الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة العربي التبسي–تبسة
Université Larbi Tebessi – Tébessa
معـــــــــهد المـــــناجم
Institut des Mines
قسم المناجم والجيوتكنولوجيا
Département des Mines et de Géotechnologie

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master

Filière : Electromécanique

Option : Maintenance industrielle

ETUDE DES PARAMETRES DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT DES MACHINES MINIERES

(CAS DE LA MINE D'OUENZA)

Par

HAMMI MANEL

Devant le jury :

Haouam Ala	**MCA**	**Président**	**Université Larbi Tebessi Tébessa**
Taleb Mounia	**MCA**	**Encadreur**	**Université Larbi Tebessi Tébessa**
Moghrani Radouane	**MAA**	**Examinateur**	**Université Larbi Tebessi Tébessa**

Promotion 2024-2025

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Larbi Tebessi – Tébessa
Institut des Mines
Département mines et géotechnologie

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة العربي التبسي – تبسة
معهد المناجم
قسم المناجم و الجيوتكنولوجيا

Année universitaire : 2024/2025 Tébessa le :

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

1--Hami Manel

Niveau : --Master 2---------- Option : Maintenance -industrielle----------

Thème : Etude des paramètres de la sureté de fonctionnement des machines minières (cas de la mine de l'Ouenza)----------

Nom et prénom de l'encadreur : - Dr TALEB Mounia

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Chapitre 1	
Chapitre 2	
Chapitre 3	
Chapitre 4	

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي: جامعة العربي التبسي – تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة): حمي منال الصفة: طالبة
الحامل(ة): لبطاقة التعريف الوطنية رقم: 41285836 الصادرة بتاريخ: 2024.09.26
المسجل(ة): بمعهد المناجم قسم: الالكتروميكانيك

والمكلف بإنجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها:

Etude des paramètres de la sureté de fonctionnement des machines minières (cas de la mine d'Ouenza)

أصرح بشرفي أني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات المهنية والنزاهة الأكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2025-06-02

إمضاء المعني (ة)


بسم الله الرحمن الرحيم

Remercîment

Tout d’abord, je remercie ALLAH de m’avoir donné le courage, la volonté et la patience pour mener à bien cette œuvre.

Je tiens également à exprimer ma gratitude et mon appréciation aux travailleurs de la mine de l’Ouenza pour leurs conseils et leur soutien pendant la période de stage pratique.

Les professeurs de l’Institut des Mines ont également fait tout leur possible pour me transmettre leurs précieuses connaissances.

Je profite également de cette occasion pour remercier mon encadreur Dr, Taleb Mounia qui m’a aidé à préparer ce travail par sa présence constante et ses bonnes suggestions, qui étaient d’une grande importance.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A ma mère, mon père et à mes très chers frères et á toute ma famille pour leur soutien inconditionnel tout au long de mes études. Sans leur amour et leur encouragement, je n'aurais jamais pu atteindre mes objectifs.

Je voudrais aussi exprimer ma gratitude envers mes amis sans exception et à mon encadreur Taleb Mounia pour son soutien et ses conseils tout au long de mes études. Grace à ses connaissances et son expertise, j'ai pu mener à bien mon projet de fin d'étude. Je lui suis reconnaissant de l'avoir eu comme superviseure.

Hammi Manel

Résumé

Dans ce travail, nous avons utilisé un fichier historique riche pour analyser et proposer des solutions aux problèmes de défaillance à la mine d'Ouenza, en nous concentrons sur les deux engines de type pelles hydrauliques. Tout d'abord, nous avons soigneusement examiné l'historique des pannes de chaque engin. Ensuite nous avons fait appel à la loi de Pareto pour classer les pannes par ordre de priorité, ce qui a montré que les défaillances hydrauliques représentaient le pourcentage le plus élevé des différents types de défaillances, de sorte que cette catégorie a été privilégiée.

Pour identifier les causes des défaillances hydrauliques, nous avons utilisé le diagramme d'Ishikawa, plus connu sous le nom de diagramme « causes à effets ». Cette analyse a révélé que les principaux facteurs contribuant à ces pannes étaient à la fois la main d'œuvre et la méthode de travail. Souhaitant approfondir notre étude sur les pannes hydrauliques, nous avons appliqué la loi de Weibull, qui nous a permis de constater des fluctuations dans la fiabilité des engins. Outre le calcul de la disponibilité.

L'objectif principal de cette étude était de réduire les pannes en augmentant la fiabilité et la productivité des machines. Grâce à nos résultats, nous avons pu identifier les causes des défaillances hydrauliques, ce qui nous a permis de proposer des solutions concrètes visant à minimiser ces défaillances et à optimiser la maintenance de nos équipements.

ملخص

ان اجراء دراسات السلامة التشغيلية في شركة صناعية له اهمية حيوية للحفاظ على المعدات في حالة عمل جيدة كذلك ضمان مستوى جيد من السلامة للأفراد العاملين على المعدات.

الهدف من هذا العمل هو تقييم السلامة التشغيلية لآلتان في منجم الونزة لتقليل الاعطال وزيادة موثوقية الالة. بحيث كان الجزء الاول عبارة عن فحص لتاريخ اعطال كل الة بعناية، اما كجزء ثاني تضمن تطبيق عدة طرق اولها قانون باريتو لترتيب الاعطال حسب الاولوية ثم مخطط إيشيكاوا للكشف عن العوامل الرئيسية للأعطال فيما بعد قانون ويبل الذي كشف عن تقلبات في موثوقية الآلات. بعد ذلك قمنا بحساب التوافر اما كجزء ثالث كان عبارة عن اقتراح برنامج صيانة وقائي مبني على النتائج التي توصلنا اليها، بهدف الحد من تكرار الأعطال ورفع مستوى السلامة التشغيلية.

Abstract

Operational safety is an essential element in the field of maintenance because it directly affects the efficiency of equipment and the safety of workers. From this perspective, this work aims to minimise failures and propose a maintenance programme to reduce them for two machines used in the Ouenza mine.

This work mainly consists of several phases, the first phase is to analyses the failure history of each machine, and the second phase focuses on the causes of the failures using analytical tools: Pareto chart to identify the most common causes, Ishikawa chart to detail the factors that contribute to failures, Weibull law to estimate the reliability of the machine. Finally, the availability calculation.

As a third stage, a preventive maintenance plan was proposed to avoid the recurrence of these failures based on our findings.

TABLE DES MATIERS

I- Remercîment

II- Dédicace

III- Résumé

IV- Table des matières

VI- Table des tableaux

X- Table des figures

XI- Abréviations

Introduction générale	01
Chapitre I : Notions générales sur la maintenance	
1. Introduction	03
2. Définition de la maintenance d'après l'AFNOR (NF EN 13306)	03
3.L'importance de la maintenance	03
4.Objectifs de La maintenance	03
4.1. Objectifs financiers	04
4.2. Objectifs opérationnels	04
5. Les types de maintenance	04
5.1. La maintenance préventive	04

5.1.1. La maintenance préventive systématique	05
5.1.2. La maintenance préventive conditionnelle	07
5.1.2.1. La maintenance prédictive	08
5.1.2.2. Opérations de la maintenance préventive	08
5.2. La maintenance corrective (NF EN 13306 X 60-319)	08
5.2.1. Maintenance palliative	09
5.2.2. Maintenance curative	09
5.2.3. Opérations de la maintenance corrective	09
5.2.4. Avantages et inconvénients de la maintenance corrective	09
5.3. La maintenance améliorative	10
5.3.1. Les opérations de la maintenance améliorative	10
5.3.2. Les objectifs de la maintenance améliorative	10
5.4. Organigramme de la maintenance	11
6. Rôle de la maintenance	11
7. Niveaux de maintenance	11
7.1. Premier niveau	11

7.2. Deuxième niveau	12
7.3. Troisième niveau	12
7.4. Quatrième niveau	12
7.5. Cinquième niveau	12
8. Influence de la maintenance	13
9. Stratégie de maintenance	13
10. Outils de la maintenance	14
11. Politique de maintenance	14
12. Conclusion	15
Chapitre II : Concepts de sûreté de fonctionnement	
1. Introduction	16
2. Historique	16
3. Définition	17
4. Concept FMDS	17
4.1. Fiabilité	17
4.2. Maintenabilité	18

4.2.1. Amélioration de la maintenabilité	19
4.3. La disponibilité	19
4.3.1. Types et Quantification de disponibilité	20
4.3.2. Amélioration de la disponibilité	21
4.4. La sécurité	21
4.4.1. Mesures de sécurité	21
5. Temps de fiabilité, maintenabilité et disponibilité	22
6. Objectif de la sûreté de fonctionnement	22
7. Cout de la sureté de fonctionnement	22
8. Méthodes d'analyse de sûreté de fonctionnement	23
9. Conclusion	24
Chapitre III : Les lois de probabilité utilisées en fiabilité	
1. Introduction	25
2. Concepts de défaillance	25
2.1. Définition de la défaillance	25
2.2 Cause de défaillance	26

2.3. Classification des défaillances	26
2.4. Les modes de défaillance	27
2.5. Les effets d'une défaillance	27
2.6. Les différentes Phases du Cycle de Vie d'un produit	27
3. Concepts de fiabilité	28
3.1. Définition de fiabilité	28
3.2. Types de fiabilité	28
3.3. Fiabilité des systèmes	29
3.4. Fiabilité de système constitué de plusieurs composants	29
3.4.1. Système en série	29
3.4.2. Système en parallèle	30
3.4.3. Système combiné	30
3.5. Les indicateurs de fiabilité	30
3.5.1. Le taux de défaillance λ	30
3.5.2. Temps moyen de bon fonctionnement	31
3.5.3. MTTF (Mean Time to Failure)	32

3.6. Les Lois usuelles en fiabilité	32
3.6.1. Lois discrètes	32
3.6.1.1. Loi de Bernoulli	32
3.6.2. Les lois continues	33
3.6.2.1. Loi exponentielle expo(λ)	33
3.6.2.2 Loi de Wei bull W (β ; η)	34
3.6.2.3. La Loi Normale	34
7. Approche de la fiabilité par les probabilités	35
8. La relation entre la fiabilité et la maintenance	35
9. Objectifs et intérêts de la fiabilité	36
10. Conclusion	37
Chapitre IV : Etude de cas (Liebherr R 9100, Caterpillar 349D2L)	
1. Introduction	38
2. Historique	38
3. La Mine de l'Ouenza	39
3.1. Situation Géographique	39

3.2. Procédure de travail	39
4. Structure de maintenance au sein de la mine de l'Ouenza	40
4.1. Département MRO/C	40
4.2. Département chantiers extérieurs	41
4.3. Service Électrique	41
4.4. Service ATC	41
5. Parc /Carrière	42
6. Etude théorique et statistique	42
6.1. La pelle hydraulique (Liebherr R 9100)	42
6.1.1. Etude d'heures d'arrêt par nature de pannes	43
6.1.2. Etude du nombre de pannes par nature de pannes	45
6.2. La pelle hydraulique Caterpillar 349D2L	46
6.2.1 Etude d'heure d'arrêt par nature de pannes	47
6.2.2. Etude du nombre de pannes par nature de pannes	48
7. Etude des deux engins ensemble	49

8. Application de la loi de Pareto (loi des 20-80)	52
9. Application Ishikawa	57
10. Application la loi de Weibull	60
11.Calcul de la disponibilité	65
12. Proposition d'un programme de maintenance préventive	66
13. Conclusion	68
Conclusion générale	69
Bibliographie	

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II : Concepts de sureté de fonctionnement	
Tableau II.01 : Les Proposition permettant de diminuer les pannes	19
Chapitre IV : Etude de cas (Liebherr R 9100, Caterpillar 349D2L)	
Tableau IV.01 : Les engins disponibles au niveau de la mine d'Ouenza	42
Tableau IV.02 : Historique des pannes Liebherr R 9100	43
Tableau IV.03 : Historique des pannes Caterpillar 349D2L	46
Tableau IV.04: Etude d'heures d'arrêt par nature des pannes des deux engins	49
Tableau IV.05 : Etude du nombre de pannes par nature de panne des deux engins	50
Tableau IV.06 : Statistique d'heures d'arrêt de Liebherr R 9100	52
Tableau IV.07 : Statistique du nombre de panne de Liebherr R 9100	53
Tableau IV.08 : Statistique d'heures d'arrêt de Caterpillar 349D2L	54
Tableau IV.09 : Statistique du nombre de panne de Caterpillar	56
Tableau IV.10: Les paramètres de Weibull de deux engins	60
Tableau IV.11 : La fiabilité des deux engins	63
Tableau IV.12 : La disponibilité des deux engins	65

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Notions générales sur la maintenance	
Figure I.01 : Schéma de la maintenance préventive	05
Figure I.02 : Schéma des cas d'utilisation de la maintenance préventive systématique	06
Figure I.03 : Schéma de la maintenance préventive conditionnelle	07
Figure I.04 **:** Organigramme de la maintenance	11
Figure.I.05 **:** Les niveaux de maintenance	13
Chapitre II : Concepts de sûreté de fonctionnement	
Figure II.01 : Historique de la sûreté de fonctionnement	16
Figure II.02 **:** Composantes de sûreté de fonctionnement	17
Figure II.03**:** Relation entre la disponibilité, la fiabilité et la maintenabilité	20
Figure II.04 **:** Les durées caractéristiques de FMD	22
Chapitre III : Les lois de probabilité utilisées en fiabilité	
Figure III.01 **:** Triptyque « faute - défaut – défaillance »	25
Figure III.02 **:** Classification des défaillances	26

Figure III.03**:** Courbe en baignoire : taux de défaillance	28
Figure III.04 **:** Système en série	29
Figure III.05**:** Système en parallèle	30
Chapitre IV : Etude de cas (Liebherr R 9100, Caterpillar 349D2L)	
Figure IV.01 : Situation géographique de la ville de l'Ouenza	39
Figure IV.02 : Process d'exploitation	40
Figure IV.03 : Organisation de la division maintenance	41
Figure IV.04: Schéma de Liebherr R 9100	42
Figure IV.05: Evolution du temps d'arrêt de Liebherr R 9100	44
Figure IV.06: Evolution du nombre de pannes de Liebherr R 9100	45
Figure IV. 07 : Schéma du Caterpillar 349D2L	46
Figure IV.08 : Evolution du temps d'arrêt de Caterpillar 349D2L	47
Figure IV.09 : Evolution du nombre de pannes de Caterpillar 349D2L	48
Figure IV.10: Heures d'arrêt par nature de pannes de deux engins ensemble	49
Figure IV.11 : Nombre de pannes par nature de pannes de deux engins ensemble	51
Figure IV.12 **:** Diagramme de Pareto heures d'arrêt (Liebherr R 9100)	52

Figure IV.13 : Diagramme de Pareto nombre de pannes (Liebherr R 9100)	54
Figure IV.14 : Diagramme de Pareto heures d'arrêt (Caterpillar 349D2L)	55
Figure IV.15: Diagramme de Pareto nombre de pannes (Caterpillar 349D2L)	56
Figure IV. 16 : Diagramme d'Ishikawa (pannes hydraulique)	58
Figure IV.17 : Application de la loi de Weibull (Liebherr R 9100)	61
Figure IV.18: Application de la loi de Weibull (Caterpillar 349D2L)	62
Figure IV.19: Diagramme de la fiabilité des deux engins pendant 5 ans	63
Figure IV.20 : Diagramme de la disponibilité des deux engins pendant 05 ans	65

Abréviations

AFNOR : Association Française de normalisation

NF : Norme française

GMAO : Gestion de maintenance assistée par ordinateur

AMDEC : Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité

MTBF : Temps moyen de bon fonctionnement

APR : L'analyse préliminaire des risques

ADD : Arbres de défaillances

AMDE : L'analyse des modes de défaillance et de leurs effets

SDF : La sûreté de fonctionnement

FDMS : Fiabilité, disponibilité, maintenabilité et la sécurité

R(t) : Fonction fiabilité

f (t) : Fonction de répartition

X : Variable aléatoire non négative

μ : le taux de réparation

$M(t)$:la maintenabilité

Do : Disponibilité opérationnelle
MDT : Mean down time
MUT : Mean up time
MTTR : Le temps technique moyen de réparation
MTL : Moyenne des temps logistiques
MTTF: Mean time to [first] failure
APD : Analyse Préliminaire des Dangers.
MAC : Méthode de l'Arbre des Causes.
MDCC : Méthode du Diagramme Causes-Conséquences
λ : Le taux de défaillance
t : le temps
e : est la base de l’exponentielle
β : Paramètre de forme
η : Paramètre d’échelle
F(t) : Fonction de densité
σ : l'écart type

n : le nombre total d'individus dans l'échantillon
n(x) : le nombre d'individus pour lesquels la grandeur analysée a la valeur x
SONAREM : société nationale de la recherche te de l'exploitation minière
γ : Paramètre de position
A : Valeur sur le tableau de Weibull
Di : Disponibilité intrinsèque
RMAS : Reliability, Maintainability, Availability, Safety.
HYD : Hydraulique
MEC : Mécanique
ELC : Électrique

INTRODUCTION GENERALE

1.Introduction générale

La maintenance joue un rôle essentiel dans la gestion et la performance des équipements industriels. Une maintenance efficace permet de minimiser les temps d'arrêt non planifiés, d'optimiser les coûts et d'améliorer la fiabilité des équipements. Cependant, la maintenance basée sur des stratégies traditionnelles peut être coûteuse et inefficace, car elle ne prend pas pleinement en compte la fiabilité réelle des équipements. [24]

Dans ce mémoire d'étude intitulé « Etude les paramètres de la sûreté de fonctionnement des machines minières », nous discutons de l'importance d'adopter une approche basée sur la sûreté de fonctionnements dans la gestion de la maintenance industrielle. L'objectif principal de cette étude est de proposer une méthodologie et des outils pour optimiser les activités de maintenance.

Dans un premier temps, nous présenterons les principaux concepts liés à la maintenance, nous examinerons les notions de sûreté de fonctionnement, ainsi que les différentes lois de probabilité utilisées pour modéliser le comportement des équipements dans le temps. Nous mettrons en évidence l'importance de la collecte et de l'analyse des données de défaillance pour évaluer la fiabilité des équipements. Nous détaillerons les différentes étapes de cette méthodologie, de la collecte des données à l'analyse statistique.

Enfin, nous présenterons des études de cas et des résultats obtenus à partir de l'application de cette méthodologie.

Le mémoire est structuré en 4 chapitres :

Le premier chapitre est focalisé sur les généralités de la maintenance, présente les différents types de maintenance, les objectifs, L'importance, le Rôle, les niveaux et les outils de la maintenance.

Le Deuxième chapitre est focalisé sur concepts de la sûreté de fonctionnement, présente les principes fondamentaux de la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité des équipements, l'objective. Il aborde également les méthodes d'analyse utilisés pour évaluer la sûreté de fonctionnement.

Le Troisième chapitre est focalisé sur les concepts et lois de fiabilité présente les définitions et principes de la fiabilité, les lois et modèles mathématiques utilisés pour évaluer la fiabilité des Équipements. Tels que la loi exponentielle, la loi de Weibull, …etc.

Le quatrième chapitre est focalisé sur d'étudier les paramètres de la sûreté de fonctionnement pendent 5 ans de deux engines sélectionnées et de proposer un programme de maintenance à l'aide de données spécifiques et les résultats obtenus.

CHAPITRE I

NOTIONS GENERALES SUR LA MAINTENANCE

1. Introduction

Le maintien des équipements de production est un enjeu clé pour la productivité des usines aussi bien que pour la qualité des produits. C'est un défi industriel impliquant la remise en cause des structures figées actuelles et la promotion de méthodes adaptées à la nature nouvelle des matériels.

2. Définition de la maintenance d'après l'AFNOR (NF EN 13306)

Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.[01]

3.L'importance de la maintenance

La maintenance est importante pour l'industrie, ce qui paraît clair lors de l'occurrence des pannes provoquant des arrêts non planifiés. Par conséquent, toute interruption au cours du fonctionnement cause, comme entre autres :

- Augmentation du coût de productions.
- Diminution de la marge du profit.
- Rupture du stock.
- Retard des livraisons.
- Ajout des heures supplémentaires.
- Absence des sécurités des opérateurs.

Donc, si on planifie et on prévoit des entretiens planifiés avant l'occurrence des pannes, on pourra surmonter ces conséquences. [02]

4.Objective de La maintenance

Le zéro panne c'est l'objectif principal de la maintenance.

L'objectif des équipes de maintenance est de maintenir les installations de production en parfait état et d'assurer le rendement global maximum tout en optimisant le coût. L'obtention du meilleur rendement passe par la prévention des pannes, le respect des cadences de production et l'amélioration continue de la qualité des produits. Maintenir, ce n'est plus subir les pannes mais maîtriser les défaillances par l'optimisation de la politique de maintenance, par une bonne prévention, par des réparations rapides et efficaces, enfin par l'amélioration du matériel.

Pour assurer correctement cette mission, il est nécessaire de se doter en plus de la compétence Technique des hommes, d'une organisation efficace et d'outils adéquats. C'est la nature de L'entreprise qui fixe les l'objectifs, des services de la maintenance. On peut classer les objectifs De la maintenance en deux catégories :

- Les objectifs financiers.
- Les objectifs opérationnels.

