25	0,875	<b>0,4995</b>
1,5	1,125	<b>0,3506</b>
1,75	1,375	<b>0,2392</b>
2	1,625	<b>0,1595</b>
3	2,625	<b>0,0268</b>
4	3,625	<b>0,00376</b>

### III Etudier les temps d'arrêts (TA) :

#### III.1 Classement des temps d'arrêts (TA) :

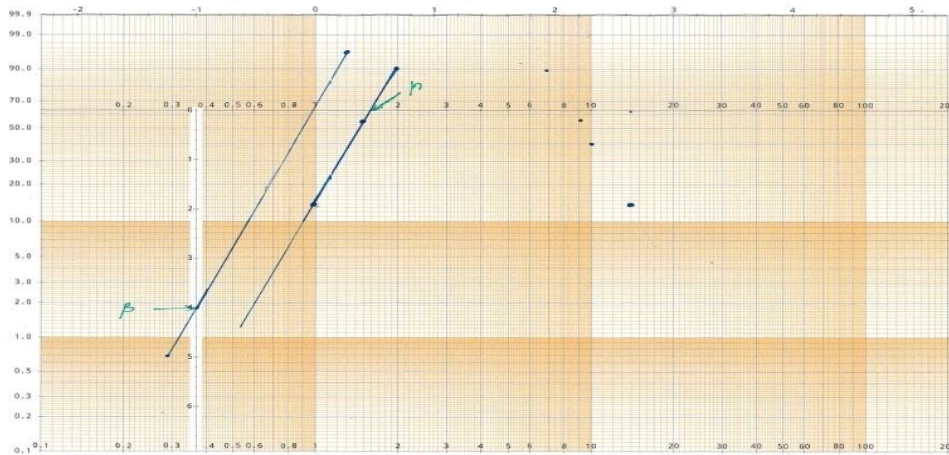
De la même manière que pour les temps de réparation, les temps d'arrêt complets ont été classés par ordre croissant afin de faciliter l'étude de leur comportement statistique. Ce classement permettra d'évaluer la fonction de maintenabilité associée aux arrêts globaux de la machine et de mieux comprendre leur répartition dans le temps.

**Tableau III.1 :** Répartition des TA avec estimation empirique de Fe

Ordre	TA	Ni	$\Sigma ni$	Fe = $\Sigma ni/N+1$	Fe%
1	1	6	6	0,14634146	14,63
2	1,5	18	24	0,58536585	58,53
3	2	13	37	0,90243902	90,24
4	2,5	1	38	0,92682927	92,68
5	4	2	40	0,97560976	97,56

**III.2 Application de la loi de probabilité (Weibull) :**

Nous traçons d'abord le graphique de (TA/Fe) sur le papier de Weibull (papier d'Alain) afin de déterminer graphiquement les paramètres  $\beta$ ,  $\eta$  et  $\gamma$ .



**Figure III.1:** le graphe de weibull (TA/Fe)

Nous constatons que le graphe est une droite, ce qui indique que  $(\gamma=0)$

D'après le graphique, nous obtenons les valeurs suivantes :  $\beta=4$  et  $\eta=1,6$

Le paramètre  $\beta$ , qui indique l'évolution du taux de défaillance, est supérieur à 1, ce qui signifie que les réparations deviennent plus difficiles avec le temps.

Nous appliquons ensuite la loi de Weibull, donnée par l'expression suivante  $M(t)=1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$

Dans notre cas, en remplaçant les paramètres trouvés, elle devient :  $M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-0}{1,6}\right)^4}$

**Tableau III.2:** Données ajustées pour la loi de Weibull appliquée aux TA

Ordre	TA	M(t)
1	1	0,14151656
2	1,5	0,53813202
3	2	0,91296163
4	2,5	0,99742129
5	4	1

III.3 Test de validation :

Tableau III.3: Écart entre  $F_e$  et  $M(t)$  pour le test K-S (TA)

$F_e = \sum ni/N+1$	$M(t)$	<b>D</b>
0,14634146	0,14151656	0,0048249
0,58536585	0,53813202	0,04723383
0,90243902	0,91296163	0,01052261
0,92682927	0,99742129	<b><u>0,07059202</u></b>
0,97560976	1	0,02439024

A partir du calcul, on a trouvé :  $D_{n,max} = 0,07059202$

- D'après la table de KOLMOKROV-SMIRNOV, et on admet un risque d'erreur  $\alpha=5\%$   
 $D_{n,\alpha} = D_{40, 0.05} = 0,139$

$D_{n,max} < D_{n,\alpha} = 0,07059202 < 0,139$  (Donc le modèle de Weibull est validé)

III.4 Calcul de l'espérance mathématique (Moyen temps d'arrêts MDT) :

Nous avons trouvé A dans le tableau de la loi de Weibull :

→  $\beta=4$  donc  $A=0,9064$

On applique la formule :  $MDT = 0,9064 \times 1,6 + 0$

→  $MDT = 1,45024$  (h/arrêt)

III.5 Calcul de la densité de probabilité :

on applique :  $g(t) = \left(\frac{4}{1,6}\right) \times \left(\frac{t-0}{1,6}\right)^{4-1} \times e^{-\left(\frac{t-0}{1,6}\right)^4}$

Tableau III.4: Densité de probabilité des temps d'arrêt (TA) ajustée par la loi de Weibull