Le fait que ces deux objectifs sont différents expliquera pourquoi la production et la maintenance sont souvent à couteau tirés et pourquoi les deux attitudes sont apparemment opposées. [03]

4.1. Objectifs financiers

- Réduire au minimum les dépenses de la maintenance.
- Augmenter au maximum les profits.
- Avoir des dépenses de maintenance en fonction de l'âge des installations et de son taux d'utilisation. [03]

4.2. Objectifs opérationnels

- Maintenir les équipements.
- Assurer la disponibilité maximale des installations et des équipements.
- Fournir un service qui élimine la panne à tous les moments à tout prix.
- Pousser à la dernière limite la durée de vie de l'installation.
- Assurer une performance (rendement) de haute qualité. [03]

Remarque : Les objectifs peuvent changer avec le temps, une révision de ces derniers selon la Politique de l'entreprise doit avoir lieu tous les deux ans. [03]

5. Les types de maintenance

5.1. La maintenance préventive

Définition : « Maintenance effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu ». Elle doit permettre d'éviter les défaillances du matériel en cours d'utilisation. L'analyse des coûts doit mettre en évidence un gain par rapport aux défaillances qu'elle permet d'éviter. [04]

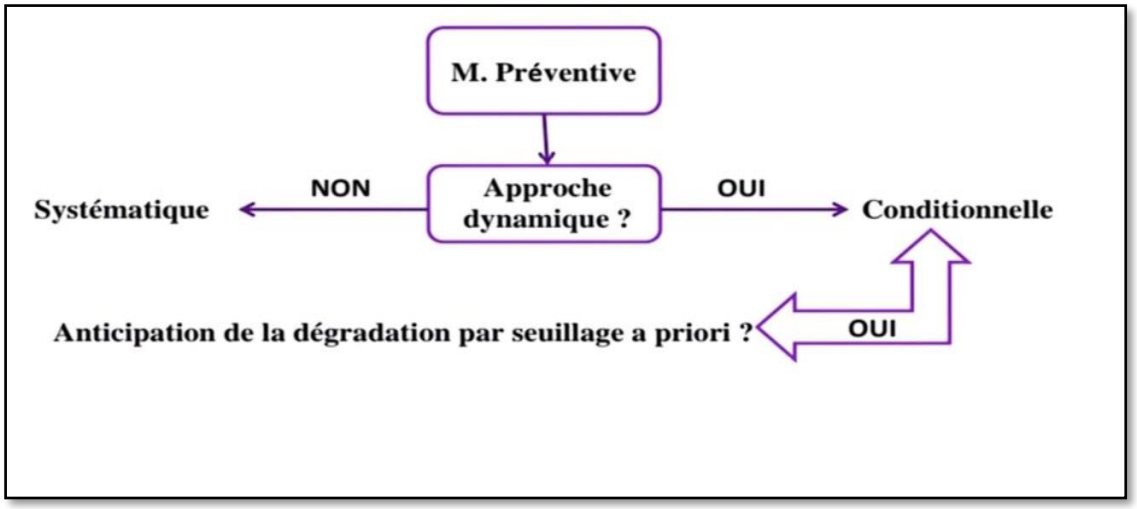


Figure I.01 : Schéma de la maintenance préventive.

But de la maintenance préventive

- Augmenter la durée de vie des matériels.
- Diminuer la probabilité des défaillances en service.
- Diminuer le temps d'arrêt en cas de révision ou de panne.
- Prévenir et aussi prévoir les interventions de la maintenance corrective coûteuse.
- Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions.
- Eviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, etc.
- Diminuer le budget de la maintenance.
- Supprimer les causes d'accidents graves. [04]

On a deux types de maintenance préventive :

5.1.1. La maintenance préventive systématique

Définition : « Maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage. » [04]

Conditions d'applications

Cette méthode nécessite de connaître : le comportement du matériel, les usures, les modes de dégradations, le temps moyen de bon fonctionnement entre deux avaries (MTBF). [04]

Remarque : De plus en plus les interventions de la maintenance systématique se font par échanges standards.

Cas d'applications

La maintenance systématique peut être appliquée dans les cas suivants :

- Equipements soumis à la législation en vigueur (sécurité réglementée). Par Exemples Appareil de levage, extincteur (incendie), réservoir sous pression, convoyeurs, ascenseurs, monte-charge, etc.
- Equipements dont la panne risque de provoquer des accidents graves. Par exemples : tout le matériel assurant le transport en commun des personnes, avion, trains, etc.
- Equipements ayant un coût de défaillance élevé. Par exemples : éléments d'une chaîne automatisée, systèmes fonctionnant en continu.
- Equipements dont les dépenses de fonctionnement deviennent anormalement élevées au cours de leur temps de service. Par exemples : consommation excessive d'énergie, allumage et carburation déréglés pour les véhicules à moteurs thermiques.[04]

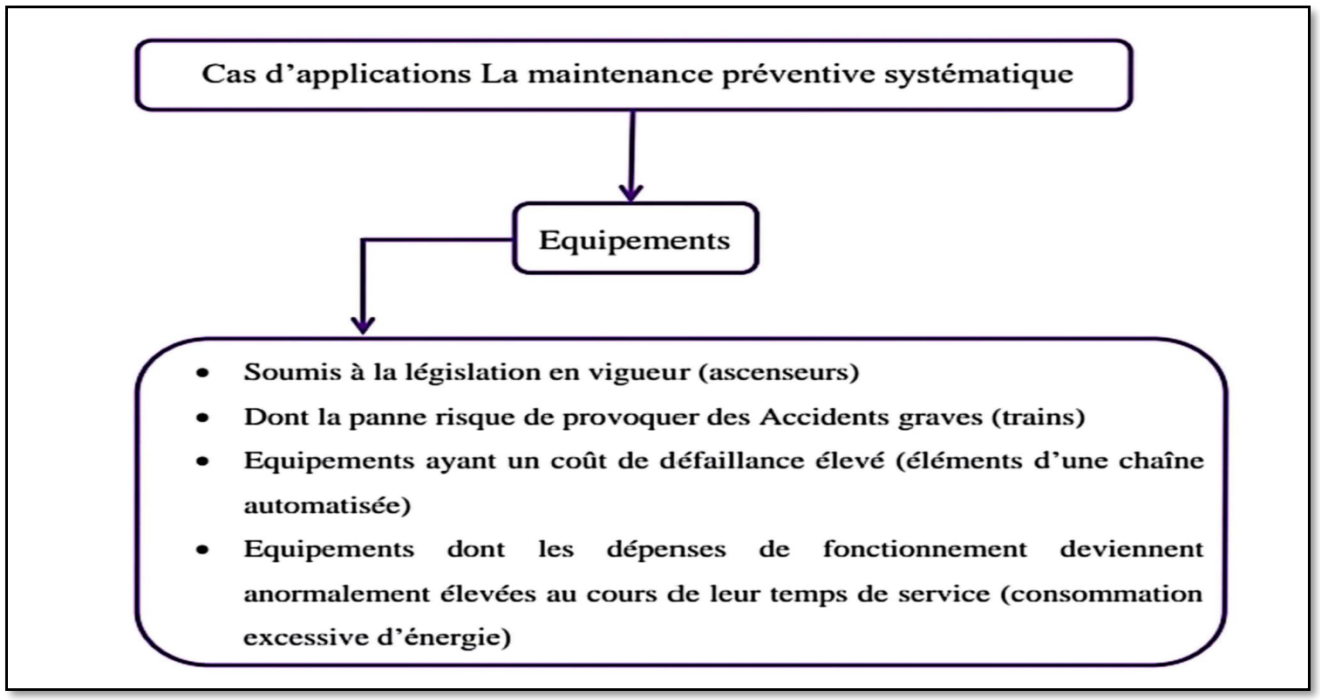


Figure I.02 : Schéma des cas d'utilisation La maintenance préventive systématique**.**

Avantages et inconvénients de la maintenance préventive systématique.[07]

➢**Avantages :**

- Réduction des coûts (30%) et des durées de maintenance par rapport à l'entretien curatif.
- Bonne planification des opérations et des ressources.
- Contrôle du niveau de stockage des pièces de rechange.

➢Inconvénients :

- Révisions non nécessaires (l'entretien n'est pas fonction de l'état de la machine, mais Plutôt de la durée d'utilisation).
- Remplacement de pièces en bon état.
- Création de défauts lors des remontages (si les procédures ne sont pas claires et Contrôlées).

5.1.2. La maintenance préventive conditionnelle

Définition : Maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé, (Autodiagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.), révélateur de l'état de dégradation du bien. [05]

Remarque : la maintenance conditionnelle est donc une maintenance dépendant de l'expérience et faisant intervenir des informations recueillies en temps réel. On l'appelle parfois maintenance prédictive.

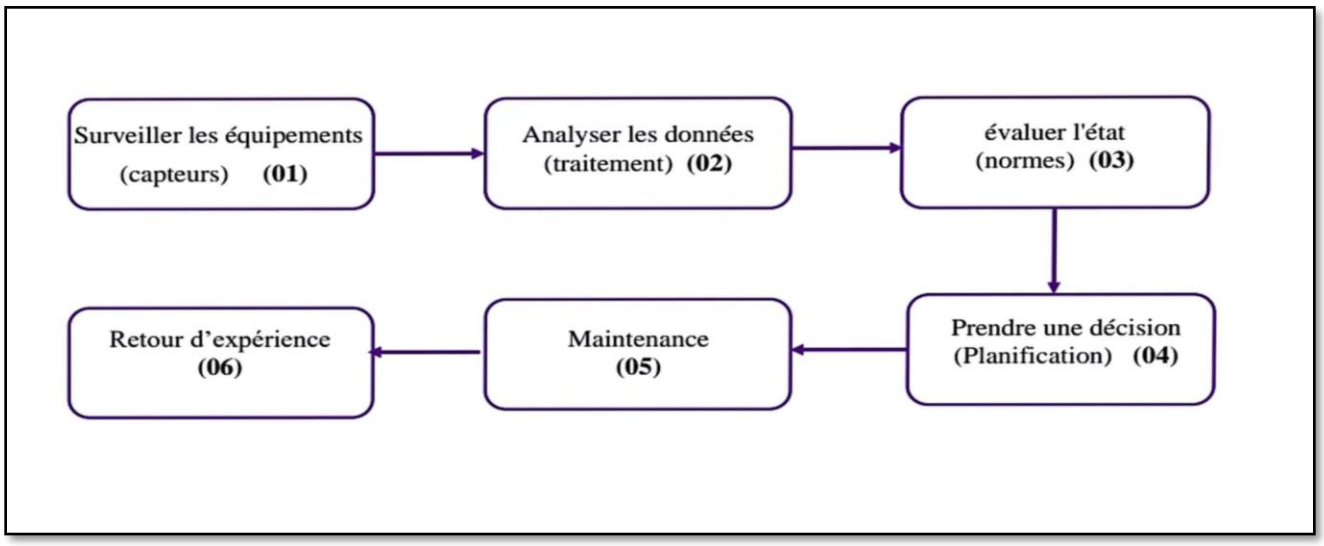


Figure I.03 : Schéma de la maintenance préventive conditionnelle.

Conditions d'applications

La maintenance préventive conditionnelle se caractérise par la mise en évidence des points faibles. Suivant le cas, il est souhaitable de les mettre sous surveillance et, à partir de là, de décider d'une intervention lorsqu'un certain seuil est atteint. Mais les contrôles demeurent systématiques et font partie des moyens de contrôle non destructifs. [04]

Cas d'application

Tous les matériels sont concernés. Cette maintenance se fait par des mesures pertinentes sur le matériel en fonctionnement. [04]

Et dans la maintenance conditionnelle on a :

5.1.2.1. La maintenance prédictive

Est une maintenance conditionnelle basée sur le franchissement d'un seuil prédéfini qui permet de donner l'état de dégradation du bien avant sa détérioration complète. [04]

5.1.2.2. Opérations de la maintenance préventive

- **Inspection :** contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou Calibrant les caractéristiques significatives d'un bien, elle permet de relever des anomalies et d'exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique, ni d'arrêt de la production ou des équipements (pas de démontage).
- **Contrôle** : vérification de la conformité à des données préétablies, suivie d'un jugement. Ce contrôle peut déboucher sur une action de maintenance corrective ou alors inclure une décision de refus, d'acceptation ou d'ajournement.
- **Visite :** examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite Limitée) des différents éléments du bien et pouvant impliquer des opérations de maintenance de la première et de deuxième niveau, il peut également déboucher sur la maintenance corrective.
- **Test :** comparaison des réponses d'un système par rapport à un système de référence ou à un phénomène physique significatif d'une marche correcte.
- **Echange standard :** remplacement d'une pièce ou d'un sous-ensemble défectueux par une pièce identique, neuve ou remise en état préalablement, conformément aux prescriptions du constructeur.
- **Révision :** ensemble complet d'examens et d'actions réalisées afin de maintenir le niveau de disponibilité et de sécurité d'un bien. Une révision intervalles prescrits du temps ou après Un nombre déterminé d'opérations. Une révision demande un démontage total ou partiel du bien. Le terme révision ne doit donc pas être confondu avec surveillance. Une révision est une action de maintenance de niveau. [05]

5.2. La maintenance corrective (NF EN 13306 X 60-319)

Maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise.[06]

- **Maintenance effectuée après défaillance.**

Défaillance : Altération ou cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir la fonction requise.

5.2.1. Maintenance palliative

La maintenance palliative regroupe les activités de maintenance corrective destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. [07]

5.2.2. Maintenance curative

La maintenance curative regroupe les activités de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. [07]

5.2.3. Opérations de la maintenance corrective

Après apparition d'une défaillance, le maintenancier doit mettre en œuvre un certain nombre d'opérations dont les définitions sont données ci-dessous.

Ces opérations s'effectuent par étapes (dans l'ordre) :

- **Test :** prendre les mesures de l'état actuel système affecté et les comparé à Une référence.
- **Détection :** action de déceler l'apparition d'une défaillance.
- **Localisation :** trouver les éléments ou les composants défaillant.
- **Diagnostic :** identification et analyse des causes de la défaillance.
- **Dépannage** : réparation ou remise en état (avec ou sans modification).
- **Contrôle :** s'assurer que le système est en bon fonctionnement après l'intervention.
- **Amélioration éventuelle :** c'est à dire éviter la réapparition de la panne.
- **Historique :** enregistré ou mise en mémoire de l'intervention pour une exploitation ultérieure en cas ou la même panne apparaisse une autre fois. [08]

5.2.4. Avantages et inconvénients de la maintenance corrective. [08]

➢Avantages :

- Faible coût de maintenance.

➢Inconvénients :

- Peu de sécurité des travailleurs.
- Temps de réparation élevé.
- Perte de production élevée.

5.3. La maintenance améliorative

L'amélioration des biens d'équipement est un ensemble des mesures techniques, administratives et de gestion, destinées à améliorer la sûreté de fonctionnement d'un bien sans changer sa fonction requise (norme NF EN 13306). [09]

5.3.1. Les opérations de la maintenance améliorative.[10]

- **Rénovation**

Inspection complète de tous les organes, reprise dimensionnelle complète ou remplacement des pièces déformées, vérification des caractéristiques et éventuellement réparation des pièces et sous-ensembles défaillants, conservation des pièces bonnes. La rénovation apparaît donc comme l'une des suites possibles d'une révision générale au sens strict de sa définition.

- **Reconstruction**

Remise en l'état défini par le cahier des charges initial, qui impose le remplacement de pièces vitales par des pièces d'origine ou des pièces neuves équivalentes. La reconstruction peut être assortie d'une modernisation ou de modifications. Les modifications apportées peuvent concerner, en plus de la maintenance et de la durabilité, la capacité de production, l'efficacité, la sécurité, etc.

- **Modernisation**

Remplacement d'équipements, accessoires et appareils ou éventuellement de logiciel Apportant, grâce à des perfectionnements techniques n'existant pas sur le bien d'origine, une amélioration de l'aptitude à l'emploi du bien. Cette opération peut aussi bien être exécutée dans le cas d'une rénovation, que dans celui d'une reconstruction. La rénovation ou la reconstruction d'un bien durable peut donner lieu pour certains de ses sous- ensembles ou organes à la pratique d'un échange standard.

5.3.2. Les objectifs de la maintenance améliorative

- L'augmentation des performances de production.
- L'augmentation de la fiabilité.
- L'amélioration de la maintenabilité.
- La standardisation de certains éléments ou sous-ensemble.
- L'augmentation de la sécurité des utilisateurs. [04]

5.4. Organigramme de la maintenance

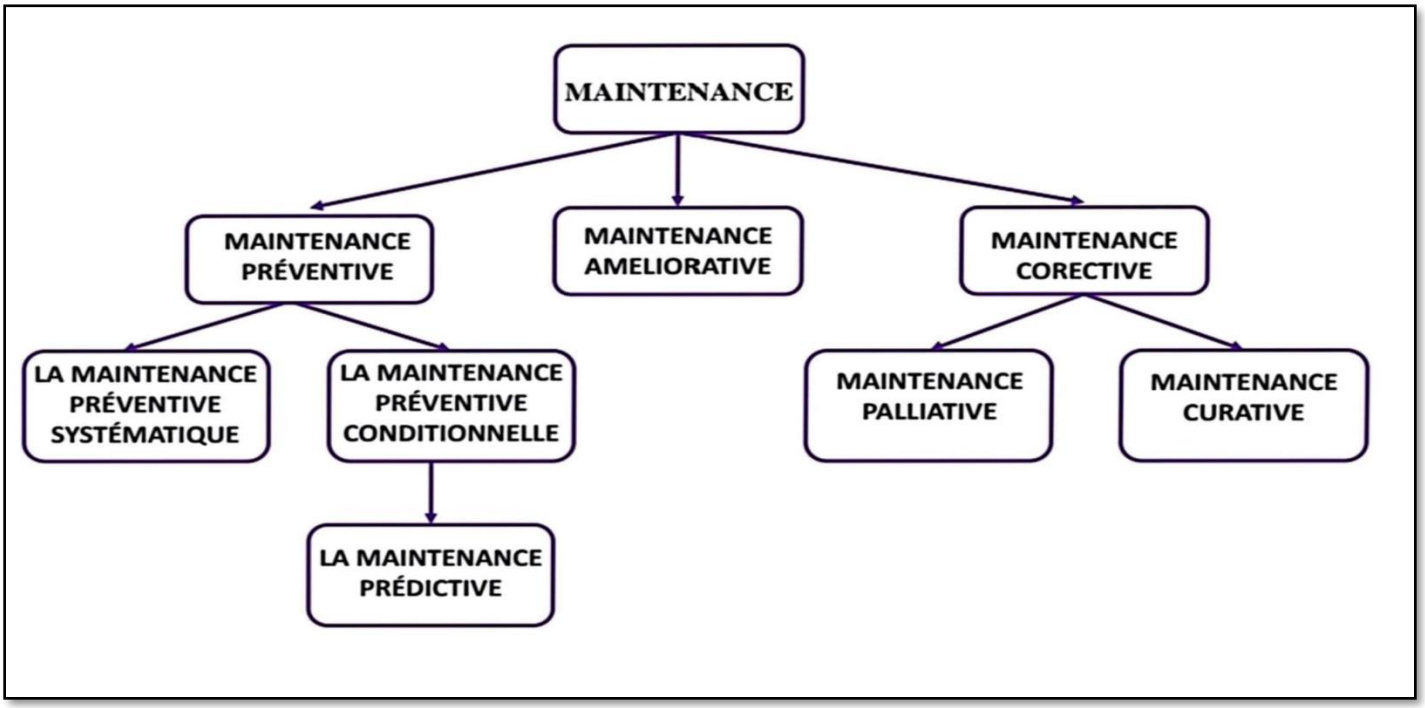


Figure I.04 : Organigramme de la maintenance. [24]

6. Rôle de la maintenance

L'association des maintenances préventive et corrective a pour objectif la préservation des machines industrielles de l'entreprise. Il s'agit autant de préserver la valeur des machines (une machine mal entretenue perd rapidement sa valeur) que leurs performances (afin d'assurer la productivité de l'entreprise) et de leur sécurité (afin d'éviter les accidents de travail). [11]

7. Niveaux de maintenance

Les cinq niveaux de maintenance ont été introduits par la norme NF-X 60-010 de 1994.

7.1. Premier niveau

- Le niveau 1 de maintenance correspond à des réglages de base, simples à réaliser.

Une opération de niveau 1 ne nécessite ni l'ouverture ni le démontage de la machine. Elle peut être réalisée par un salarié de l'entreprise non spécialisé dans la maintenance. L'opération ne Nécessite que peu de pièces et les risques associés sont réduits au minimum. L'opérateur dispose d'une notice explicative ou d'une documentation suffisante. [11]

7.2. Deuxième niveau

- Le niveau 2 de maintenance concerne des opérations peu complexes.

L'opérateur a à sa disposition une procédure simple qu'il peut suivre pour réaliser l'opération. Les pièces changées ne nécessitent pas le démontage complet de la machine. Un technicien de qualification moyenne peut réaliser cette opération. Il devra néanmoins avoir été formé auparavant. [11].

7.3. Troisième niveau

- Le niveau 3 de maintenance concerne des opérations complexes.

Une identification des éléments concernés et un diagnostic doivent être réalisés préalablement. L'opération est réalisée par un technicien spécialisé qui connaît la machine dans son ensemble Ainsi que son fonctionnement. Des outils spécifiques sont utilisés et l'opérateur dispose d'un dossier d'instructions de maintenance Complet. L'intervention peut être réalisée sur place ou dans un atelier spécialisé. [11]

7.4. Quatrième niveau

- Le niveau 4 de maintenance concerne des opérations de grande importance.

Ces opérations nécessitent une expertise spécifique. Elles sont réalisées par un ou plusieurs techniciens qualifiés sous la supervision d'un responsable spécialisé. Les opérations de maintenance de niveau 4 sont exécutées dans un Ateliers avec un outillage spécial. Une documentation complète est fournie. Des bancs de mesure pour les réglages sont disponibles. [11]

7.5. Cinquième niveau

- Le niveau 5 de maintenance concerne des opérations complexes multiples.

Ces opérations sont généralement réalisées par e constructeur lui-même, ou par un prestataire Expert agréé. L'outillage nécessaire est plutôt lourd et doit passer de nombreux contrôles de conformité. [11]

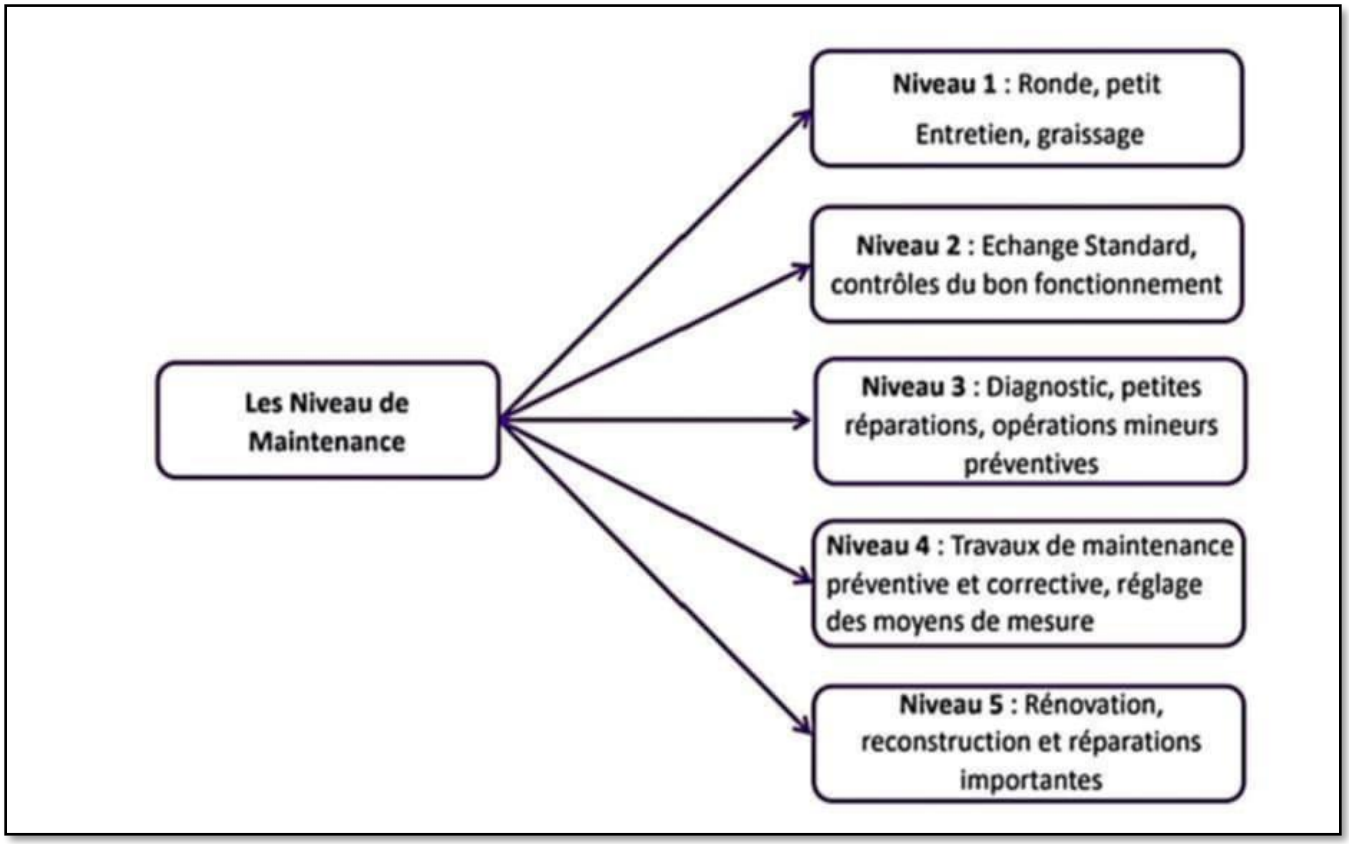


Figure.I.05 : Les niveaux de la maintenance. [12]

8. Influence de la maintenance [12]

- **Effet sur le produit :**

- Coût horaire de production.
- Choix des équipements.

- **Conception :**

- Maintenabilité.
- Fiabilité.
- Disponibilité.

- **Suivi de l'équipement :**

- Implication dès l'installation.
- Réduire le ratio de bris / production.

9. Stratégie de maintenance

C'est l'ensemble des principes qui guident l'organisation des activités de la maintenance.

10. Outils de la maintenance

Tout comme l'intervention technique, l'organisation et la gestion des activités de maintenance nécessitent l'emploi d'outils d'usage et de nature différente :

- **Outils mathématiques :** pour choisir les politiques de maintenance les mieux adaptées à chaque type d'équipement, déterminer les périodes d'intervention, connaitre la fiabilité, maintenabilité, disponibilité, Probabilité, loi statistique, algèbres d'événement, analyses…)
- **Outils organisationnels :** pour faciliter la prise de décision (AMDEC, asymptotique, logigramme…), la mise en œuvre de la maintenance préventive (technique de contrôle), ou l'organisation des interventions (procédures et modes opératoires).
- **Outils informatiques :** pour la gestion des éléments maintenus, des ressources et des budgets (GMAO) ou pour l'aide à la décision. [41]

11. Politique de maintenance [42]

Selon l'association française de normalisation (AFNOR), une politique de maintenance consiste à fixer les orientations (méthodes, programmes, budgets … etc.) dans le cadre des objectifs fixés par les responsables de l'entreprise, selon un politique choisi et dans le cadre de l'optimisation des coûts de production, les orientations privilégient dont comme suit :

- Disponibilité qui est l'aptitude d'une entité à accomplir ces fonctions requises dans des conditions données à un instant ou pendant un intervalle de temps en supposant la fourniture des moyens extérieurs soit assuré.
- Sécurité du personnel et des biens de maintes dangers liés au fonctionnement et aux actions de maintenance.
- Qualité de la production tout en protégeant l'environnement.
- Optimisation des coûts de la maintenance.

12. Conclusion

Il est évident que la maintenance joue un rôle crucial dans le secteur industriel pour réduire les dépenses et prévenir les incidents. C'est une fonction complexe qui peut, en fonction du processus, être essentielle pour le succès d'une entreprise. Les fonctionnalités qu'elle englobe et les opérations qu'elle effectue doivent être minutieusement calibrées afin d'optimiser les performances globales de l'instrumentation de production.

CHAPITRE II

CONCEPTS DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT

1. Introduction

La science des défaillances est également connue sous le nom de sûreté de fonctionnement. Elle englobe la connaissance, l'évaluation, la prévision, la mesure et la maîtrise des défaillances. C'est un domaine transversal qui requiert une compréhension totale du système, incluant les conditions d'utilisation, les risques externes, l'architecture fonctionnelle et matérielle, ainsi que la structure et la résistance des matériaux. De nombreuses améliorations proviennent de l'analyse rétrospective et des rapports d'accidents.

2. Historique

1940 -1950 : une discipline se développe sous le nom de « théorie de la fiabilité », suite à la comparaison des fréquences des pannes des avions utilisés pendant la deuxième guerre mondiale. Elle est appliquée à l'électronique dans l'aéronautique, la défense et le nucléaire.

1960 - 1970 : généralisation de cette approche probabiliste à d'autres composants : Mécaniques, hydrauliques, électriques, puis aux hommes, aux logiciels... et développement de Nouvelles méthodes (APR, Arbres de défaillances (ADD, AMDE...) permettant de maitriser les risques.

1980 : Formalisation de l'approche globale de la sûreté de fonctionnement dans le cadre de la conception des systèmes complexes et l'apparition de plusieurs approfondissements qui se manifestent dans le développement : des bases de données de fiabilité, des méthodes d'analyse et de modélisation, des logiciels de calculs, des logiciels de modélisation, …etc. [40]



Figure II.01 : Historique de la sûreté de fonctionnement. [40]

3. Définition

La sûreté de fonctionnement (dependability en anglais) d'un système (Sdf) est définit comme la qualité du service délivrée par un système, qualité telle que les utilisateurs de ce service puissent placer une confiance justifiée dans le système qui le délivre. Son objectif est connu et maitrise les risques de disfonctionnement des produits et des systèmes complexes, et en particulier leur fiabilité en mettant en œuvre des méthodes prévisionnelles, expérimentales et opérationnelles appropriées. Elle est caractérisée par quatre principales composantes : Fiabilité (Reliability), Maintenabilité (Maintainability), Disponibilité (Availability) et la Sécurité (Safety) et se nomme alors FMDS (RAMS).

En plus, l'évolution technologique a contribué à l'apparition d'autres attributs à savoir : La qualité, le facteur humain et l'ergonomie. Cette discipline intervient non seulement au niveau de systèmes déjà construits mais aussi au niveau conceptuel pour la réalisation des systèmes. [13]

4. Concept FMDS

La sûreté de fonctionnement (SDF) regroupe les activités d'évaluation de la fiabilité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la sécurité (FDMS) d'une organisation, d'un système, d'un produit ou d'un moyen. Ces propriétés sont différentes mais complémentaires. [14]

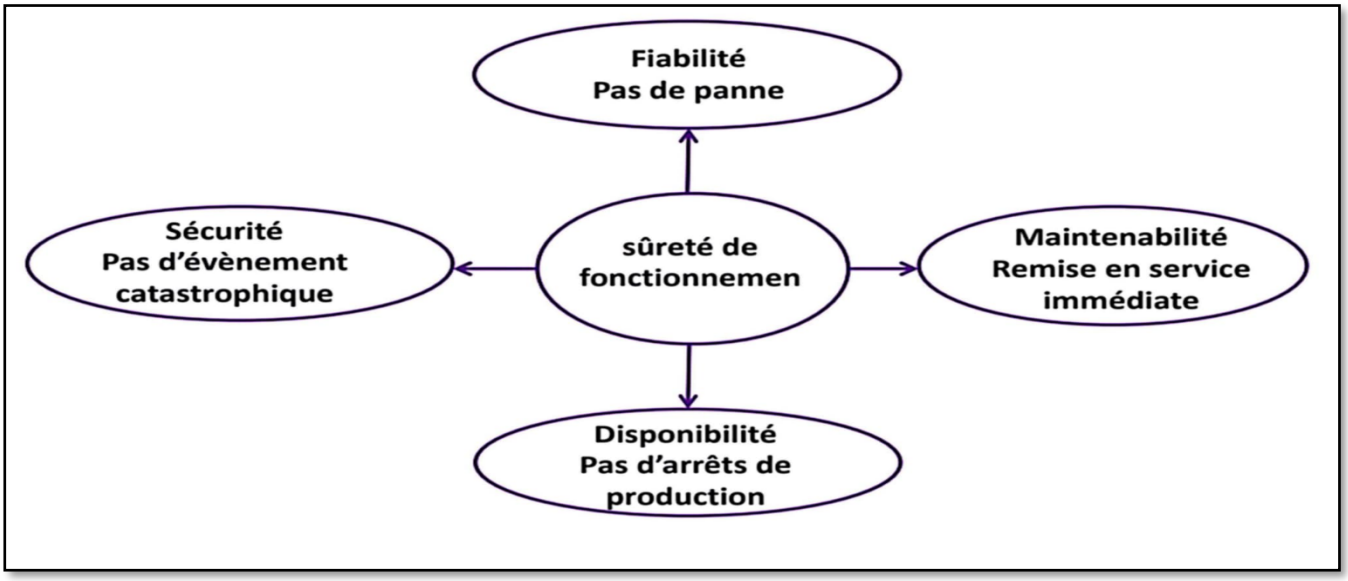


Figure II.02 : Composantes de Sûreté de Fonctionnement. [24]

4.1. Fiabilité

C'est l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un temps donné (NF EN 13306) ou une caractéristique d'un bien, exprimée par la

probabilité qu'il accomplisse une fonction requise dans des conditions données, pendant un temps donné (NF X 60-500) ; La notion de temps peut prendre la forme de nombre de cycles effectués (machine automatique), de distance parcourue (matériel roulant) et de tonnage produit (équipement de production) [15].

Un équipement n'est fiable que s'il subit peu d'arrêts pour cause de panne. La notion de fiabilité s'applique pour les systèmes réparables (équipements industriel ou domestique) ou pour les systèmes non réparables (lampes, composants électroniques, autres composants Jetables). La fonction fiabilité, notée R(t), représente la probabilité qu'un élément fonctionne sans défaillance pendant l'intervalle [0, t].

$$R(t) = 1 - F(t) = P(X > t) \quad \text{(II.1)}$$

Avec : **F(t)** : Fonction de répartition qui est la probabilité que l'élément tombe en panne avant l'instant t.

X : Variable aléatoire non négative qui est assimilée à la durée de vie de cet élément. [15]

4.2. Maintenabilité

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.

C'est aussi la probabilité de rétablir un système dans des conditions de fonctionnement spécifiées, en des limites de temps désirées, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits. [16]

La maintenabilité peut être calculée à partir du MTTR (moyenne des temps de réparation). Selon l'expression suivante : [30]

$$\text{MTTR} = \frac{\sum \text{Temps d'intervention pannes}}{\text{Nomber de pannes}} \quad \text{(II.2)}$$

μ Est le taux de réparation exprimé par :

$$\mu = \frac{1}{\text{MTTR}} \quad \text{(II.3)}$$

Mathématiquement la maintenabilité est exprimée par la formule suivante :

$$M(t) = 1 - e^{-\int_0^T U(x)dx}$$

Si u constant cela implique que :

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad \text{(II.4)}$$

4.2.1. Amélioration de la maintenabilité

La maintenabilité d'un équipement est une qualité fondamentale, qui n'est malheureusement pas toujours prise en compte par les constructeurs et à laquelle les clients (souvent des services différents de la maintenance) n'attachent pas l'attention désirable. L'amélioration de la maintenabilité passe par la diminution des temps explicités au début de ce paragraphe, à savoir : le temps de vérification de la réalité de la défaillance et de localisation, le temps de diagnostic, le temps de réparation puis le temps de contrôle et d'essais. Les propositions fournies dans le tableau **II.01** permettent de diminuer notablement ces pannes." [43]

Le Tableau II.01 : Les Proposition permettant de diminuer les pannes. [43]

Temps	Améliorations possibles
Vérification, localisation	• Voyants, capteurs. • Appareils de mesure. • Supervision.
Diagnostic	• Repérage et accessibilité des points des mesure. • Documentation opérationnelle complète (plans mis à jour, notice d'entretien).

4.3. La disponibilité

C'est l'aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des Conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné. En supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires est assurée.[17]

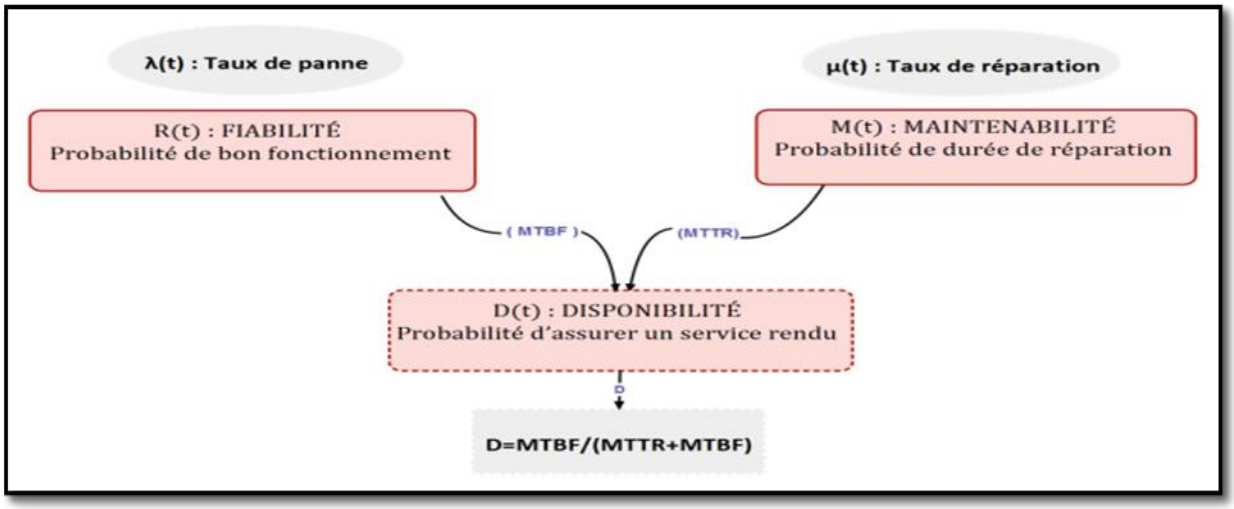


Figure II.03: Relation entre la disponibilité, la fiabilité et la maintenabilité.[21]

4.3.1. Types et Quantification de disponibilité

Il existe deux types :

➢ **Disponibilité intrinsèque :**

Elle exprime le point de vue du concepteur. Ce dernier a conçu et fabriqué le produit en lui donnant un certain nombre de caractéristiques intrinsèques, c'est à dire des caractéristiques qui prennent en compte les conditions d'installation, d'utilisation, de maintenance et d'environnement, supposées idéales. Elle est exprimée par :

$$\mathrm{Di} = \frac{\mathrm{MUT}}{\mathrm{MUT+MTTR}} \qquad \text{(II.5)}$$

➢ **Disponibilité opérationnelle :**

Il s'agit de prendre en compte les conditions réelles d'exploitation et de maintenance.

C'est la disponibilité du point de vue de l'utilisateur. Le calcul de Do fait appel aux paramètres MUT, MTTR et MTL sauf que ces 3 paramètres ne sont plus basés sur les conditions idéales de fonctionnement mais sur les conditions réelles (historiques d'exploitation). [17]

$$\mathrm{Do} = \frac{\mathrm{MUT}}{\mathrm{MUT+MTTR+MTL}} = \frac{\mathrm{MUT}}{\mathrm{MUT+MDT}} \qquad \text{(II.6)}$$

4.3.2. Amélioration de la disponibilité

Il est donc possible de jouer sur :

- L'allongement de la MTBF (action sur la fiabilité).
- La réduction de la MTTR (action sur la maintenabilité).
- Fiabilité (augmenter cette fiabilité peut s'effectuer). [46]

4.4. La sécurité

C'est l'aptitude d'un système à ne pas connaître de pannes considérées comme catastrophiques pendant une durée donnée. [18]

4.4.1. Mesures de sécurité

Nous pouvons distinguer les mesures de sécurité par leur mode d'action : la sécurité passive et la sécurité active. [18]

- **Sécurité Passive**

La sécurité passive désigne tous les éléments mis en jeu afin de réduire les conséquences d'un accident lorsque celui-ci n'a pas pu être évité. Elle agit par sa seule présence, sans intervention humaine ni besoin en énergie (exemple : bâtiment de confinement, cuvette de rétention, etc.). Cependant, il ne faut pas réduire la sécurité passive à la limitation des conséquences des accidents (l'isolation électrique est une mesure passive et préventive). [18]

- **Sécurité active**

La sécurité active désigne tous les éléments mis en jeu afin d'éviter les accidents. Elle nécessite une action, une énergie et un entretien (exemple : détecteur, vannes, etc.).