TA	<b>f(t)</b>
0,5	0,075
1	0,52

1,5	0,95
2	0,42
2,5	0,024
4	$4,2377 \times 10^{-16}$

#### IV Comparaison graphique entre TA et TTR :

##### IV.1 Comparaison graphique entre la densité de TA et TTR :

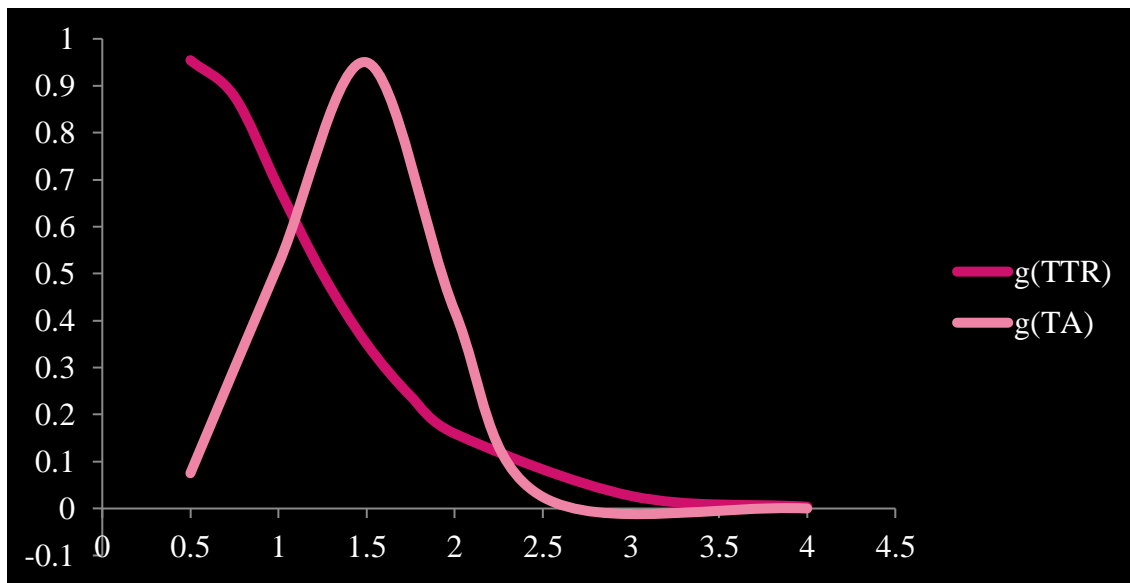


Figure IV.1: courbe de la densité de la probabilité de TTR et TA

##### IV.2 Comparaison graphique entre la fonction de répartition de TA et TTR :

Rappelons que :  $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$

Tableau IV.1: Comparaison des fonctions de répartition F(t) des (TA) et (TTR)

TA	F(TA)	F(TTR)
0,5	0,009491413	0,10516549
0,75	0,047132826	0,33983385
1	0,141516562	0,53538843
1,25	0,31101035	0,68269096
1,5	0,538132025	0,78815928
1,75	0,760955971	0,8611646
2	0,912961632	0,91043046
2,5	0,997421286	0,96417202
3	0,999995712	0,98629296
4	1	0,99819846

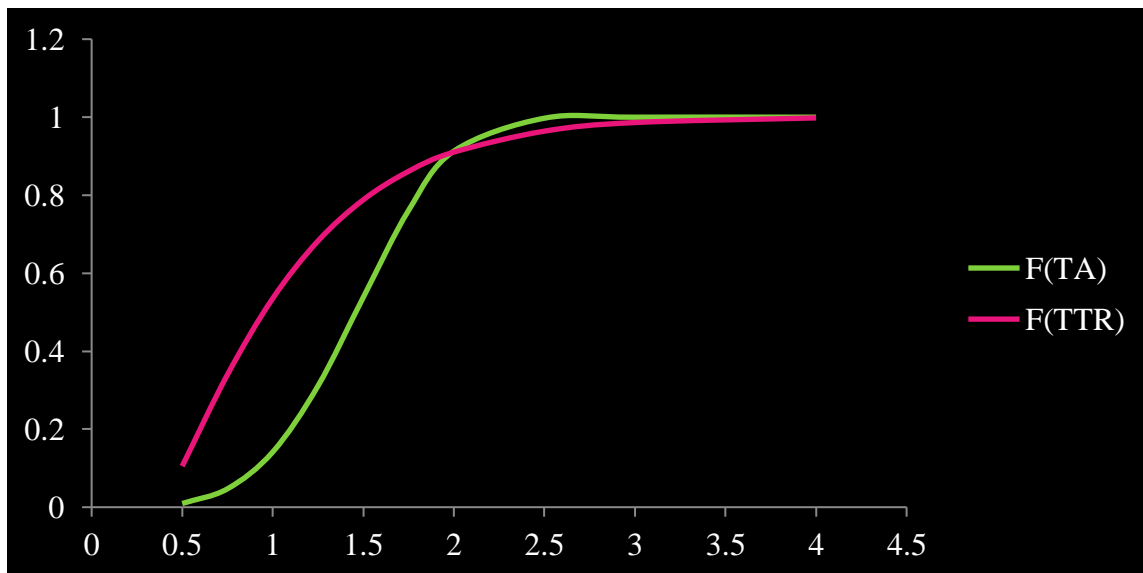


Figure IV.2: Les courbes de fonction de répartition de TTR et TA

### IV.3 Analyse des courbes :

#### IV.3.1 Courbes TTR (temps de réparation pur)

**Densité g(TTR)** et **répartition F(TTR)** portent sur la seule phase technique de remise en état : démontage, remplacement ou réparation du composant, remontage.

Une densité très concentrée (pic étroit et haut) ou une répartition qui monte rapidement indique que l'équipement a été **conçu pour être facilement accessible et réparable** (bon design, modularité, standardisation).