La sécurité d'une installation repose sur l'utilisation de ces deux modes d'action. Une préférence est donnée au mode passif quand il est techniquement possible. Des critères de qualité sont exigés pour le mode actif, notamment la tolérance à la première défaillance :

Doublement de l'organe de sécurité (redondance). La sécurité fonctionnelle reste l'un des moyens les plus importants pour la prise en compte des risques. D'autres moyens de Réduction ou d'élimination des risques, tels que la sécurité intégrée dans la conception, sont également d'une importance essentielle. [18]

5. Temps de fiabilité, maintenabilité et disponibilité

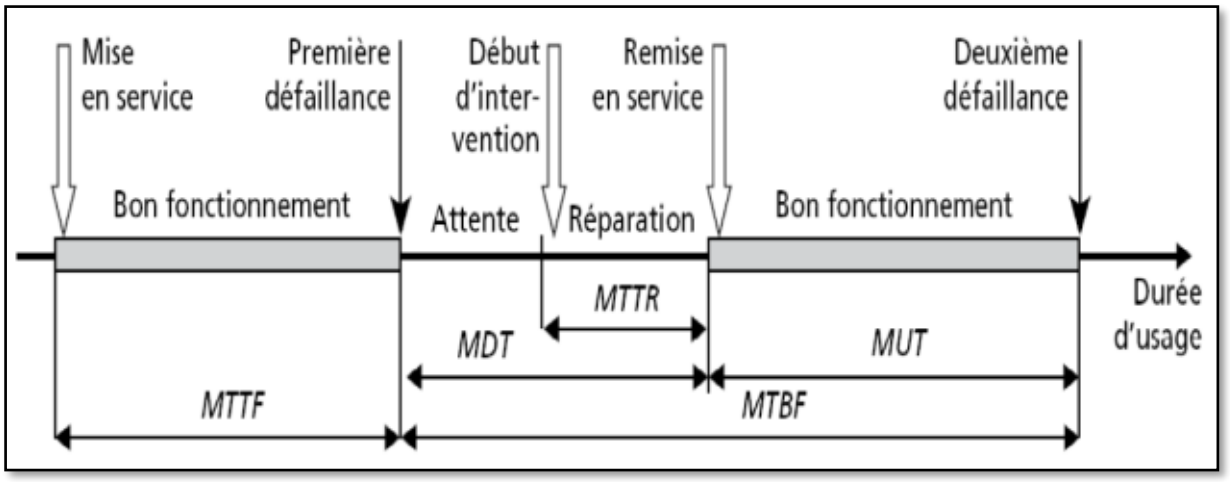


Figure II.04 : Les durées caractéristiques de FMD.[21]

En fait, les grandeurs portées par le graphe sont des durées (TBF) auxquelles on fait correspondre des moyennes (MTBF) obtenues par exploitation statistique m(t) ou probabiliste E(t) des n durées constatées et enregistrées. Les sigles utilisés sont correspondus aux notions suivantes :

- **MTTF (mean time to [first] failure)** : temps moyen avant-première défaillance.
- **MTBF (mean time between failure)** : temps moyen entre deux défaillances Successives.
- **MDT ou MTI (mean down time)** : temps moyen d'indisponibilité ou temps moyen d'arrêt propre.
- **MTL :** moyenne des temps logistiques.
- **MUT (mean up time) :** temps moyen de disponibilité.
- **MTTR (mean time to repair) :** temps moyen de réparation.[18]

6. Objectif de la sûreté de fonctionnement

L'objectif de la SDF est d'atteindre la conception des différents systèmes avec : zéro accident, zéro arrêt, zéro défaut. Pour pouvoir y arriver, il faudrait tester toutes les utilisations d'un produit pendant une grande période. La Sdf est un domaine d'activité qui propose des moyens pour augmenter la fiabilité et la sureté des systèmes dans les délais et avec des couts raisonnables. [19]

7. Cout de la sureté de fonctionnement

Le cout d'un haut niveau de sureté de fonctionnement est très onéreux. Le concepteur doit faire des compromis entre les mécanismes de sureté de fonctionnement nécessaires et les couts

économiques. Les systèmes qui ne sont pas surs, pas fiables ou pas sécurisés peuvent être rejetés par les utilisateurs. Le cout d'une défaillance peut être extrêmement élevé. [20]

8. Méthodes d'analyse de sûreté de fonctionnement

Une analyse prévisionnelle de sûreté de fonctionnement est un processus d'étude d'un système réel de façon à produire un modèle abstrait du système relatif à une caractéristique de sûreté de fonctionnement (fiabilité, disponibilité, maintenabilité, sécurité). Les éléments de ce modèle seront des événements susceptibles de se produire dans le système et son environnement, tels que par exemple :

- Des défaillances et des pannes des composants du système.
- Des événements liés à l'environnement.
- Des erreurs humaines en phase d'exploitation.

Afin d'aider l'analyste, plusieurs méthodes d'analyse ont été mises au point. Les principales sont

- **APD :** Analyse Préliminaire des Dangers.
- **AMDE :** Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets.
- **MAC :** Méthode de l'Arbre des Causes.
- **MDCC :** Méthode du Diagramme Causes-Conséquences. [22]

9. Conclusion

À la conclusion de ce chapitre, nous constatons que la sûreté de fonctionnement est un terme globalement centré sur la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité des systèmes. Elle représente un critère essentiel dans les décisions stratégiques technologiques et socio-économique d'un projet.

CHAPITRE III

LES LOIS DE PROBABILITE UTILISEES EN FIABILITE

1. Introduction

L'intérêt pour la fiabilité a augmenté ces dernières années, principalement en raison de ses applications significatives dans les domaines des technologies industrielles, de l'analyse de survie, entre autres. Par ailleurs, elle connaît un développement théorique important, en raison de son attrait pour les problèmes de modélisation stochastique.

Ce chapitre traite de la théorie de la fiabilité, débutant par les concepts de défaillance, l'explication de la fiabilité et les paramètres qui la définissent. Nous constaterons que ces paramètres pourront être évalués.

2. Concepts de défaillance

2.1. Définition de la défaillance

Selon la norme NE- 13306. Une défaillance est la cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise. Après une défaillance, le bien est en panne, totale ou partielle.[23]

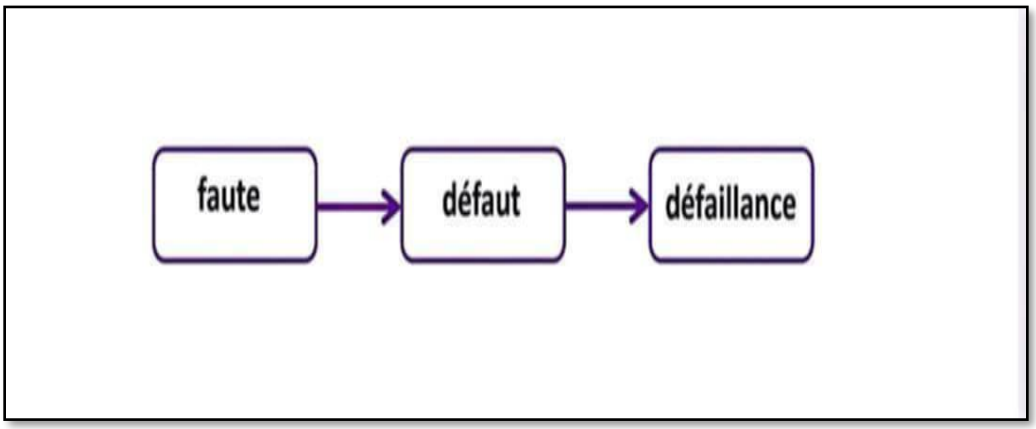


Figure III.01 : Triptyque « faute - défaut – défaillance » [24]

- **Faute :** elle peut être physique (interne ou externe) ou due à l'utilisateur.
- **Défaut :** au départ, il est latent, car on ne s'en aperçoit pas tout de suite. Il devient ensuite effectif La défaillance est la conséquence d'un défaut, dont la cause est une faute.[24]

Remarque : Après une défaillance, le bien est en panne, totale ou partielle. Une défaillance est un événement à distinguer d'une panne qui est un état.

- **La panne**

État d'un bien inapte à accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources Extérieures.[24]

2.2. Cause de défaillance

Une cause de défaillance est l'événement initial pouvant conduire à la défaillance d'un dispositif par l'intermédiaire de son mode de défaillance. Il existe deux types de causes conduisant à une défaillance :

- **Défaillances de causes intrinsèques :** défaillances dues à une mauvaise conception du bien, à une fabrication non conforme du bien ou à une mauvaise installation du bien. Les défaillances par usure et par vieillissement sont des défaillances intrinsèques.
- **Défaillance de causes extrinsèques :** défaillances de mauvais emploi, par fausses manœuvres, dues à la maintenance, conséquences d'une autre défaillance. [25]

2.3. Classification des défaillances

Les caractéristiques d'une défaillance doivent être correctement identifiées afin de prévoir et d'organiser l'intervention nécessaire pour la remise en état initial de l'entité. [25]

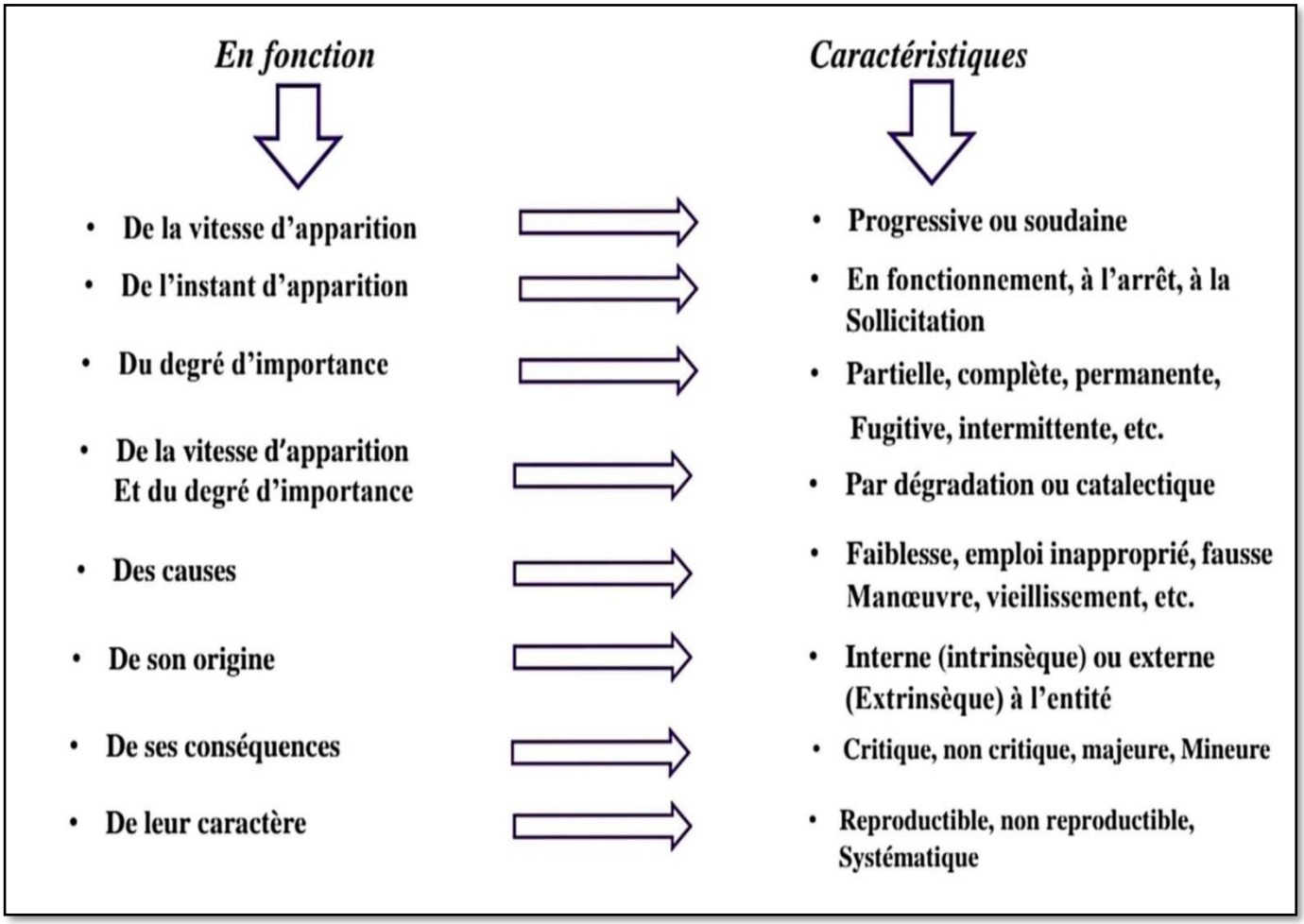


Figure III.02 : Classification des défaillances. [25]

2.4. Le mode de défaillance

Le mode de défaillance est la façon dont un produit, un composant, un ensemble, un processus ou une organisation manifeste une défaillance ou s'écarte des spécifications. Voici quelques exemples pour illustrer cette Définition :

- Déformation.
- Vibration.
- Coincement.
- Desserrage.
- Corrosion.
- Fuite.
- Perte de performance.
- Court-circuit.
- Flambage.
- Ne s'arrête pas.
- Ne démarre pas.
- Dépasse la limite supérieure tolérée, etc. [26]

2.5. Les effets d'une défaillance

Les effets d'une défaillance sont les effets locaux sur l'élément étudié du système et les effets de la défaillance sur l'utilisateur final du produit ou du service. [26]

2.6. Les déférentes Phases du Cycle de Vie d'un produit

La fiabilité des systèmes, des sous-ensembles et des composants est souvent décrite par la courbe caractéristique dite en "baignoire". Elle décrit l'évolution du taux de défaillance λ (t) en fonction du temps t Elle comprend trois phases, chacune avec un sens de variation diffèrent.

- **Phase de jeunesse :** λ(t) décroît rapidement c'est la période de mise en service et de rodage de l'installation. Les défaillances sont dues à des anomalies ou imperfections de montage.
- **Phase de maturité :** λ(t) est pratiquement constant est la période de vie utile ou la défaillance est aléatoire. Le taux de défaillance est constant ou légèrement croissant, correspondant au rendement optimale l'équipement.
- **Phase de vieillesse :** λ(t) croit rapidement. C'est la période d'obsolescence, à dégradation accélérée Souvent, on trouve une usure mécanique de la fatigue, une érosion ou une corrosion. A un certain point de λ(t), le matériel est mort. [27]

Le graphe représentant la variation du taux de défaillance, appelé « courbe en baignoire », possède trois allures différentes selon le matériel mécanique, matériel électrique ou matériel électronique.

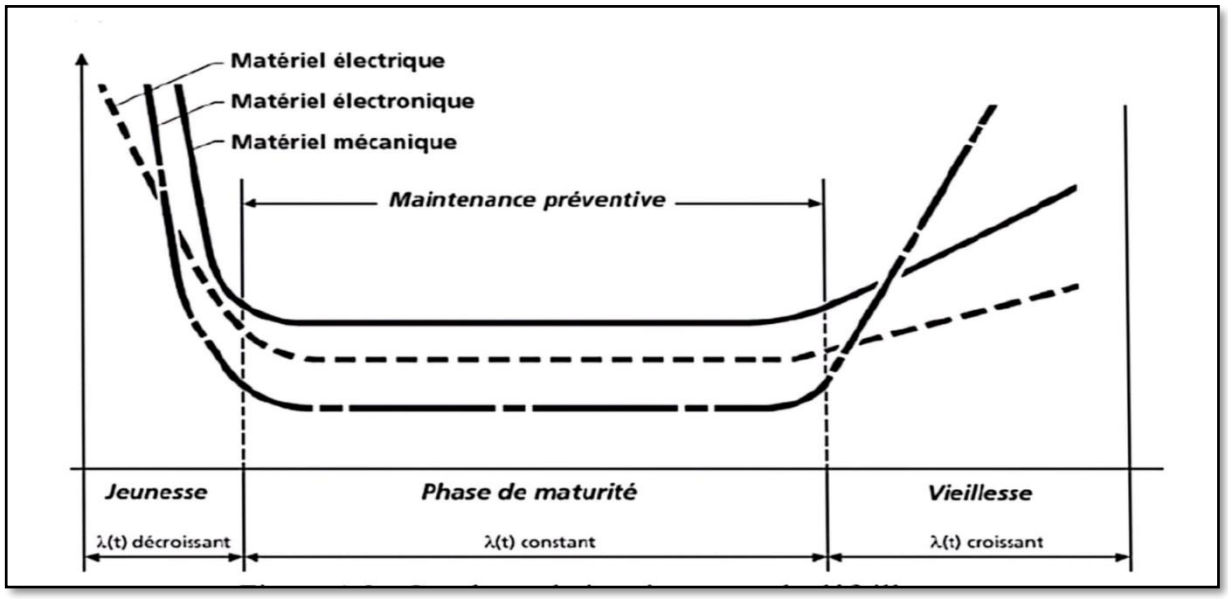


Figure III.03: Courbe en baignoire : taux de défaillance. [27]

3. Concept de fiabilité

3.1. Définition de fiabilité

La fiabilité est l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée. C'est la probabilité R(t)que l'entité E accomplisse ces fonctions, dans des conditions données pendant l'intervalle de temps [0, t], sachant que l'entité n'est pas en panne à l'instant initial. [28]

$$R(t)=P\ [E \text{ non défaillante sur } [0, t]] = P(T> t) \qquad \text{(III.1)}$$

3.2. Types de fiabilité

On distingue trois types [28] :

- **La Fiabilité prévisionnelle**

  C'est la fiabilité calculée sur la base d'un modèle mathématique défini à partir des données du projet et de la fiabilité estimée des composants.

- **La Fiabilité estimée " Intrinsèque "**

  C'est la fiabilité d'un dispositif mesurée au cours d'essais spécifiques, effectués dans le cadre d'un programme d'essais entièrement définis.

- **La Fiabilité opérationnelle**

  La fiabilité opérationnelle est la fiabilité mesurée sur un des dispositifs en exploitation normale, elle dépend des conditions réelles d'utilisation et de support logistique, notamment la maintenance.

3.3. Fiabilité des systèmes

Un système est constitué des composants élémentaires, sa fiabilité dépend à la fois de fiabilité de ces composants et de la façon dont le bon fonctionnement ou la panne de chaque composant influe sur le bon fonctionnement ou la panne du système. Donc l'objet de cette section est la détermination de la fiabilité d'un système à partir de la fiabilité de ses composants. [29]

3.4. Fiabilité de système constitué de plusieurs composants

3.4.1. Système en série

R(s) représente la fiabilité d'un ensemble de "n" composants montés en série.

La fiabilité R(s) d'un ensemble de "n" composants A, B, C, …, n montés ou connectés en Série est égale au produit des fiabilités respectives RA, RB, RC, …, Rn de chacun des composants. On dit qu'un système est en série si la défaillance d'un seul composant entraine la défaillance du système (c'est-à-dire que le système ne fonctionne que si tous ses composants fonctionnent). [30]

La fiabilité du système est donnée par La formule suivante :

$$R(s) = RA \times RB \times RC \times \dots Rn \qquad \text{(III.2)}$$

Si les taux de défaillances sont constants au cours du temps la fiabilité sera calculée.

Suivant la formule :

$$Rs = e^{-\lambda At} \times e^{-\lambda Bt} \times e^{-\lambda Ct} \times \dots\dots \times \quad e^{-\lambda nt} \qquad \text{(III.3)}$$

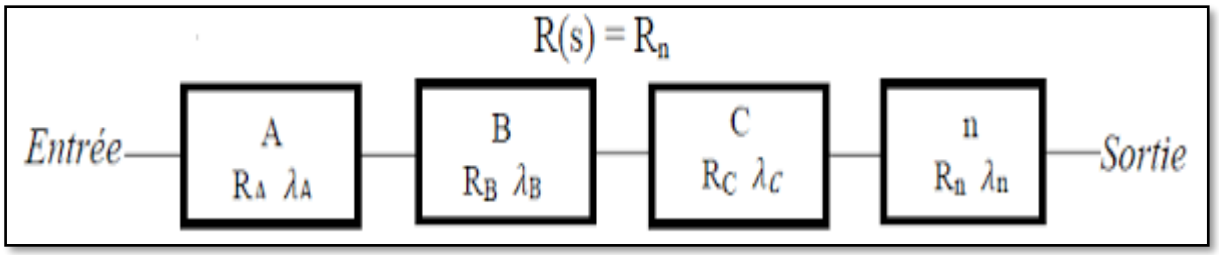


Figure III.04 : Système en série.[31]

3.4.2. Système en parallèle

Un dispositif, constitué de "n" composants en parallèle, ne tombe en panne que si les "n" Composants tombent en panne au même moment.

Soit les "n" composants de la figure ci-dessous montés en parallèle. Si la probabilité De panne pour chaque composant repéré (i) est notée Fi, alors :

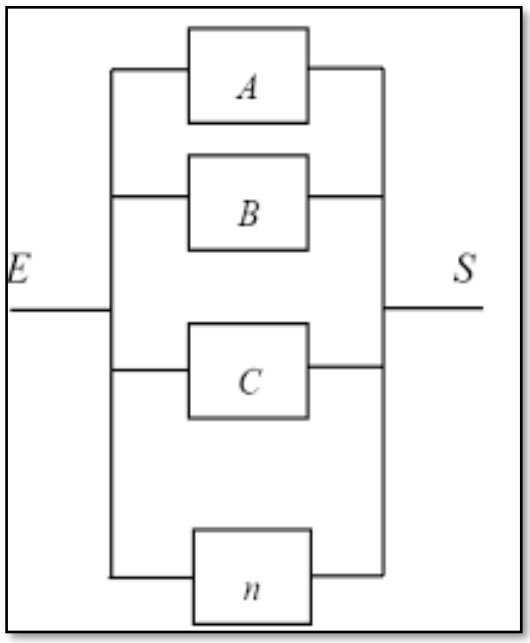


Figure III.05: Système en parallèle. [32]

La fiabilité du système est donnée par l'équation suivante :

$$Rp = 1 - (1 - RA) \times (1 - RB) \times (1 -) \times \ldots\ldots\ldots \times (1 - Rn) \qquad \text{(III.4)}$$

La composition en parallèle est meilleure par rapport à celle en série, ceci s'explique par L'augmentation de la fiabilité pour ce type de composition D'ailleurs on utilise cette propriété pour accroitre la sécurité de fonctionnement d'un système. Prenons l'exemple du système de freins d'urgence sur une automobile ou celui de deux pompes en parallèle. [30]

3.4.3. Système combiné

C'est la combinaison des deux compositions précédentes. [30]

3.5. Les indicateurs de fiabilité

3.5.1. Le taux de défaillance λ

C'est la probabilité ($0 \leq R \leq 1$) ; un produit doit accomplir de manière satisfaisante une

Fonction requise, sous des conditions données et pendant une période de temps donné.
L'écriture mathématique du taux de défaillance à l'instant t, noté λ(t), défini sur est la suivante :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \left(\frac{1}{\Delta t} + \frac{R(t) - R(t+\Delta t)}{R(t)} \right) \quad ; \text{(N défaillances / Heure)} \qquad \text{(III.5)}$$

Précédemment le taux de défaillance λ a été défini par des expressions mathématiques à travers un calcul de probabilité. On peut également l'exprimé par une expression physique. Il caractérise la vitesse de variation de la fiabilité au cours du temps. La durée de bon fonctionnement est égale à la durée totale en service moins la durée des défaillances. [33]

$$\lambda = \frac{\text{NOMBRE TOTAL DE LA DEFAILLANCES PANDANT LE SERVIS}}{\text{DUREE TOTAL DE BON FONCTIONNEMENT}} \qquad \text{(III.6)}$$

Le taux défaillance λ est définit comme étant l'inverse de temps moyen de bon fonctionnement (MTBF) [34] :

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}} \qquad \text{(III.7)}$$

3.5.2. Temps moyen de bon fonctionnement

Le MTBF (Meam Time Between Failure) est souvent traduit comme étant la moyenne des temps de bon fonctionnement mais représente la moyenne des temps entre deux défaillances. En d'autres termes, il correspond à l'Esperance de la durée de vie t. [30]

$$\text{MTBF} = \int_0^{\infty} R(t) \qquad \text{(III.8)}$$

Physiquement le MTBF peut être exprimé par le rapport des temps.

$$\text{MTBF} = \frac{\text{Somme des temps de bon fonctionnement entre les n defaillances}}{\text{Nombre d'intervention de maintenance avec immobilisation}} \qquad \text{(III.9)}$$

Si λ est constant : $$\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda} \qquad \text{(III.10)}$$

❖ Par définition le MTBF est la durée de vie moyenne du système. [34]

3.5.3. MTTF (Mean Time to Failure)

C'est le temps moyen de fonctionnement jusqu'à l'occurrence de la première défaillance [34] :

$$MTTF=\int_0^{\infty} R(t)\, dt \qquad \text{(III.11)}$$

3.6. Les Lois usuelles en fiabilité

On identifie deux sortes :

- Lois discrètes
- Lois continues

3.6.1. Lois discrètes

Une loi est dite discrète si elle prend ses valeurs dans N c'est à dire des valeurs entières comme par exemple celle qui compte le nombre de pannes.