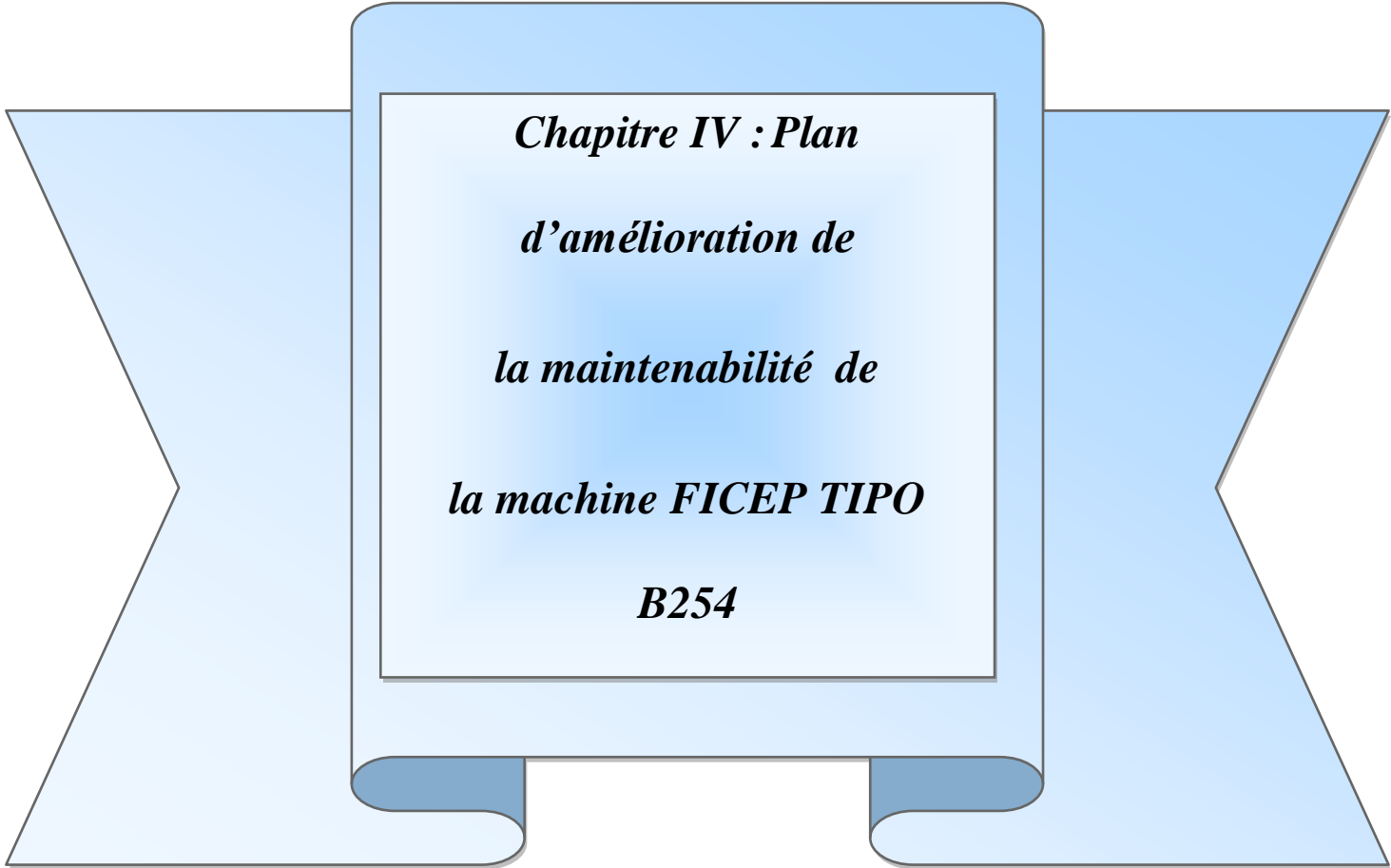
À l'inverse, une dispersion forte (longue queue de  $g(TTR)$ ) révèle des difficultés de conception (composants mal accessibles, procédures complexes) et appelle à améliorer la maintenabilité intrinsèque.

### IV.3.2 Courbes TA (temps d'arrêt global)

- Elles englobent **l'ensemble du processus** : détection de la panne, approvisionnement des pièces, déplacement de l'équipe, vérifications post-intervention, tests de redémarrage.
- Une densité plus resserrée mais décalée vers des temps longs, ou une répartition qui met beaucoup de temps à atteindre des seuils comme 90 %, signale des **freins organisationnels, logistiques ou humains** : planning, stocks, compétences, procédures de sécurité.
- Réduire l'écart entre MDT et MTTR consiste à optimiser ces phases extrinsèques (GMAO, formation, disponibilité des pièces, protocoles simplifiés).

## V Conclusion :

L'analyse conjointe de ces courbes permet donc d'identifier si les gisements de gains résident plutôt dans la **refonte des composants** (intrinsèque) ou dans **l'amélioration des méthodes et ressources de maintenance** (extrinsèque).



***Chapitre IV : Plan  
d'amélioration de  
la maintenabilité de  
la machine FICEP TIPO  
B254***

## **I Introduction :**

La maintenabilité d'une machine se répartit en deux volets : la **maintenabilité intrinsèque**, intégrée dès la conception (accessibilité, modularité, diagnostic embarqué...), et la **maintenabilité extrinsèque**, liée aux conditions d'intervention (espace de travail, outillage, pièces de rechange, formation...). Les propositions suivantes sont classées en actions rapides et facilement applicables (faible impact sur la machine) et actions nécessitant des modifications importantes (changements de conception ou d'organisation lourds), en s'appuyant sur des bonnes pratiques industrielles (Lean Maintenance, TPM, GMAO, réalité augmentée, etc.).

## **II Maintenabilité intrinsèque (conception de la machine)**

### **II.1 Actions rapides et facilement applicables**

#### **II.1.1 Conception « maintenance by design » :**

Intégrer les besoins des mainteneurs dès la conception (accès facile, modularité) pour réduire les temps de dépannage. Par exemple, agencer les sous-ensembles critiques de la TIPO B254 pour pouvoir les démonter/remonter aisément (coffrets électriques, organes de déplacement, tête de torche, etc.). Un châssis modulaire ou des sous-ensembles préfabriqués peuvent être remplacés rapidement sans désassembler toute la machine. Le choix de capteurs et de connecteurs rapides (emplacements standards, bornes à fiche rapide) améliore la détectabilité et la dépannabilité.

#### **II.1.2 Accessibilité des composants :**

Assurer un accès dégagé aux pièces d'usure (roulements, têtes de perçage/poinçonnage, torche plasma, filtres, etc.) et aux composants électriques ou hydrauliques fréquemment dépannés. Par exemple, prévoir des trappes d'accès ou des panneaux de maintenance latéraux escamotables. Cela permet de gagner du temps au démontage/montage. Comme le souligne la littérature, la « démontabilité » (facilité d'accès et d'utilisation d'outillage standard) est un facteur clé de maintenabilité.

### **II.1.3 Standardisation des pièces et des outils :**

Utiliser des composants normalisés (même type de roulement, de cylindre hydraulique, de connecteur électrique, de visserie, etc.) partout où c'est possible. Cela réduit le temps de repérage et le risque d'erreur (toutes les pièces de rechange communes, les jeux de clés universels) et accélère le remplacement. La standardisation diminue également les phases de test et réglage après remplacement, car les pièces compatibles garantissent un échange plus rapide.

### **II.1.4 Ergonomie du poste de maintenance :**

Concevoir des organes de préhension (poignées, verrous rapide, levier de levage, guidage des câbles) pour faciliter les opérations manuelles des techniciens. Une meilleure ergonomie (hauteurs de travail adaptées, outillage fixé sur la machine, etc.) évite la perte de temps liée aux postures contraignantes ou au déplacement inutile des techniciens. Cela peut aussi inclure des aides visuelles intégrées (repérage des circuits, étiquetage clair des tuyauteries et câbles) pour accélérer l'identification des composants défectueux.

### **II.1.5 Documentation technique complète :**

Fournir des plans et schémas détaillés, ainsi que des manuels de procédures de dépannage clairement rédigés et à jour dès la conception. Une bonne documentation (schémas électriques, hydrauliques, arborescences logicielles) doit être disponible sur site (et idéalement dans la GMAO) pour éviter de perdre du temps à chercher les informations. Les procédures de maintenance (carnets d'entretien, check-lists pas-à-pas) pré-écrites accélèrent chaque intervention. Comme le note la littérature, la qualité de la documentation est un facteur clé de maintenabilité. Les informations techniques devraient inclure les causes fréquentes de panne et les modes opératoires éprouvés pour les corriger, afin de guider directement le technicien vers les actions efficaces.

## **II.2 Actions nécessitant des modifications structurelles**

### **II.2.1 Unité de poinçonnage :**

Réorganiser la structure pour faciliter le changement d'outils : par exemple, installer un chariot linéaire ou un plateau coulissant pour sortir le porte-outil complet sans démonter l'équipement. Prévoir une plate-forme de maintenance ou un pont roulant pour accéder

facilement aux points hauts lorsque la machine est sollicitée en continu. Intégrer un système modulaire permettant le remplacement rapide des modules de forage/poinçonnage en atelier.

### **II.2.2 Unité de coupe thermique :**

Mettre en place un système de relevage de la torche (ex. banc télescopique) pour faciliter l'entretien en retirant rapidement l'outillage de coupe. Installer une hotte ou un dispositif de ventilation intégré directement sur la machine pour mieux évacuer les fumées (modification du bâti). Revoir la structure mécanique pour permettre un accès frontal ou latéral à la torche et aux allumeurs, ce qui simplifie le remplacement des buses de coupe.

### **II.2.3 Convoyeurs d'entrée/sortie :**

Modifier la structure pour installer un mécanisme de levage/inclinaison des bandes (ou des rouleaux séparables) qui facilite leur nettoyage sans démontage complet. Intégrer des guides supplémentaires ou des dispositifs de détection additionnels pour éviter les déviations ou chutes de matériaux. Prévoir l'ajout d'un poste de contrôle ou d'une cabine de supervision proche du convoyeur afin de surveiller visuellement son état et d'intervenir plus rapidement.

### **II.2.4 Système hydraulique :**

Reconfigurer les circuits hydrauliques en utilisant des tuyauteries flexibles accessibles afin de minimiser le travail de démontage en cas de fuite. Installer un bac de rétention permanent sous les composants hydrauliques et un tableau de commande de pression centralisé. Ajouter un point de test et d'appoint d'huile, ainsi que des vannes d'isolement rapides, pour faciliter les réparations sur le terrain.