Parmi les lois discrètes on peut citer :

- Loi Uniforme.
- Loi de Bernoulli Loi Binomiale.
- Loi Binomiale négative.
- Loi Géométrique.
- Loi Hypergéométrique.
- Loi de Poisson. [33]

❖ La loi la plus fréquente :

3.6.1.1. Loi de Bernoulli

Soit un univers constitué de deux éventualités, S pour succès et E pour échec = {E, S} sur lequel on construit une variable aléatoire discrète, « nombre de succès » telle qu'au cours d'une épreuve : [33]

Si (S) est réalisé, X = 1

Si (E) est réalisé, X = 0

L'expression de la fonction de fiabilité s'écrit :

$$P(X = 0) = q \qquad \text{(III.12)}$$

$$P(X = 1) = p \qquad \text{(III.13)}$$

$$(p + q = 1) \qquad \text{(III.14)}$$

3.6.2. Les lois continues

- La loi du Khi deux.
- La loi de Birnbaum-Saunders.
- La loi Gamma.
- Loi Inverse Gamma.
- La loi logistique.
- La loi log-logistique.
- La Loi de Cauchy.
- La loi de Student.
- La loi Bêta.
- La loi exponentielle.
- La loi de Fisher.
- La Loi normal.
- La loi Log normale.
- La loi de Wei bull. [33]

➢ Lois plus usuelles **:**

3.6.2.1. Loi exponentielle expo(λ) [30]

La loi exponentielle n'est qu'un cas particulier de la loi de Weibull, on l'applique généralement pour un taux de défaillance constant, ce qui correspond à la phase sans usure ni vieillissement. C'est à dire à la phase de maturité ou de bon fonctionnement. C'est l'une des lois les plus appliquées pour différentes disciplines.

Une variable aléatoire T suit une loi exponentielle de paramètre t si sa densité de probabilité f(t) est donnée par :

$$F(t) = \lambda e^{-t} \qquad \text{(III.15)}$$

La distribution exponentielle s'exprime ainsi :

$$\text{Fiabilité : } (t) = e^{-\lambda t} \qquad \text{(III.16)}$$

Avec les paramètres de significations :

- e : est la base de l'exponentielle (2,718...)

- λ : c'est l'intensité.

La fonction de répartition : $(t) = 1 - e^{-t} = \int t\ \lambda e^{-t}\ dt$ (III.17)

3.6.2.2 Loi de Wei bull W (β ; η)

La loi de Wei bull est définie par un paramètre de forme β > 0 et un paramètre d'échelle η > 0. Elle est souvent utilisée en mécanique pour caractériser le comportement d'un élément dans les trois phases de vie selon la valeur du paramètre de forme β :

- Période de jeunesse (β < 1).
- Période de vie utile (β = 1).
- Période d'usure ou vieillissement (β > 1).

- Fonction de répartition : F(T) =$1 - e^{-\left(\frac{T}{\eta}\right)^{\beta}}, x \geq 0$ (III.18)
- Fonction de densité :$F(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{T}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{T}{\eta}\right)^{\beta}}$, x ≥ 0 (III.19)
- Fiabilité : R(T) =$e^{-\left(\frac{T}{\eta}\right)^{\beta}}$, x ≥ 0 (III.20)
- Taux de défaillance : λ(T) =$\frac{\beta}{\eta}\left(\frac{T}{\eta}\right)^{\beta-1}, x \geq 0.$ [35] (III. 21)

3.6.2.3. La Loi Normale

Une variable aléatoire réelle X suit une loi normale (ou loi gaussienne, loi de La place-Gauss) d'espérance μ et d'écart type δ (nombre strictement positif, car il s'agit de la racine carrée de la variance δ^2) si cette variable aléatoire réelle X admet pour densité de probabilité la fonction p(x) définie, pour tout nombre réel x par : [36]

$$p(x) = \frac{1}{(\sigma.\sqrt{2\pi})} e^{-\frac{1}{2}\ \left(\frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^2} \quad \text{(III.22)}$$

La loi normale est la loi statistique la plus répandue et la plus utile. Elle représente beaucoup de phénomènes aléatoires. De plus, de nombreuses autres lois statistiques peuvent être approchées par la loi normale [37]

Tout spécialement dans le cas des grands échantillons. Son expression mathématique est
La suivante :

$$n(x) = \frac{n}{\sqrt{2}\pi\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)2}{2\sigma^2}} \quad \text{(III.23)}$$

- μ : est la moyenne.
- σ : l'écart type.
- n : le nombre total d'individus dans l'échantillon.
- n(x) : le nombre d'individus pour lesquels la grandeur analysée a la valeur x.

7. Approche de la fiabilité par les probabilités

Définition selon la NF X 06–501 : la fiabilité est la caractéristique d'un dispositif exprimée par la probabilité que ce dispositif accomplisse une fonction requise dans des conditions d'utilisation données et pour une période de temps déterminée.

- **Probabilité** : c'est le rapport entre le nombre des cas favorables divisé par le nombre des Cas possibles.
- **Fonction requise :** ou accomplir une mission ou rendre le service attendu. La définition De la fonction requise implique un seuil d'admissibilité en dessus du quel la fonction n'est Plus remplie.
- **Conditions d'utilisation :** définition des conditions d'usage, c'est à dire l'environnement Et ses variations, les contraintes mécaniques, chimiques, physiques, etc. Il est évident que Le même matériel placé dans deux contextes de fonctionnement différents n'aura pas la Même fiabilité.
- **Période de temps :** définition de la durée de mission.[24]

8. La relation entre la fiabilité et la maintenance

Tous les équipements d'une installation industrielle sont soumis à des mécanismes de dégradation dus aux conditions de fonctionnement et/ou d'environnement : usure, fatigue, vieillissement. Face aux défaillances qui en résultent, on peut se contenter de pratiquer une maintenance corrective, mais on n'évite pas ainsi les conséquences des pannes que l'on subit. Une attitude plus défensive consiste à mettre en œuvre une maintenance préventive destinée à limiter, voire à empêcher, ces défaillances, mais on court alors le risque de dépenses excessives et d'indisponibilités inutiles. Devant cette situation, le responsable de maintenance ne doit plus se contenter de surveiller et de réparer, il doit envisager des stratégies. Une part de son travail consiste à Prévoir les événements et à évaluer les différentes alternatives qui s'offrent à lui pour trouver la solution optimale, ou tout au moins pour s'en rapprocher. Les forces dont il dispose, limitées par ses moyens techniques et financiers, doivent être placées aux bons endroits.

C’est dans ce contexte que la maintenance s’est dotée de méthodes qui considèrent à la fois, et plus ou moins, la technique et l’organisation. Les industries de processus ont générale appliquée des démarches alliant une évaluation des risques, une analyse du retour d’expérience, et une logique de sélection de tâches de maintenance. [30]

9. Objectifs et intérêts de la fiabilité

L’analyse de la fiabilité constitue une phase indispensable dans toute étude de sûreté de fonctionnement d’un système. A l’origine, la fiabilité concernait les systèmes à haute technologie (centrales nucléaires, aérospatial). Aujourd’hui, la fiabilité est devenue un paramètre clé de la qualité et d’aide à la décision, dans l’étude de la plupart des composants, produits et processus "grand public" : transport, énergie, bâtiments, composants électroniques, composants informatiques, etc. [28]

10. Conclusion

Il a été observé que la fiabilité est un attribut crucial des systèmes techniques, quantifié en fonction du risque d'échec ou de la durée moyenne entre les pannes.

On a constaté aussi que divers éléments peuvent influencer la fiabilité, comme la conception, la production, l'exploitation, l'entretien, le milieu ambiant et les conditions d'opération.

CHAPITRE IV

ETUDE DE CAS

(Liebherr R 9100, Caterpillar 349D2L)

1. Introduction

Ce chapitre présente un aperçu complet des différents aspects de l'entreprise, en abordant ses activités, sa structure organisationnelle et son environnement opérationnel. Il met également en lumière l'histoire de l'entreprise, sa mission et ses valeurs, ainsi que ses produits et services, dans le but de fournir une compréhension approfondie de son organisation et de son mode de fonctionnement. Cela contribue à l'élaboration d'un cadre théorique permettant d'analyser et d'étudier la réalité de l'entreprise avec plus de précision.

2. Historique

Bien que le gisement de l`Ouenza fût depuis l'époque romaine comme le témoigne les vestiges existants (les galeries) au niveau des Cartier (Douamis), cette exploitation concerner le cuivre, mais ce n'est que vers 1875 que le gisement de fer de l'Ouenza entre dans l'histoire, et depuis, l'intérêt pour ces gisements de fer s'est accru. En, effet en 1875 l'ingénieur des mines TISSOT signala l'importance des effleurements de minerai de fer de l'Ouenza. Le premier permis de recherche de fer au minerai de l'Ouenza a été accordé en 1878.

- 1901 prospecteurs PASCAL obtiennent la concession des (DJEBEL L'OUENZA)
- En 1913 constitutions de la société de l'Ouenza française.
- En mai 1966 la nationalisation des mines.
- En 1967 début d'aménagement des installations de (SKIP) pour le déblocage des minerais en provenance de la partie amont gisement.
- En 1970 achèvement de (SKIP) et création de la SONAREM (société nationale de la recherche te de l'exploitation minière) qui fait les recherches, la gestion et l'exploitation de toutes les mines en Algérie.
- La fin de la seconde guerre mondiale, l'exploitation s'est intensifiée considérablement avec l'introduction de la grosse mécanisation et surtout en raison de la forte demande des sidérurgistes européens en vertu de ses qualités exceptionnelles.
- La nationalisation des mines en 1966 avec le départ massif des cadres européens n'avait en aucun cas ravis la place traditionnelle du minerai de l'Ouenza sur le marché international de même qu'elle n'a pas empêché la mine de Constantine sa mission de production grâce à la volonté de ses travailleurs qui ont su relever le défi. [38]

3. La Mine de l'Ouenza

3.1. Situation Géographique

La Daïra de l'Ouenza se trouve à 90km au nord du chef LIEU de la Wilaya de Tébessa. Elle est située à 120 kilomètres au Sud-sud-est d'Annaba. Elle est aussi limitée à l'est par la frontière Algéro-tunisienne et au nord par la wilaya de Souk-Ahras, et est limitée par deux oueds appelés respectivement « Oued Mellegue » et « Oued Kseub ». Elle est reliée à Annaba par la route nationale N°82B et une voie ferroviaire par laquelle est acheminée toute la production de l'unité de l'Ouenza vers l'installation portière ou elle serait expédiée vers le complexe sidérurgique d'El-Hadjar. [38]



Figure IV.01 : Situation géographique de la ville de l'Ouenza.[38]

3.2. Procédure de travail

D'après les tournées et visites effectuées au niveau de la mine de l'Ouenza, la procédure D'exploitation appliquée dans cette mine comprend plusieurs étapes à savoir :

- Extraction de niveau de fer à ciel ouvert par la foration et l'abattage à l'explosif.
- Chargement par pelles et chargeuses sur camions.
- Alimentation des stations de concassage par camions.
- Criblage et concassage.
- Reprise sous concasseurs et acheminés vers le dépôt de stockage par convoyeur à Bande.

- Expédition du niveau de fer par voies ferrées (train) vers le complexe d'El-Hadjar**.**[39]

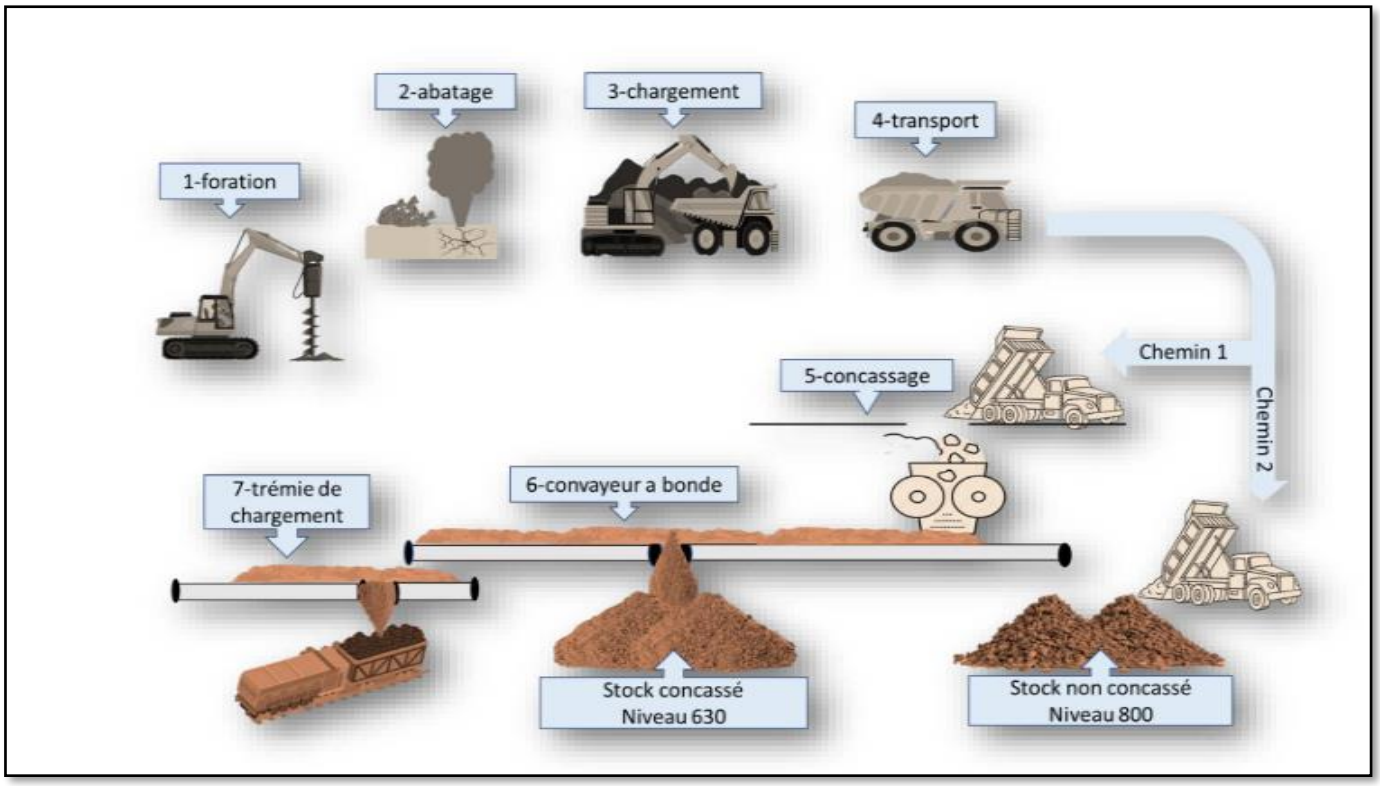


Figure IV.02 : Process d'exploitation.[24]

4. Structure de maintenance au sein de la mine de l'Ouenza

La division maintenance est organisée de la manière suivante :

A sa tête hiérarchique un chef de division maintenance qui est sous l'autorité directe du directeur de la mine, qui dirige et coordonne avec les chefs des départements et services que sont :

- Département MRO/C.
- Département chantiers extérieurs.
- Service électrique.
- Service ATC.[39]

4.1. Département MRO/C

Est organisé de la manière suivante :

- Service intervention.
- Service réparation.
- Service entretien. [39]

4.2. Département chantiers extérieurs

Est organisé de la manière suivante :

- Service Pelles & Bulls.
- Service Foreuses.
- Service Entretien. [39]

4.3. Service Électrique

Est organisé de la manière suivante :

- Section Intervention Trémie & Bobinage.
- Section Intervention Engins.
- Section Intervention Ligne et Poste. [39]

4.4. Service ATC

Est organisé de la manière suivante :

- Section Chaudronnerie & Usinage.
- Section Révision Moteur.
- Section Rénovation et Réparation. [39]

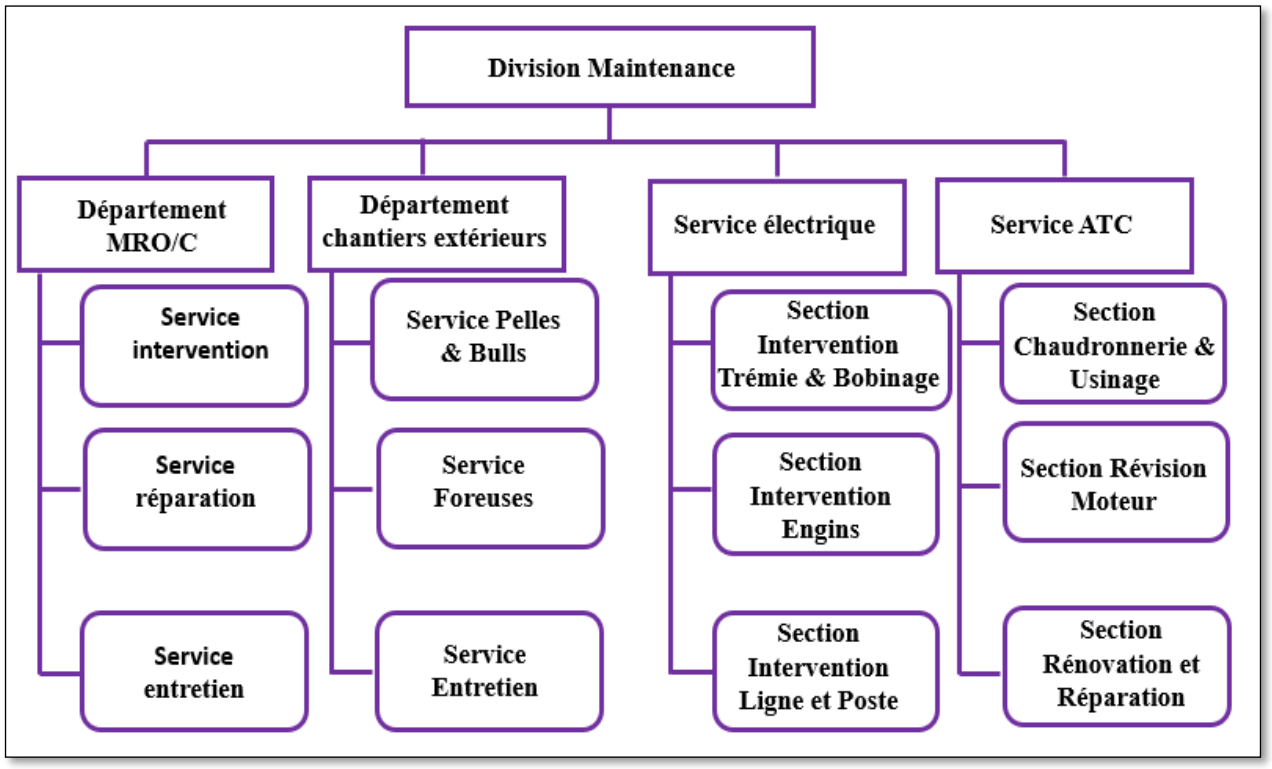


Figure IV.03 : Organisation de la division maintenance. [39]

Dans le cadre de notre étude on focalise notre recherche sur le Service entretien.

- ❖ Service entretien
- **Mission :** C'est le Service entretien responsable de toutes les opérations de maintenance et de réparation au sein de l'entreprise, garantissant ainsi le bon fonctionnement des équipements.