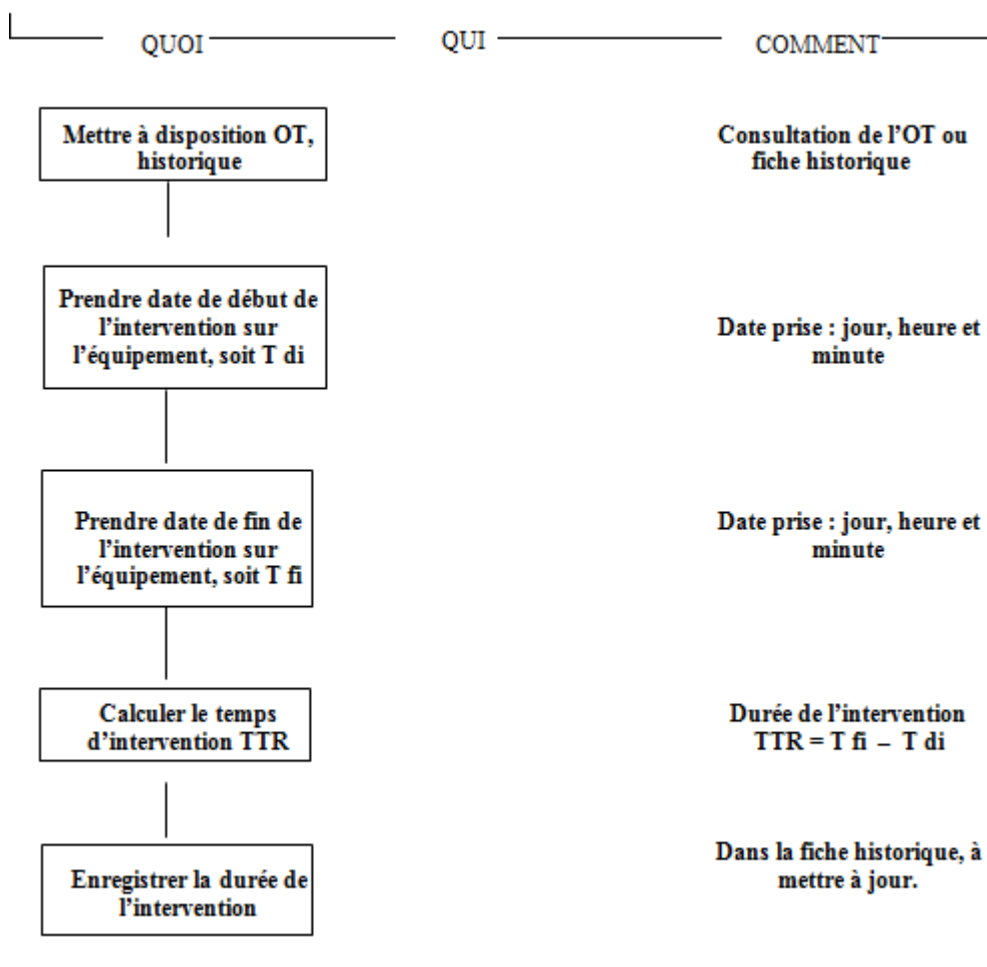
### **II.2.5 Contrôle CNC :**

Mettre à niveau ou remplacer le contrôleur par un modèle doté d'un diagnostic embarqué étendu (capteurs de condition, enregistrement d'événements) permettant la maintenance prédictive. Intégrer une supervision à distance (via réseau) pour surveiller en temps réel l'état du système et planifier l'entretien. Revoir le passage des câbles (utilisation de goulottes modulaires) pour faciliter leur remplacement, et regrouper les capteurs dans des boîtiers amovibles pour simplifier leur accès.

### II.3 Procédure des temps d'intervention :

Afin d'assurer un suivi rigoureux des temps d'intervention et de consolider la traçabilité des actions de maintenance, il est proposé d'intégrer une procédure standardisée. Cette fiche, inspirée des exigences de la norme AFNOR NF X 60-010, permet de structurer le calcul du temps d'intervention réel (TTR) pour chaque opération, en distinguant clairement la durée exacte entre le début (T<sub>di</sub>) et la fin (T<sub>fi</sub>) de l'intervention. Cette démarche contribue à une meilleure évaluation de la maintenabilité intrinsèque dans le temps, en facilitant les audits, le retour d'expérience et les améliorations continues.

**OT** : Ordre de travail



**Figure II.1:** Schéma de procédure de calcul du temps d'intervention (TTR) à partir des données terrain

### **III Maintenabilité extrinsèque (interventions et organisation)**

#### **III.1 Actions rapides et facilement applicables :**

##### **III.1.1 Planification et organisation de l'intervention :**

Mettre en place un planning réactif et défini des interventions : définir d'avance les rôles (technicien mécanique, électricien, opérateur machine, etc.), établir des priorités (pannes critiques vs mineures) et s'assurer que les équipes savent exactement qui intervient et quand. L'optimisation de l'organisation réduit les temps morts (attente des équipes, coordination tardive) et augmente le « wrench time » (temps réellement consacré à la réparation). Par exemple, un protocole clair peut prévoir qu'à la moindre alerte, un technicien diagnostique en parallèle qu'un autre prépare le matériel.

##### **III.1.2 Préparation en amont (outils et matériel prêts) :**

Avant chaque intervention, préparer un kit complet : outillage spécifique, appareil de diagnostic (analyseurs d'arc, testeurs de capteurs), et pièces courantes. Des check-lists standard (vérifier l'inventaire avant départ) évitent de refaire plusieurs fois le trajet pour récupérer un outil ou une pièce oubliée. Un transport organisé (chariot ou coffre mobile de maintenance) avec les outils dédiés à la TIPO B254 et les consommables courants (bagues d'usure, buses plasma, courroies, lubrifiants, etc.) permet de gagner souvent plusieurs dizaines de minutes par panne. La formation du personnel sur les procédures, ainsi que la prise en compte de la « préparation » comme facteur de maintenabilité, sont également essentielles pour réduire les délais de démarrage d'intervention.

##### **III.1.3 Gestion logistique des pièces de rechange :**

Maintenir un stock optimisé de pièces critiques (grenaille de plasma, capteurs, cartes électroniques, roulements, vérins) identifié à partir de l'analyse des pannes récurrentes. L'accès rapide à ces pièces élimine le délai d'attente de livraison lors d'un arrêt. Comme le note la littérature, la possibilité d'obtenir aisément les pièces détachées améliore la maintenabilité. Par exemple, disposer de contrats cadres ou d'un référencement fournisseur prioritaire garantit une remise en service plus rapide. Les pièces standardisées mentionnées ci-dessus profitent d'une meilleure disponibilité (réseau plus large) et d'une logistique plus fluide.

### III.1.4 Procédures d'intervention codifiées :

Rédiger des procédures simples et détaillées (modes opératoires, flowcharts de diagnostic, fiches de réparation) pour chaque type de défaillance connue. Cela réduit le temps de diagnostic (« tonton homme à l'affaire »), car le technicien suit un chemin guidé au lieu de réinventer la démarche à chaque panne. L'utilisation d'une GMAO pour tracer chaque intervention (historique, plan d'actions, durée) permet aussi de capitaliser les retours d'expérience afin d'améliorer en continu les procédures et d'anticiper les besoins (maintenance préventive ciblée).

### III.1.5 Coordination et formation des équipes :

Définir un chef d'intervention ou un plan communicatif clair (radio, messagerie) pour éviter la perte de temps en briefing/confusion. Former l'équipe à des scénarios de panne fréquents (procédures d'urgence, simulations) permet d'éviter la « découverte » à chaque événement. Par exemple, des exercices réguliers ou la réalité virtuelle (formation sur maquette numérique) peuvent rendre les techniciens immédiatement efficaces sur la machine réelle. Un personnel bien formé et documenté passera moins de temps en tâtonnements.

## III.2 PROCEDURE DES TEMPS D'IMMOBILISATION

Afin d'assurer une traçabilité précise des arrêts machine et d'améliorer le suivi de la disponibilité opérationnelle, il est proposé d'intégrer une procédure normalisée de déclaration du temps d'immobilisation. Cette fiche, conforme à l'esprit des exigences de la norme AFNOR NF X 60-010, permet d'encadrer le calcul du temps total d'arrêt (TA) en identifiant avec rigueur l'instant de début ( $T_d$ ) et de reprise ( $T_f$ ) du fonctionnement. Cette approche facilite l'analyse de la maintenabilité extrinsèque en distinguant les pertes liées de temps à la panne des délais dus à l'organisation (logistique, coordination, attente). Elle contribue également à alimenter les indicateurs de performance tels que le MDT, tout en renforçant les processus de retour d'expérience et les décisions d'optimisation des ressources de maintenance.

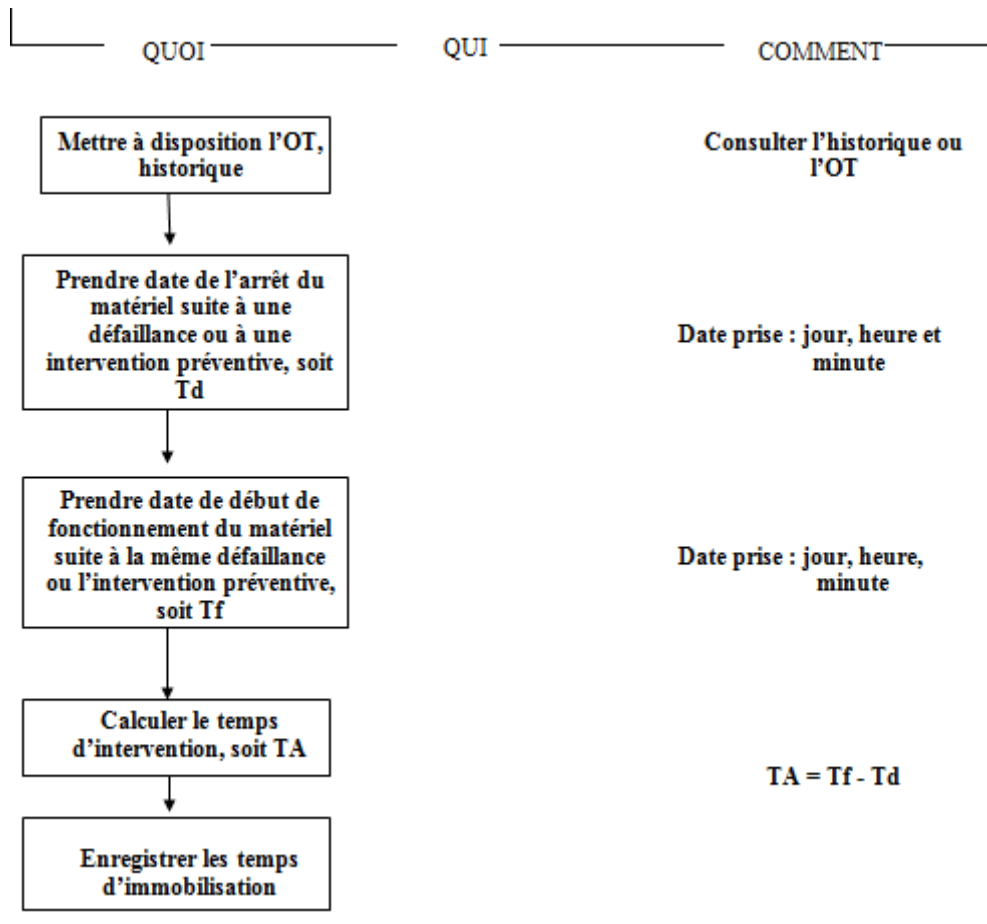


Figure III.1: Schéma de suivi du temps d'immobilisation de la machine

#### IV Une estimation du plan d'amélioration à effectuer :

Le temps d'arrêt des interventions réalisées sur la machine au cours des trois dernières années se compose généralement du TTR (diagnostic, démontage/remontage, réglages et tests post-réparation) ainsi que du temps logistique (préparation, communication, logistique et approvisionnement, pauses et interruptions imprévues). J'ai donc établi une estimation de chaque durée et proposé des gains potentiels afin de déterminer un nouveau temps d'arrêt optimisé.