5. Parc /Carrière

Tableau IV.01 : Les engins disponibles au niveau la mine d'Ouenza [39]

Engin	Nombre
Camions de carrière	16
Chargeuse	4
Bull	5
Niveleuse	1
Plles de rechargement	5
Sondeuses d'abattage	4

6. Etude théorique et statistique

6.1. La pelle hydraulique (Liebherr R 9100)

Productive et efficace par sa conception allemande, la R 9100 établit une nouvelle norme de performance ce qui en fait l'outil idéal pour le chargement des camions de 45 à 100 t. Offrant un niveau élevé de polyvalence, la R 9100 ouvre de nouvelles possibilités pour une large gamme d'applications. [44]



Figure IV.04: Liebherr R 9100. [44]

Dans notre étude nous avons choisi deux engins (Liebherr R 9100 numéro L03 et le Caterpillar 349D2L) parmi les Trois pelles hydraulique existantes au niveau de la mine de l'Ouenza.

L'historique des pannes du 1er engin est représenté dans le tableau N°02.

Tableau IV.02 : Historique des pannes Liebherr R 9100

Historique des Pannes								
Engin	Années	Heure de Marche	Heure D'arrêt	Nombre Panne	Nature de panne			
					ELC	MEC	HYD	Autres
Liebherr R 9100	2020	1389	856.5	6	0	300	400	156.5
	2021	5488.5	2199.5	11	500	380	1080	239.5
	2022	5010.5	3500.5	22	800	550	1600	550.5
	2023	6073	2687	17	880	427	430	950
	2024	4614	4125	30	700	1050	2015	360
Total	5 Années	22575	12960	86	2880	2563	5353	2164

NB : Nous avons constaté que dans la mine de l'Ouenza, il existe d'autres types de pannes que nous avons cités dans le tableau ci-dessus, à titre indicatif, dans la colonne (**Autres)** qui représente les pannes des chenilles, des convertisseurs, du châssis, …etc.

6.1.1. Etude d'heure d'arrêt par nature de pannes

En se basant sur les heures d'arrêt et la nature de pannes de Liebherr R 9100 durant les 05 dernières années, le présent graphe a été tracé :

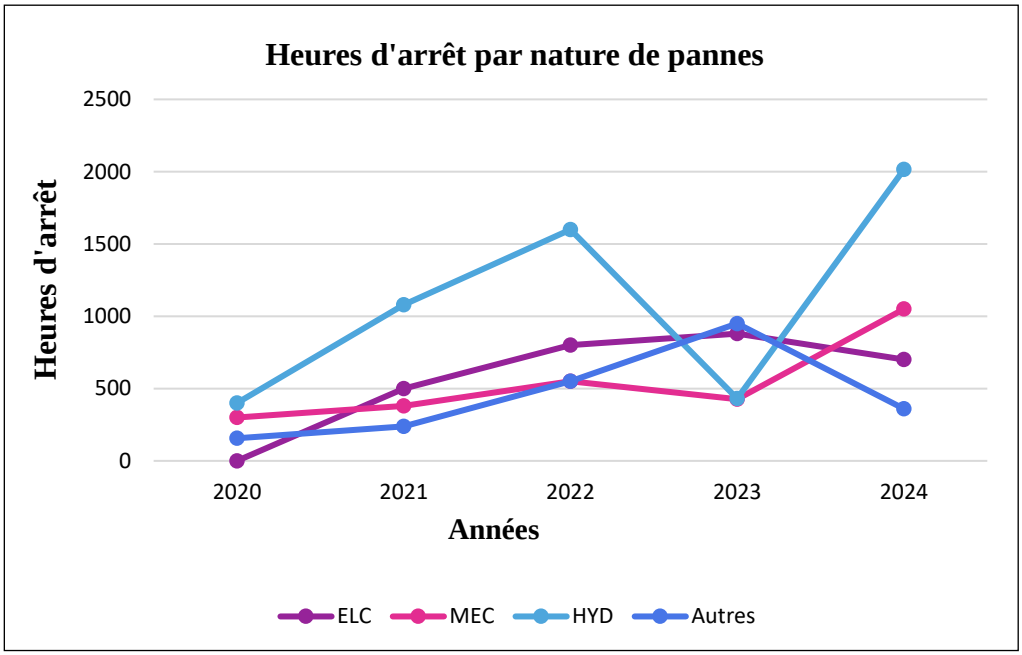


Figure IV.05: Evolution du temps d'arrêt de Liebherr R 9100.

❖ **Analyse**

Le graphe (fig.05) représente les heures d'arrêts et la nature des pannes de Liebherr R 9100 Pendant 5 ans. D'apprès le Graphe, on constate que :

- En ce qui concerne les pannes électriques, aucunes heures d'arrêt n'a été enregistré en 2020, avec une augmentation à partir de 2021 (500h) jusqu'en 2023 avec (880h), suivie d'une diminution en 2024 avec(700h). Quant aux pannes mécaniques nous constatons que les heures d'arrêts ont fluctué au fil des années, passant de 300 heures en 2020 à 550 heures en 2022, puis diminuant en 2023 et augmentant à nouveau en 2024 pour atteindre 1050 heures. Pour les pannes hydrauliques, une forte augmentation, passant de 400 heures en 2020 à 1600 heures en 2022, puis a diminué en 2023 (430h) et a de nouveau augmenté pour atteindre 2015 heures en 2024, ce qui en fait que cette catégorie a le plus grand impact sur les heures d'arrêt.
- Les autres pannes : ont montré des variations irrégulières, avec un maximum en 2023 (950 h), mais une réduction importante en 2024 (360 h).

6.1.2. Etude du nombre de pannes par nature de pannes

En se basant sur le nombre et la nature de pannes de Liebherr R 9100 durant les 05 dernières années, le présent graphe a été tracé :

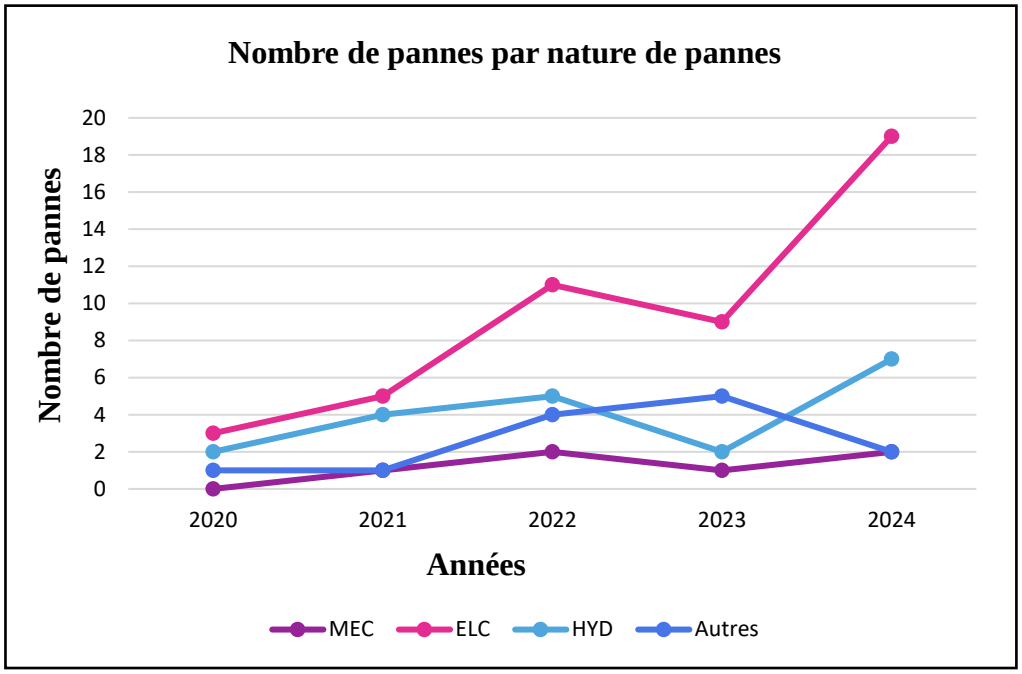


Figure IV.06: Evolution du nombre de pannes de Liebherr R 9100.

❖ **Analyse**

Le graphe (fig.06) représente le nombre de pannes par nature de Liebherr R9100 pendant 5 ans. D'apprès le Graphe, en constate que :

- Les pannes mécaniques sont relativement faibles et stables, compris entre 2 et 3 au cours des cinq années, par contre on remarque une augmentation significative des pannes électriques, qui passent de 3 en 2020 à 11 en 2022, une diminution en 2023, puis une augmentation à nouveau en 2024.Les pannes hydrauliques ont montré une certaine fluctuation, atteignant un pic de 7 pannes en 2024.
- Les autres pannes présentent un comportement stable dans l'ensemble, avec une légère hausse temporaire en 2023, puis une diminution en 2024.

6.2. Caterpillar 349D2L

Le Caterpillar 349D2L est une pelle hydraulique de moyenne taille utilisée pour les travaux de terrassement et d'excavation. Elle est robuste, puissante et adaptée aux chantiers de construction, aux mines et aux carrières. [45]



Figure IV. 07 : Caterpillar 349D2L. [45]

Tableau IV.03 : Historique des pannes Caterpillar 349D2L

Historique des pannes								
Engin	Années	Heure De Marche	Heure D'arrêt	Nombre De Pannes	Nature de panne			
					ELC	MEC	HYD	Autres
Caterpillar 349D2L	2020	5766	2409	14	180	105	1300	824
	2021	5601	1996	14	740	85	940	231
	2022	2351	5039	26	1200	500	2700	639
	2023	4767	4193	19	1000	285	2000	908
	2024	1267	3127	15	840	127	1400	760
Total	5 Années	19752	16764	88	3960	1102	8340	3362

6.2.1 Etude d'heure d'arrêt par nature de pannes

En se basant sur les heures d'arrêt et la nature de pannes de Caterpillar 349D2L durant les dernières années, nous avons élaboré le graphe suivant :

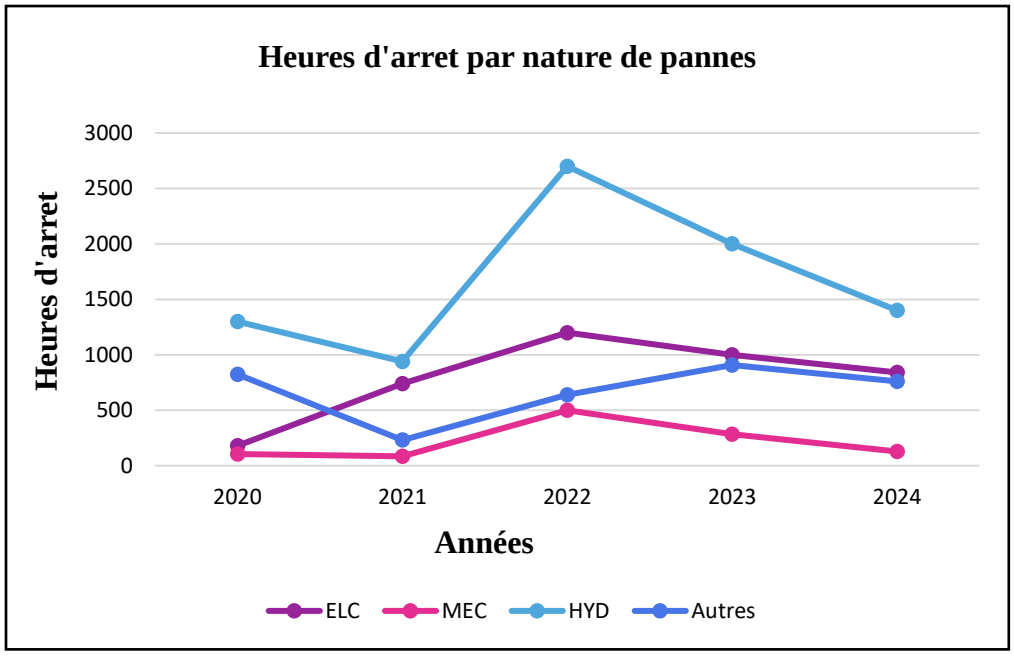


Figure IV.08 : Evolution du temps d'arrêt de Caterpillar 349D2L.

❖ **Analyse**

Selon ce graphe (fig.08) on constate :

- Les heures d'arrêt dues aux pannes électriques ont connu une augmentation significative Entre 2020 (180 heures) et 2022 (1200) heures. Une légère baisse est observée en 2023(1000 heures) et 2024 (840) heures. Les heures d'arrêt pour les pannes mécaniques sont les plus faible, Après une baisse importante entre 2020 (105) heures et 2021 (85) heures, elles augmentent en 2022 (500) heures, mais diminuent en 2023 (285) heures et 2024 (127) heures. Quant aux pannes hydrauliques elles ont connu une augmentation de 1300 heures en 2020 jusqu'à atteindre un pic en 2022 (2700) heures, puis une diminution progressive pour les années 2023 et 2024.Mais ces heures d'arrêt pour les autres pannes elles ont montré une forte diminution passant de 824 heures en 2020 à 231 heures en 2021. Cependant, une augmentation est notée en 2022 (639) heures et en 2023 (908) heures, suivie d'une légère baisse en 2024 (760) heures.

6.2.2. Etude nombre de pannes par nature de pannes

En se basant sur le nombre et la nature de pannes de Caterpillar 349D2L pendant les 05 dernières années, le présent graphe a été tracer :

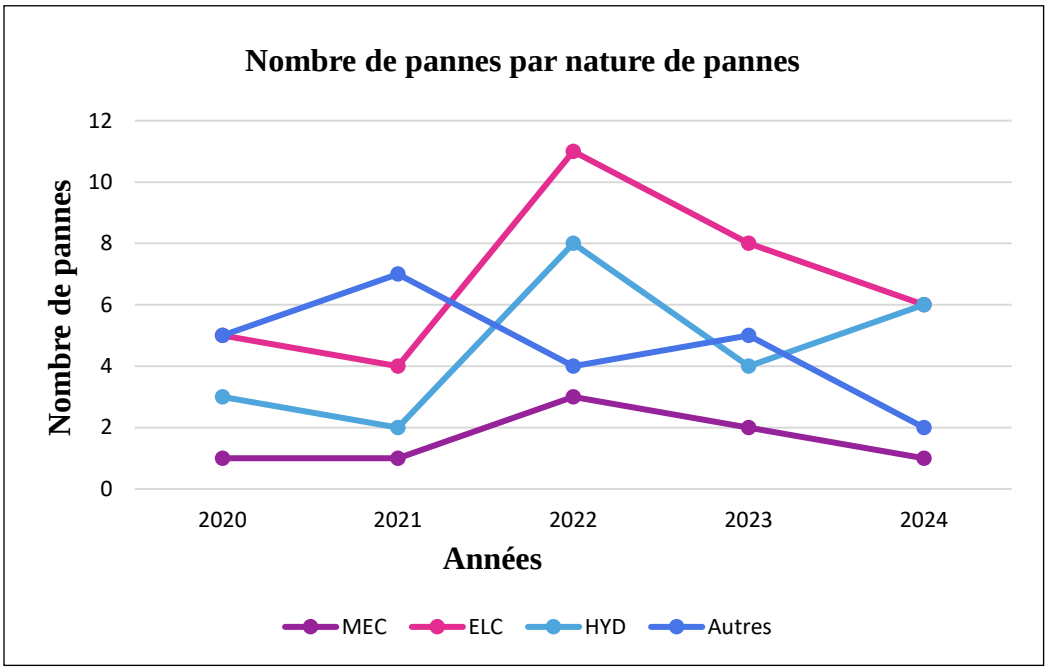


Figure IV.09 : Evolution du nombre de pannes de Caterpillar 349D2L.

❖ **Analyse**

Le graphe (fig.09) représente le nombre des pannes par nature de la pelle Caterpillar 349D2L pendant 5 ans. D'apprès ce graphe, en constate que :

- Les pannes mécaniques montrent une stabilité relative au fil des années, le nombre de pannes variait entre 1 et 2, il s'est cumulé en 2022 avec 3 pannes, mais a connu une diminution progressive jusqu'à 2 en 2023 puis une seule panne en 2024.Les pannes électriques connaissent une augmentation significative entre 2020 (5 pannes) et 2022 (11pannes). Après 2022, on note une diminution progressive en 2023 (8 pannes) et 2024 (6 pannes). Les pannes hydrauliques ont également été caractérisées par de nettes fluctuations, commençant par 3 pannes en 2020, puis diminuant jusqu'à 2 en 2021 avant de remonter significativement jusqu'à 8 pannes en 2022. Après cette augmentation, les pannes ont diminué jusqu'à 4 en 2023 et 6 en 2024.
- Les autres pannes ont montré une certaine variabilité, passant de 5 pannes en 2020 à un pic de 7 pannes en 2021. Une diminution progressive jusqu'en 2024 (2 pannes).

7. Etude des deux engins ensemble

En se basant sur les heures d'arrêt et la nature des pannes des deux engins de production Ensemble durant les 05 dernières années, le présent tableau a été réalisé (tableau N°4)

Tableau IV.04: Etude d'heures d'arrêt par nature de deux engins

Engin	ELC	MEC	HYD	Autres
Liebherr R 9100	2880	2707	5525	2255,5
Caterpillar 349D2L	3960	1102	8340	3362
Totale	6840	3809	13865	5617,5

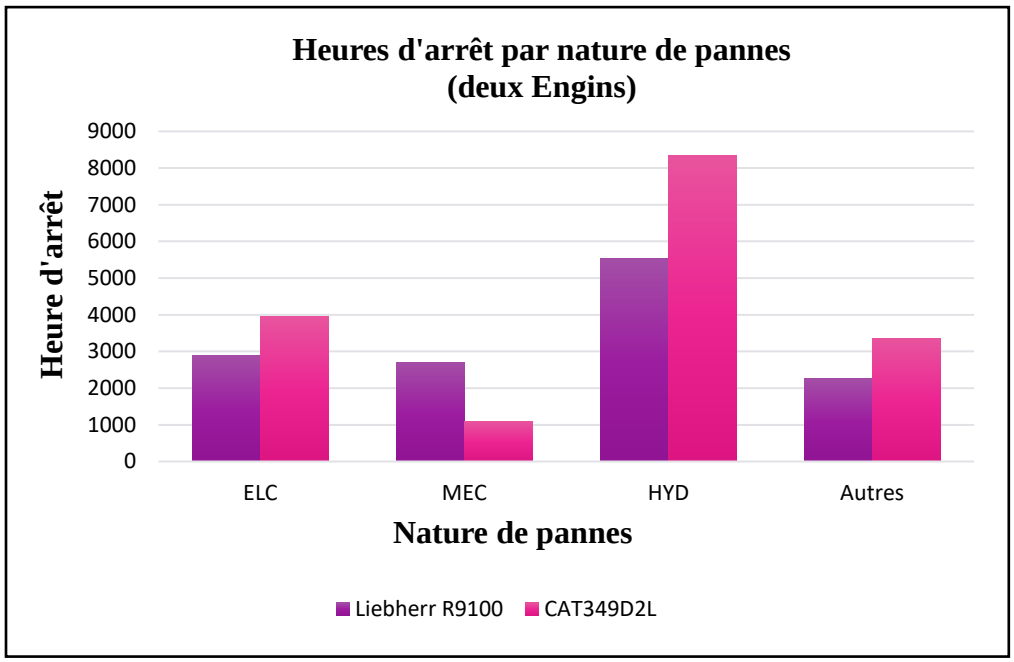


Figure IV.10: Heures d'arrêt par nature de pannes de deux engins ensemble.

❖ **Analyse**

Le graphe (fig.10) représente les heures d'arrêts et la nature des pannes des deux engins Ensemble pendant les 5 ans. D'apprès ce dernier, on constate que :

- Pour les pannes électriques (ELC), le total était de 6840 heures, Liebherr R 9100 contribuant à hauteur de 2880 heures, tandis que Caterpillar 349D2L a enregistré un nombre plus élevé avec 3960 heures, ce qui indique que les pannes électriques étaient plus nombreuses que ces dernières.
- Pour les pannes mécaniques (MEC), le total était de 3809 heures, Liebherr R 9100 enregistrant 2707 heures, ce qui est beaucoup plus élevé que Caterpillar 349D2L qui n'a enregistré que 1102 heures, ce qui montre que les problèmes mécaniques sont plus importants dans Liebherr R 9100.
- Les Pannes hydrauliques (HYD) sont les plus répandus avec un total de 13865 heures, Liebherr R 9100 contribuant à 5525 heures, tandis que Caterpillar 349D2L a enregistré le nombre le plus élevé avec 8340 heures, montrant que les problèmes hydrauliques constituent un défi majeur, en particulier sur Caterpillar 349D2L.
- En ce qui concerne Les autres pannes, Caterpillar 349D2L enregistre le chiffre le plus élevé avec 3362 heures, suivie par Liebherr R 9100 avec 2255.5.
- En général, les pannes hydrauliques sont les plus influentes, suivies des pannes électriques et mécaniques.