**Tableau IV.1 :** Estimation des durées de maintenance par phase avant et après optimisation

<b>Indicateurs</b>	<b>Durée "avant" ajustée (h)</b>	<b>Gain(h)</b>	<b>Durée "après" (h)</b>
1. Temps de Préparation et acheminement	<b>0,18</b>	<b>0,09</b>	<b>0,09</b>
2. Temps de Diagnostic	<b>0,28</b>	<b>0,14</b>	<b>0,14</b>
3. Temps de Démontage / remontage	<b>0,69</b>	<b>0,28</b>	<b>0,41</b>
4. Temps Réglages & tests post-réparation	<b>0,14</b>	<b>0,03</b>	<b>0,11</b>
5. Temps de Coordination & communication	<b>0,08</b>	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>
6. Temps de Logistique & approvisionnement	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>
7. Temps de Pauses et interruptions imprévues	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>

**Nouveaux indicateurs :**

**MTTR** (Diagnostic, Démontage / remontage, Réglages & tests post-réparation)=0,14+0,41+0,11=0,66 h/int

**MDT** =0,09+0,14+0,41+0,11+0,04+0,03+0,02=0,84 h/arrêt

**V Conclusion :**

Le plan d'amélioration proposé associe des actions rapides et des modifications structurelles pour maximiser les gains de temps sur la machine TIPO B 254. Les mesures immédiates standardisation partielle des pièces, kits d'intervention préconfigurés, procédures codifiées et formation ciblée, permettront de réduire rapidement le MTTR et le délai de déclenchement des interventions. À moyen terme, la reconfiguration de l'accès aux composants, la modularisation des sous-ensembles et l'intégration de capteurs de diagnostic embarqués renforceront la maintenabilité intrinsèque, tandis qu'une meilleure organisation logistique et l'optimisation des processus de préparation diminueront la maintenabilité extrinsèque. L'articulation cohérente de ces deux volets garantit une évolution vers une maintenance proactive et performante, assurant à la TIPO B 254 une disponibilité accrue et une réactivité optimale en cas de panne.

## *Conclusion Générale*

L'analyse menée sur la machine **FICEP TIPO B 254** au sein de PROMECH Annaba a permis de mettre en évidence les performances actuelles de sa maintenabilité et d'identifier les axes d'amélioration prioritaires. L'étude de son historique d'arrêts sur les trois dernières années a révélé des goulets d'étranglement liés à la disponibilité des éléments de coupe, aux procédures de réglage et aux phases de démontage/remontage, impactant directement le MTTR.

La dimension intrinsèque de la maintenabilité a montré que l'accès aux organes critiques de la FICEP TIPO B 254 pourrait être optimisé en repensant l'architecture des carters et en standardisant certains sous-ensembles. Parallèlement, l'analyse extrinsèque a souligné la nécessité de renforcer la coordination entre les équipes de maintenance, d'améliorer la gestion des stocks de consommables et d'intégrer des outils de diagnostic embarqués. Le plan d'amélioration vise à ramener :

- 90 % des réparations en moins d'1 h,
- 90 % des remises en service en moins de 2 h.

La mise en œuvre de ces mesures devrait réduire la variabilité des interventions, diminuer le délai initial et accroître la disponibilité de la machine. Ces résultats constituent un socle solide pour déployer ultérieurement une maintenance prédictive et étendre la méthodologie à d'autres équipements.

## **Bibliographie:**

[1] PROMECH Annaba, *Documentation technique interne*, 2025.

[2] Gilles Zwingelstein, *Évaluation de la criticité des équipements – Méthodes d'exploitation des jugements d'experts*, relu et validé le 10 janvier 2023.

[3] CLAVER, DIALLO. *DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE D'IDENTIFICATION ET DE GESTION DES PIÈCES DE RECHANGE*. 2006, à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval QUÉBEC.

[4] <https://mobility-work.com/fr/blog/goulot-detraglement-machine/> publié le 24 avril 2018, mis à jour le 3 mai 2021.

[5] FICEP, *Fiche technique de la machine de poinçonnage et coupe thermique Tipo B254*, documentation fabricant, 2020.

[6] Marhoune Ishak, *Mémoire de fin d'études de Master*, Université Badji Mokhtar Annaba (UBMA), Département de Génie Mécanique, 2017.

[7] AFNOR, *Norme NF X60-100 – Maintenance industrielle - Terminologie de la maintenance*, Association Française de Normalisation, 1981.

[8] Berrahaillyes, *Mémoire de fin d'études de Master*, Université Badji Mokhtar Annaba (UBMA), Département de Génie Mécanique, 2017.

[9] NABDI Souad & HERROU Brahim, *Intégration de la maintenance en conception*, Laboratoire des Techniques Industrielles (LTI), Faculté des Sciences et Techniques (FST), Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fès, Maroc, 2015.

[10] Dr Djeddi, *Cours de diagnostic des défaillances*, Université Badji Mokhtar Annaba (UBMA), Département de Génie Mécanique, 2023. (support PDF)

[11] Pr Ahmed Bellaouar & M.A. SalimaBeleulmi, *Cours : Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité*, Université Constantine 1, Département Génie des Transports, 2023.