En se basant sur le nombre et la nature de pannes de deux engins de production pendant les 05 dernières années, le présent tableau a été réalisé (tableau N°05)

Tableau IV.05 : Etude du nombre de pannes par nature de panne des deux engins

Engin	**MEC**	**ELC**	**HYD**	**Autres**
Liebherr R 9100	6	47	20	13
Caterpillar 349D2L	8	34	23	23
Totale	14	81	43	36

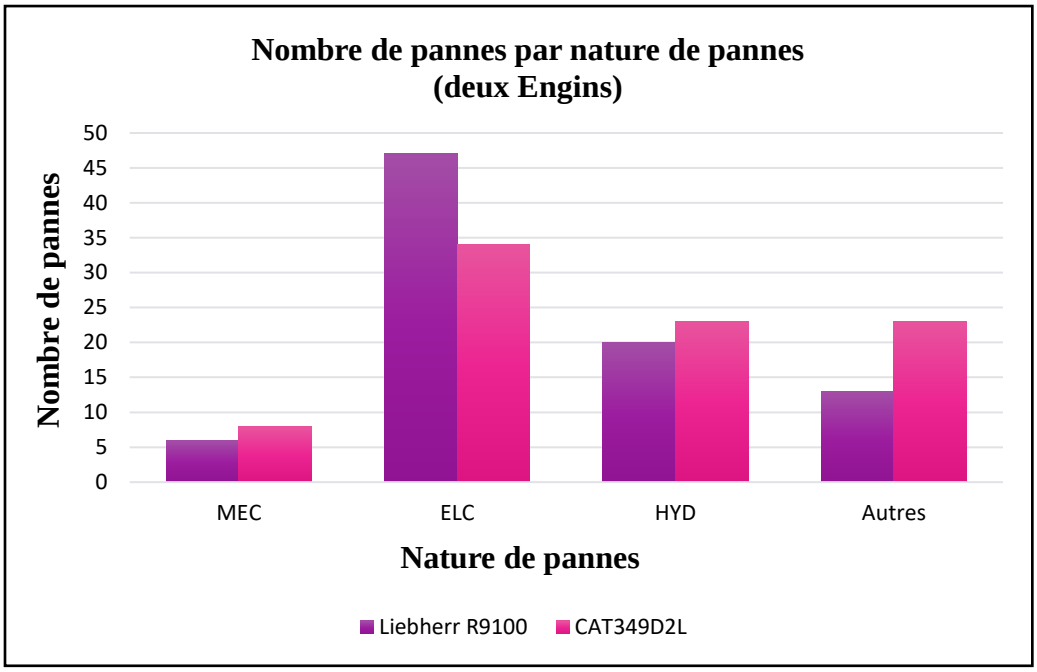


Figure IV.11 : Nombre de pannes par nature de pannes de deux engins ensemble.

❖ **Analyse**

Le graphe (fig.11) représente le nombre et la nature de pannes des deux engins ensemble Pendant 05 ans. D'après ce Graphe, en constate :

- Une convergence du nombre des pannes mécaniques entre les deux engins, Liebherr R 9100 enregistré 6 pannes, avec une légère différence par rapport Caterpillar 349D2L (8 pannes), ce qui indique que les systèmes électriques des deux engins fonctionnent avec une efficacité relativement acceptable.
- En ce qui concerne les pannes électriques, Liebherr R 9100 enregistre le nombre le plus élevé Avec47 pannes, suivi de 34 pannes. Cela indique que Liebherr R 9100 est plus susceptible d'avoir des pannes électriques.
- Pour les pannes hydrauliques, on note la même variation Les deux engins enregistrent des nombres de pannes proches, Liebherr R9100 enregistre 20 pannes, tandis que Caterpillar 349D2L enregistre un nombre de 23 pannes. Cette convergence montre que les systèmes hydrauliques des deux engins souffrent de problèmes similaires.
- En ce qui concerne Les autres pannes, Caterpillar 349D2L enregistre 23 pannes, suivie du Liebherr R9100 avec 13 pannes. Ce qui indique que Caterpillar 349D2L est confronté à d'autres problèmes.

- Globalement, Les pannes électriques sont plus importantes que les autres types de pannes Hydrauliques et mécaniques.

8. Application de la loi de Pareto (loi des 20-80)

Dans cette étape, nous appliquons la loi de Pareto des heures d'arrêt en fonction de la nature des pannes des deux engins durant les 05 dernières années, commençant par le tableau de classement des pannes selon leurs nature et les heures d'arrêt pour le 1er engin

Tableau IV.06 : Statistique d'heures d'arrêt de Liebherr R 9100

Nature de panne	Heures d'arrêt	Classement Nature de panne	Classement Heures d'arrêt	Cumule	% Cumulé
MEC	2563	HYD	5353	5353	41,30%
ELC	2880	ELC	2880	8233	63,53%
HYD	5353	MEC	2563	10796	83,30%
Autres	2164	Autres	2164	12960	100%

En se basant sur ce qui précède, nous traçons la courbe ABC (Figure IV.12)

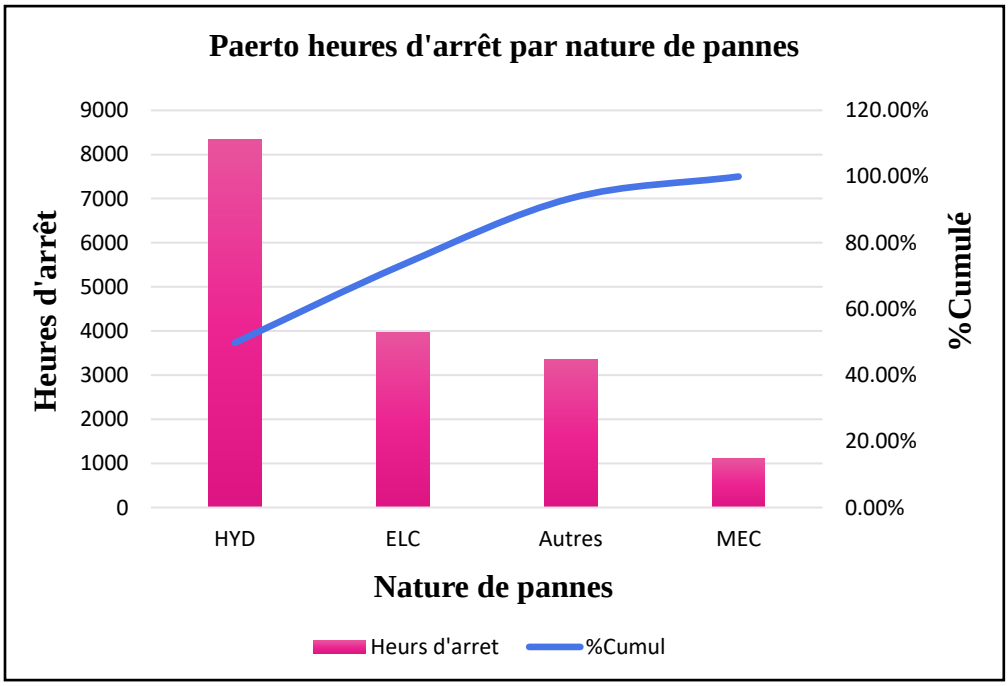


Figure IV.12 : Diagramme de Pareto heures d'arrêt (Liebherr R 9100).

❖ **Analyse**

L'analyse du diagramme de Pareto (courbe ABC) (figure IV.12) montre clairement que les pannes ayant le plus d'impact sur les temps d'arrêt de la Liebherr R 9100 sont les pannes hydrauliques (HYD) et les pannes électriques (ELC). Ces pannes représentent à elles seules environ 80% (zone A) du total des heures d'arrêt, ce qui nécessite une attention particulière. Viennent ensuite les autres pannes classées dans la catégorie « Autres », qui représentent environ 15 % du temps d'immobilisation total (zone B). Enfin, les pannes mécaniques (MEC), qui représentent moins de 5 % du total des arrêts (zone C), nécessitent des travaux moins importants.

Pour le 2ème paramètre, c'est à dire, le nombre de pannes de Liebherr R 9100 en fonction de leurs natures durant les 05 dernières années, on a réalisé le tableau suivant (tableau N°7)

Tableau IV.07 : Statistique nombre de panne de Liebherr R 9100 pendant 05 ans

Nature de panne	Nombre de pannes	Classement nature de pannes	Classement nombre de pannes	Cumule	% Cumulé
MEC	6	ELC	47	47	54,65%
ELC	47	HYD	20	67	77,91%
HYD	20	Autres	13	80	93,02%
Autres	13	MEC	6	86	100%

En se basant sur ce qui précède, le présent graphe a été obtenu :

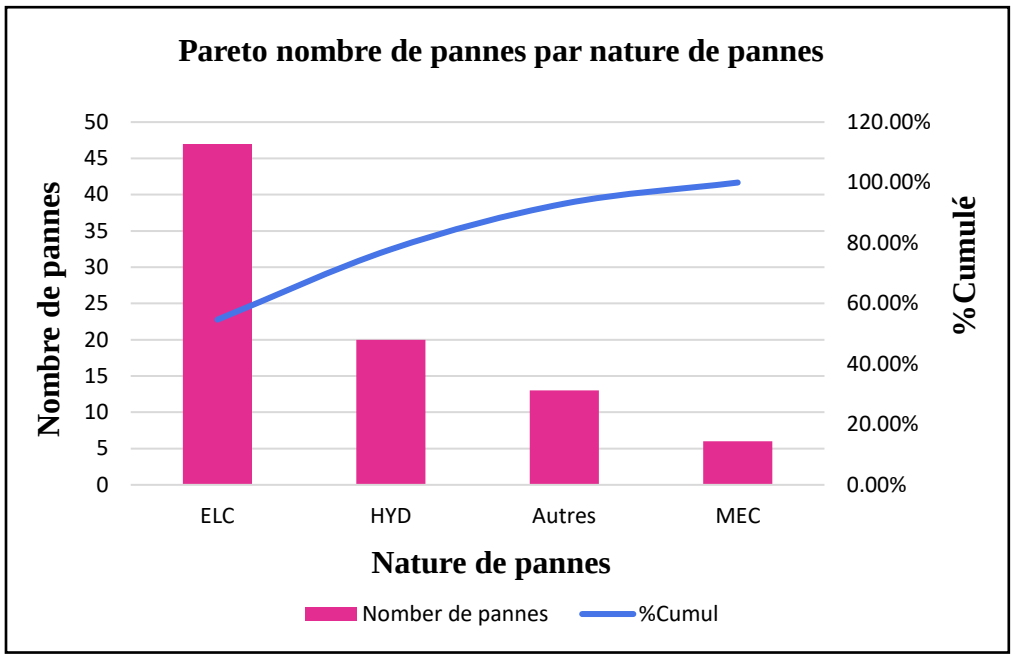


Figure IV.13 : Diagramme de Pareto nombre de pannes (Liebherr R 9100).

❖ **Analyse**

L'analyse du diagramme de Pareto (courbe ABC) (figure 13) révèle la prédominance de deux types de Pannes (ELC et HYD), qui sont responsables d'environ 80 % (Zone A) du nombre total de pannes enregistrées et nécessitent une attention particulière, suivis par (Autres et MEC), qui représentent une proportion plus faible (environ 20 % de pannes) (Zone B+C) et nécessitent des interventions moins importantes.

Passons au 2éme engin (voir tableau IV.08)

Tableau IV.08 : Statistique d'heures d'arrêt de Caterpillar 349D2L

Nature de panne	Heures d'arrêt	Classement Nature de panne	Classement Heures d'arrêt	Cumule	%Cumulé
MEC	1102	HYD	8340	8340	49,75%
ELC	3960	ELC	3960	12300	73,37%
HYD	8340	Autres	3362	15662	93,43%
Autres	3362	MEC	1102	16764	100%

En se basant sur ce qui précède, le présent graphe a été obtenu :

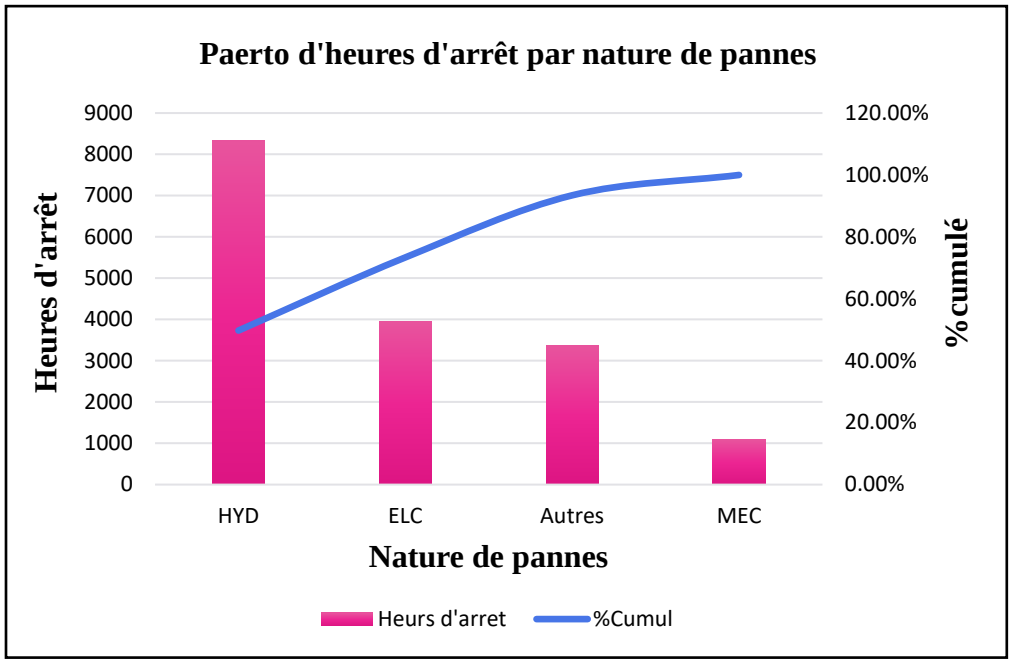


Figure IV.14 : Diagramme de Pareto heures d'arrêt (Caterpillar 349D2L).

❖ **Analyse**

L'analyse du diagramme de Pareto (courbe ABC) (figure. 14) révèle que la partie la plus influente de pannes, à savoir les pannes hydrauliques et électriques, constitue la zone A représentant 80 % du total des heures d'arrêt. Les pannes classées dans la catégorie « Autres » ont un impact notable mais non significatif, représentant 15% du total des heures d'arrêt, c'est-à-dire la zone B. Par ailleurs, les pannes mécaniques, classées dans la zone C, représentent 5% des heures d'arrêt.

Maintenant nous appliquons la loi pour le 2^{éme} paramètre, c'est-à-dire nombre des pannes en fonction de leurs natures (Tableau IV.09)

Tableau IV.09 : Statistique nombre de panne de Caterpillar pendant 05 ans

Nature de pannes	Nombre de pannes	Classement nature de pannes	Classement Nombre de pannes	Cumul	%Cumul
MEC	8	ELC	34	34	38,64%
ELC	34	HYD	23	57	64,77%
HYD	23	Autres	23	80	90,91%
Autres	23	MEC	8	88	100%

En se basant sur ce qui précède, le présent graphe a été obtenu :

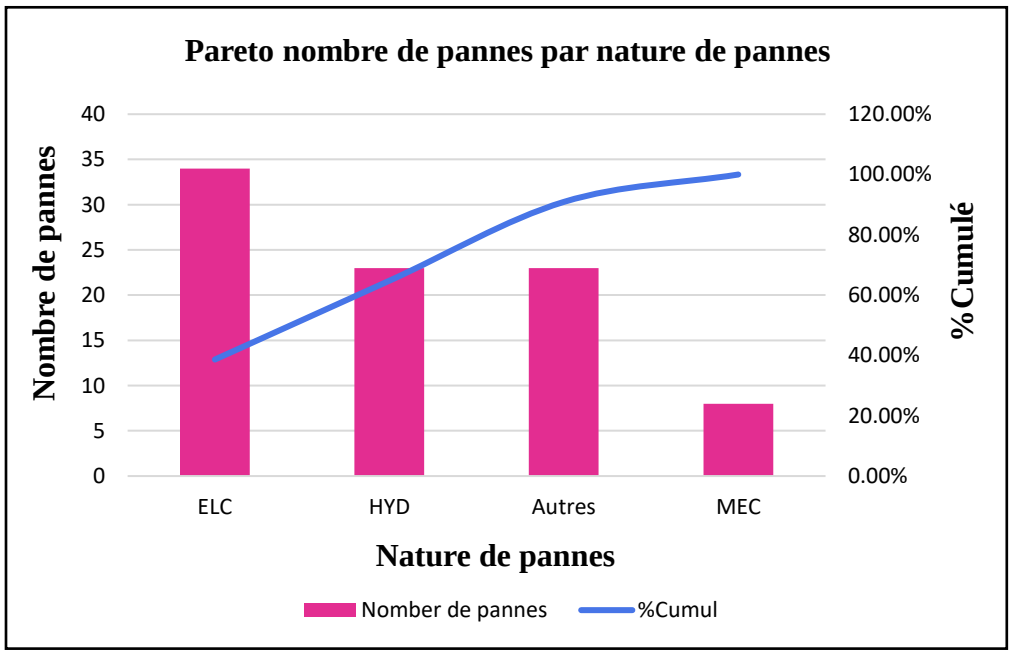


Figure IV.15: Diagramme de Pareto nombre de pannes (Caterpillar 349D2L).

❖ **Analyse**

Si l'on examine le diagramme de Pareto (courbe ABC) (figure.15), on voit clairement que les Pannes électriques sont localisées dans la zone A, où elles représentent le plus grand pourcentage de pannes (80%), suivies les pannes hydrauliques (HYD) et (Autres) dans la zone B, qui contribuent également à un pourcentage significatif de pannes (15%), et enfin, les Pannes mécaniques (MEC) sont localisées dans la zone C, où elles représentent un faible pourcentage de pannes (5%).

❖ **Comparaison**

- En ce qui concerne les heures d'arrêt :

Une comparaison des heures d'arrêt de la Liebherr R 9100 et de la Caterpillar 349D2L indique qu'une nette disparité dans le nombre total d'heures d'arrêt et la répartition des pannes par type. La Caterpillar 349D2L a enregistré un total de 16764 heures d'arrêt, soit beaucoup plus que les 12960 heures de la Liebherr R 9100, ce qui montre que la Caterpillar 349D2L nécessite plus de temps pour être réparé. En ce qui concerne la nature des pannes, les pannes hydrauliques (HYD) représentaient la plus grande proportion des deux engines, soit 49,75% des arrêts pour Caterpillar 349D2L et 41,30 % pour Liebherr R 9100, ce qui reflète la forte dépendance à l'égard du système hydraulique. D'autre part, les pannes mécaniques (MEC) sont plus élevées pour Liebherr R 9100, Les pannes électriques (ELC) et les autres pannes (Autres) sont relativement proches en comparant les deux engins. On peut conclure que Liebherr R 9100 présente une répartition relativement homogène des défaillances, tandis que Caterpillar a des problèmes plus graves avec le système hydraulique, ce qui nécessite une attention particulière en matière d'entretien.

- En ce qui concerne les nombres de pannes :

On constate que le nombre total de pannes sur cinq ans est similaire entre les deux engins, le Liebherr R 9100 enregistrant un total de 86 pannes et le Caterpillar 349D2L 88 pannes. Bien que le nombre total de pannes soit proche, la nature de pannes diffère entre les deux engins Les pannes électriques (ELC) sont les plus fréquentes pour les deux engins mais le nombre est beaucoup plus élevé pour Liebherr R 9100 (47 pannes) que pour Caterpillar349D2L (34 pannes). D'autre part, les pannes hydrauliques (HYD) et les autres pannes (Autres) étaient plus fréquentes chez Caterpillar que chez Liebherr. La différence dans le nombre d'échecs n'est donc pas significative, mais la nature des échecs est différente.

9. Application Ishikawa

Les pannes hydrauliques se distinguent comme étant les plus importantes parmi les catégories analysées. Elles représentent une part significative des pannes d'importance élevée, tant en termes de temps d'arrêt que de nombre de pannes. Les pannes hydrauliques peuvent avoir des conséquences graves sur les opérations, entraînant des temps d'arrêt prolongés et des coûts de réparation élevés.

Dans le contexte des pannes hydrauliques, l'utilisation du diagramme d'Ishikawa permet de décomposer les causes en différentes catégories, à savoir la main-d'œuvre, la méthode, le matériel,

le milieu et la matière. En identifiant ces causes (5M), les organisations peuvent prendre des mesures correctives appropriées pour minimiser les pannes, améliorer la performance des équipements et augmenter la productivité.

Dans les prochaines étapes, nous allons réaliser ce diagramme déterminer les causes des pannes hydrauliques, en répartissant leurs causes dans (5M). Cela nous permettra d'analyser en détail les causes contribuant aux pannes et de développer des solutions ciblées pour chaque catégorie.