[12] Pr Khelif, *Statistiques appliquées en Maintenance, Université Badji Mokhtar Annaba (UBMA), Département de Génie Mécanique, 2023.*

[13] Université Ziane Achour Djelfa, *Cours : Nature et durée d'intervention en maintenance, Département de Génie Mécanique, 2023.*

[14] Université Frères Mentouri Constantine, *Cours : Typologie des défaillances, Département de Génie Mécanique, 2023*

[15] <https://blog.infraspeak.com/equipment-maintainability/>

[16] <https://www.nomadia-group.com/ressources/blog/management-maintenance/>

[17] <https://www.mosaicapp.com/glossary/resource-availability>

[18] <https://www.manpower.fr/technicien-maintenance>

[19] <https://fr.organilog.com/11537-gestion-stock-pieces-detachees/>

[20] <https://mobility-work.com/fr/blog/iot-maintenance-predictive/>

.

## Annex 1: Table de Kolmogorov-Smirnov

n	$\alpha =$	0.10	0.05	0.025	0.01
1		0.421	0.445	0.486	0.519
2		0.386	0.408	0.448	0.476
3		0.350	0.370	0.404	0.432
4		0.321	0.339	0.371	0.395
5		0.297	0.314	0.343	0.366
6		0.278	0.294	0.321	0.343
7		0.262	0.277	0.303	0.323
8		0.248	0.263	0.287	0.306
9		0.237	0.250	0.273	0.290
10		0.227	0.239	0.262	0.279
11		0.218	0.230	0.251	0.268
12		0.209	0.221	0.242	0.258
13		0.202	0.214	0.234	0.249
14		0.195	0.207	0.226	0.241
15		0.190	0.201	0.219	0.234
16		0.184	0.195	0.213	0.227
17		0.179	0.190	0.207	0.221
18		0.175	0.185	0.202	0.215
19		0.171	0.180	0.197	0.210
20		0.167	0.176	0.192	0.205
21		0.163	0.172	0.188	0.201
22		0.159	0.168	0.184	0.196
23		0.156	0.165	0.180	0.192
24		0.153	0.162	0.177	0.189
25		0.150	0.159	0.173	0.185
26		0.147	0.156	0.170	0.182
27		0.145	0.153	0.167	0.179
28		0.142	0.150	0.164	0.175
29		0.140	0.148	0.162	0.173
30		0.138	0.146	0.159	0.170
31		0.136	0.143	0.157	0.167
32		0.134	0.141	0.154	0.165
33		0.132	0.139	0.152	0.162
34		0.130	0.137	0.150	0.160
35		0.128	0.135	0.148	0.158
36		0.126	0.134	0.146	0.156
37		0.125	0.132	0.144	0.154
38		0.123	0.130	0.142	0.152
39		0.122	0.129	0.140	0.150
40		0.120	0.127	0.139	0.148
41		0.119	0.126	0.137	0.146
42		0.117	0.124	0.136	0.145
43		0.116	0.123	0.134	0.143
44		0.115	0.121	0.133	0.141
45		0.114	0.120	0.131	0.140
46		0.112	0.119	0.130	0.138
47		0.111	0.118	0.128	0.137
48		0.110	0.116	0.127	0.136
49		0.109	0.115	0.126	0.134
50		0.108	0.114	0.125	0.133

## Annex 2: Table de Weibull

$\beta$	A	B
0,20	120	1901
0,25	24	199
0,30	9,2605	50,08
0,35	5,0731	19,98
0,40	3,3234	10,44
0,45	2,4786	6,44
0,50	2	4,47
0,55	1,7024	3,35
0,60	1,5046	2,65
0,65	1,3663	2,18
0,70	1,2638	1,85
0,75	1,1906	1,61
0,802	1,1330	1,43
0,85	1,0880	1,29
0,90	1,0522	1,17
0,95	1,0234	1,08
1	1	1
1,05	0,9803	0,934
1,10	0,9649	0,878
1,15	0,9517	0,830
1,20	0,9407	0,787
1,25	0,9314	0,750
1,30	0,9236	0,716
1,35	0,9170	0,687
1,40	0,9114	0,660
1,45	0,9067	0,635

$\beta$	A	B
1,50	0,9027	0,613
1,55	0,8994	0,593
1,60	0,8966	0,574
1,65	0,8942	0,556
1,70	0,8922	0,540
1,75	0,8902	0,525
1,80	0,8893	0,511
1,85	0,8882	0,498
1,90	0,8874	0,486
1,95	0,8867	0,474
2	0,8862	0,463
2,1	0,8857	0,443
2,2	0,8856	0,425
2,3	0,8859	0,409
2,4	0,8865	0,393
2,5	0,8873	0,380
2,6	0,8882	0,367
2,7	0,8893	0,355
2,8	0,8905	0,344
2,9	0,8917	0,334
3	0,8930	0,325
3,1	0,8943	0,316
3,2	0,8957	0,307
3,3	0,8970	0,299
3,4	0,8984	0,292
3,5	0,8997	0,285
3,6	0,9011	0,278
3,7	0,9025	0,272
3,8	0,9038	0,266
3,9	0,9051	0,260

$\beta$	A	B
4	0,9064	0,254
4,1	0,9077	0,249
4,2	0,9089	0,244
4,3	0,9102	0,239
4,4	0,9114	0,235
4,5	0,9126	0,230
4,6	0,9137	0,226
4,7	0,9149	0,222
4,8	0,9160	0,218
4,9	0,9171	0,214
5	0,9182	0,210
5,1	0,9192	0,207
5,2	0,9202	0,203
5,3	0,9213	0,200
5,4	0,9222	0,197
5,5	0,9232	0,194
5,6	0,9241	0,191
5,7	0,9251	0,186
5,8	0,9260	0,185
5,9	0,9269	0,183
6	0,9277	0,180
6,1	0,9286	0,177
6,2	0,9294	0,175
6,3	0,9302	0,172
6,4	0,9310	0,170
6,5	0,9316	0,168
6,6	0,9326	0,166
6,7	0,9333	0,163
6,8	0,9340	0,161
6,9	0,9347	0,156