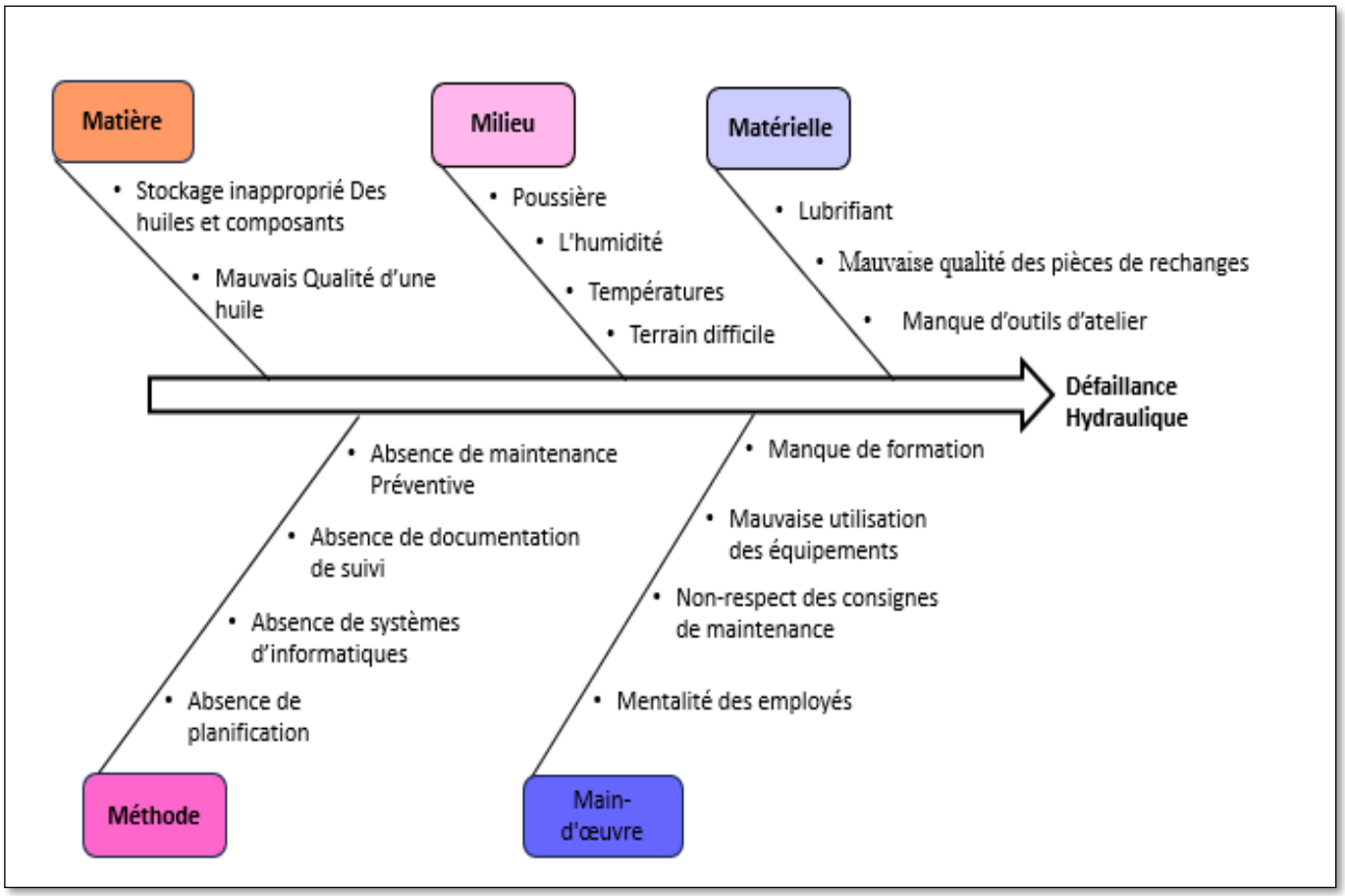


Figure IV. 16 : Diagramme d'Ishikawa (pannes hydraulique).

- **Main-d'œuvre**

Cette catégorie des causes est la plus considère avec un taux estimé à 38% d'effets.

- Manque de formation : absence de connaissances et compétences nécessaires.
- Mauvaise utilisation des équipements : manipulation incorrecte, surcharge, non-respect des spécifications.

- Non-respect des consignes de maintenance : absence de suivi régulier des données de performance, de signaux d'alerte et de maintenance préventive.
- Mentalité des employés : attitude conscience professionnelle du point de vue et engagement qualité et sécurité.

- **Méthode**

La catégorie méthode agît avec un taux de 35%

- Absence de maintenance préventive : absence de programmes réguliers de maintenance Préventive.
- Absence de documentation de suivi : manque de suivi de l'historique des équipements et d'informations sur les réparations effectuées.
- Absence de systèmes d'informatiques : non-utilisation des systèmes informatiques tels que le logiciel GMAO.
- Absence planification : Absence de calendrier pour la maintenance des systèmes et des procédures d'exploitation.

- **Matérielle**

Pour ce type de cause, on l'a quantifié a 4% d'effet

- Lubrifiant : Utilisation d'une huile hydraulique inadaptée.
- Mauvaise qualité des pièces de rechange : Utilisation les pièces de rechange de mauvaise qualité.
- Manques d'Outils d'atelier : Manque d'Outils de maintenance et d'assemblage (Les clés, Tournevis, Pinces, Pied à coulisse numérique……)

- **Milieu**

Cette catégorie des causes contribuer à un taux estimé à 21% d'effets**.**

- Poussière : L'accumulation de poussière dans l'équipement augmente le risque de contamination par l'huile et de colmatage des filtres.
- Températures : Les températures élevées affectent la viscosité et le débit de l'huile.
- L'humidité : conduit à la corrosion Composants minéraux.
- Terrain difficile : utilisation dans des environnements exigeants avec des sols instables, donc Vibrations excessives entraînant des fuites.

- **Matière**

Cette catégorie des causes contribuer à un taux estimé à 2% d'effets

- Stockage inapproprié des huiles et composants : Une mauvaise conservation peut entraîner une dégradation des matériaux (ex. huile exposée à l'humidité, flexibles mal stockés).
- Mauvaise qualité d'une huile : Utilisation Une huile de mauvaise qualité ou non conforme aux recommandations du fabricant peut entraîner une détérioration prématurée des composants.

10. Application la loi de Weibull

Tableau IV.10: Les paramètres de Weibull de deux engins pendant 5 ans

Année		**β**	**η**	**γ**	**MTBF**	**Fiabilité**
La pelle hydraulique Liebherr R 9100	2020	1,9	2030	0	1801,3408	61%
	2021	2,2	9000	0	7970,58	71%
	2022	1,5	7512	0	6781,458	58%
	2023	3,1	8432	0	7540,82192	69%
	2024	2,5	5495	0	4875,4937	52%
Année		**β**	**η**	**γ**	**MTBF**	**Fiabilité**
La pelle hydraulique Caterpillar 349D2L	2020	5,4	7000	0	6455,68	70%
	2021	4,5	7300	0	6661,761	73%
	2022	1	2000	0	2000	31%
	2023	6	5000	0	4638,6	53%
	2024	1	1000	0	1000	28%

- Exemple pour **Liebherr R 9100** en 2020

2020		
Order i	**TBF**	**Fi**
1	150	0,129
2	180	0,314
3	200	0,5
4	220	0,685
5	639	0,870

Vu le nombre d'échantillons N ≤ 20

On applique la loi du rang médian pour connaitre la probabilité de l'ordre :

$$\mathrm{Fi} = \frac{\mathrm{i} - 0{,}3}{\mathrm{N} + 0{,}4}$$

Donc :

$$\mathrm{Fi} = \frac{1 - 0{,}3}{5 + 0{,}4} = 0.129$$

En se basant sur les calculs de la probabilité de répartition Fi on trace la droite de Weibull et on détermine les paramètres β, η et ϒ (fig.15)

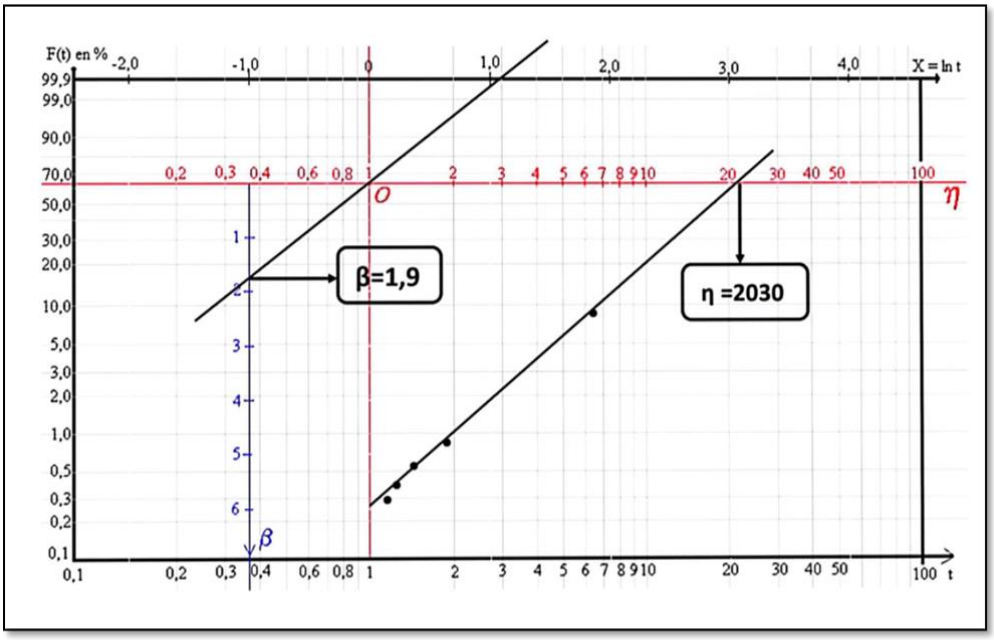


Figure IV.17 : Application de la loi de Weibull (Liebherr R 9100).

- Exemple pour le **Caterpillar 349D2L** en 2024

2024		
Ordre i	TBF	Fi
1	40	0,048
2	50	0,118
3	57	0,187
4	60	0,256
5	68	0,326
6	71	0,395
7	82	0,465
8	99	0,534
9	100	0,604
10	110	0,673
11	115	0,743
12	125	0,812
13	140	0,881
14	150	0,951

On procède de la même façon que pour le 1erengin et on trace la droite de Weibull en déterminant les différents paramètres de la loi sur le papier de Weibull fig. 16

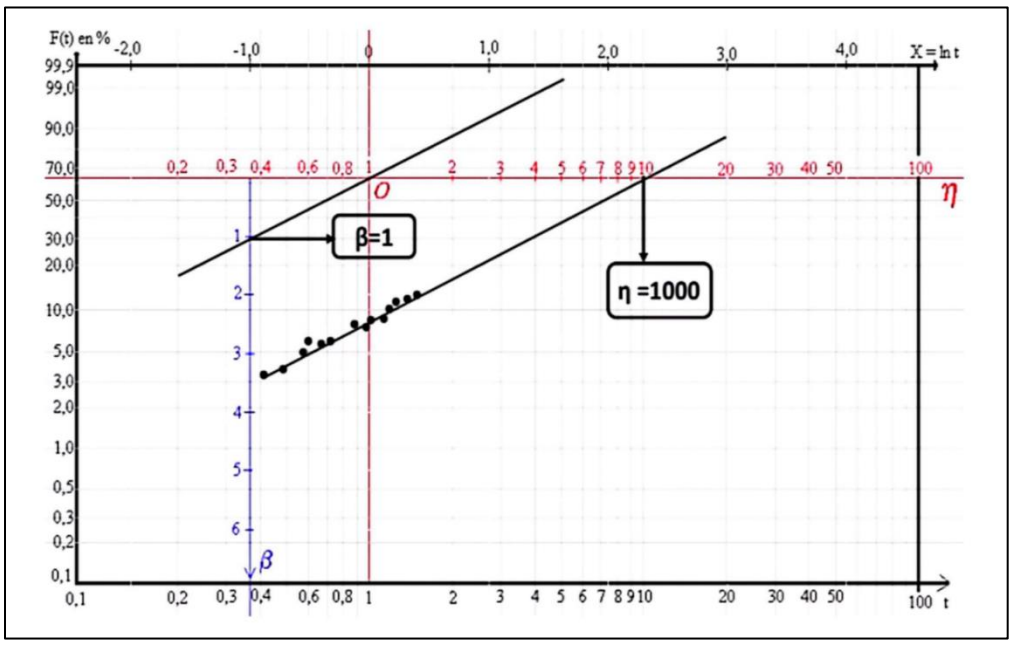


Figure IV.18: Application de la loi de Weibull (Caterpillar 349D2L)

Une fois les paramètres de Weibull (de forme **β**, d'échelle **η** et de position **γ**) sont déterminés, on passe de calcul de la moyenne des temps de bon fonctionnement le MTBF et de la fiabilité R(t).

Remarque :

$$MTBF = A*\eta + \gamma \quad \text{(IV.1)}$$

(A : valeur sur le tableau de Weibull)

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \quad \text{(IV.2)}$$

Tableau IV.11 : La fiabilité des deux engins pendant 5 ans

Années	Leibherr R 9100	Caterpillar349D2L
2020	61%	70%
2021	71%	73%
2022	58%	31%
2023	69%	53%
2024	52%	28%

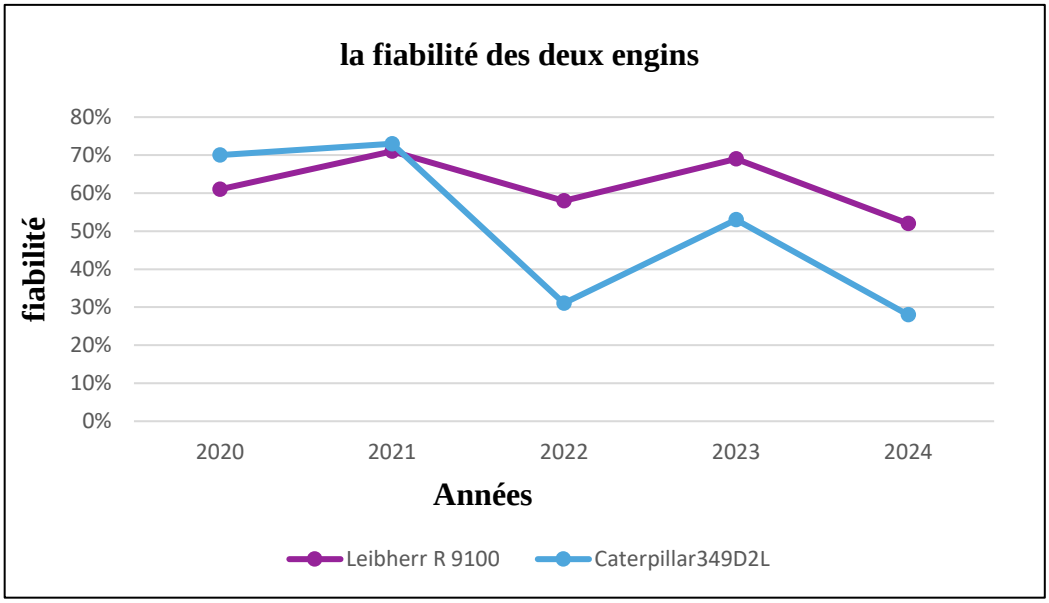


Figure IV.19: Diagramme de la fiabilité des deux engins pendant 5 ans.

❖ **Analyse**

D'âpre le graphique (fig.19) On note que la fiabilité du Liebherr R 9100 est estimée 61% en 2020, Puis une augmentation en 2021 à 71%, indiquant une amélioration des performances ou un entretien efficace. Cependant, en 2022, sa fiabilité a diminué à 58%, marquant une baisse de performance. En 2023, il s'est amélioré à 69%, avant de chuter à 52% en 2024, son niveau le plus bas sur la période étudiée.

On note que la fiabilité du Caterpillar 349D2L, en 2020 est estimée à 70%, a légèrement augmenté en 2021 pour atteindre 73%, mais en 2022 la fiabilité a connu une forte baisse à 31%, ce qui est dû à des problèmes techniques en plus de son utilisation dans des conditions d'exploitation difficiles. En 2023, la fiabilité s'est améliorée à 53%, sans toutefois retrouver les niveaux de 2020-2021. En 2024, elle a de nouveau diminué à 28%, enregistrant ainsi la valeur la plus basse durant toutes les années étudiées.

❖ **Comparaison**

En comparant les deux engins, on constate que Liebherr R 9100 a maintenu un niveau de fiabilité relativement plus stable par rapport au Caterpillar 349D2L, qui a connu des baisses brusques, notamment en 2022 et 2024. Ces différences peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs tels que le mauvais entretien, les conditions d'exploitation difficiles sans oublier la conception technique de chaque engin.

11. Calcul de la disponibilité

Après avoir déterminé la fiabilité, nous passons au calcul de la disponibilité, le 2éme paramétre de la sureté de fonctionnement par la formule suivante :

$$A = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (IV.3)$$

MTBF : Temps moyen de bon fonctionnement.

MTTR : Le temps technique moyen de réparation.

Tableau IV.12 : la disponibilité de deux engins pendant 5 ans

Années	Leibherr R 9100	Caterpillar349D2L
2020	75%	88%
2021	71%	75%
2022	59%	28%
2023	69%	54%
2024	53%	29%

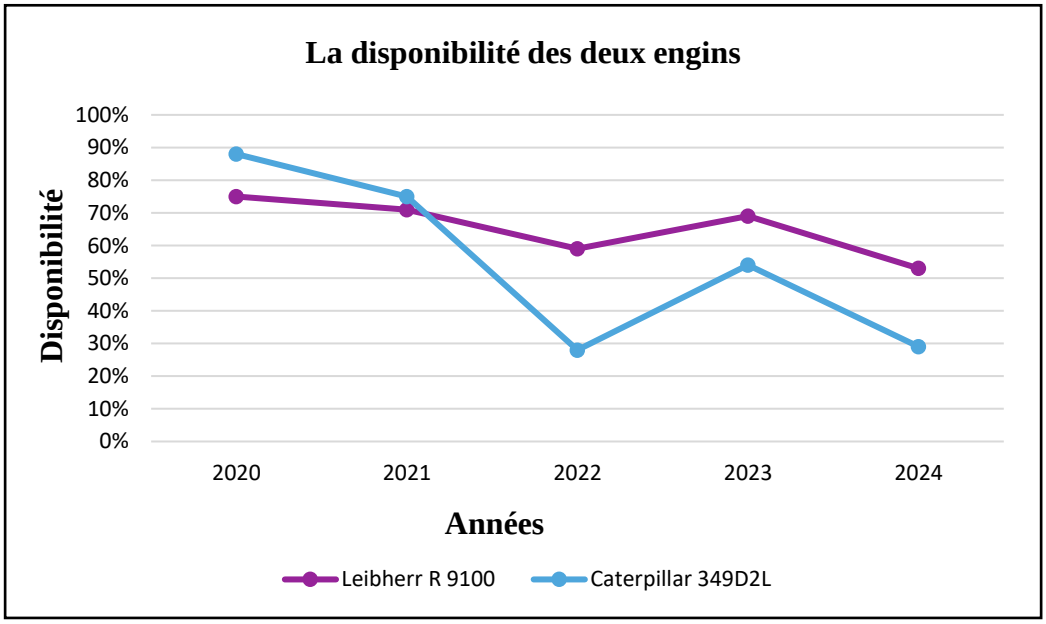


Figure IV.20 : Diagramme de la disponibilité des deux engins pendant 05 ans.

❖ **Analyse**

Le graphique (Fig. 20) montre que la disponibilité du Liebherr R 9100 a fluctué, mais on constate que les baisses n'ont pas été très fortes : 75 % en 2020, puis une légère baisse en 2021 pour se stabiliser autour de 71 %. En 2022, nous observons un net recul pour atteindre environ 59%. Ensuite, l'indice s'améliore à nouveau en 2023, passant auprès de 68 %, mais en 2024, il chute à nouveau pour atteindre environ 53 %.

La courbe montre une nette détérioration des performances de Caterpillar 349D2L, en particulier entre 2021 et 2022, en commençant par une disponibilité très élevée en 2020, de l'ordre de 88 %. Par la suite, elle connaît un déclin continu, tombant à 75% en 2021, puis une chute brutale en 2022 pour atteindre seulement 28% environ. En 2023, la performance s'améliore légèrement pour atteindre environ 54 %, mais elle chute à nouveau en 2024 pour s'établir à environ 29 %.

La fiabilité et la disponibilité sont les deux principaux de la sureté de fonctionnement. Ces deux concepts reflètent la sécurité du personnel travaillant sur le matériel en question, la sécurité du matériel en lui-même et l'environnement. Un matériel non fiable met le tout en risque.

12. Proposition d'un programme de maintenance préventive

➢ **Pour Les Pannes Hydrauliques**

Vous trouverez ci-dessous plusieurs étapes concrètes pour mettre en œuvre une maintenance préventive efficace afin de garantir le bon fonctionnement des machines et d'éviter les pannes imprévues :

- **Planification des interventions de maintenance**

- Établir un calendrier d'entretien basé sur les recommandations des fabricants d'engins et de composants hydrauliques. Cela inclut des intervalles spécifiques pour les inspections, les changements de fluides, les vérifications des filtres, etc.

- **Entretien des fluides hydrauliques**

- Vérification du niveau de fluide hydraulique régulièrement pour éviter que l'air n'entre dans le système, ce qui pourrait entraîner des cavitations ou une défaillance du moteur hydraulique.

- Contrôle la qualité des fluides grâce à la mesure Viscosité et propreté du liquide. Se le liquide est contaminé ou détérioré, remplacez-le par un nouveau liquide de qualité appropriée.
- Test de température à travers Installez un thermomètre ou un capteur pour surveiller la température du fluide hydraulique. Si la température dépasse la plage spécifiée, le système de refroidissement doit être vérifié.

- **Vérification des composants clés**

- Inspectez les pompes hydrauliques pour vous assurer qu'elles fonctionnent correctement, par exemple en écoutant les bruits anormaux pouvant indiquer un problème interne.
- Vérifier l'état des vannes et des vérins pour détecter des fuites ou un fonctionnement irrégulier. Nettoyer et lubrifier les parties mobiles si nécessaire.

Lubrification des pièces mobiles

- Lubrification des pièces mobiles des systèmes hydrauliques comme les articulations, les joints, et les axes des vérins pour réduire l'usure et assurer une bonne performance.
- Vérifier les joints d'étanchéité et les remplacer dès qu'ils montrent des signes d'usure pour prévenir les fuites et maintenir l'efficacité du système

- **Formation des opérateurs**

- Sensibilisation à l'entretien préventif à travers Former les opérateurs sur les bonnes pratiques d'utilisation des engins, notamment sur la manière d'éviter la surcharge hydraulique, de détecter les signes de défaillance et de maintenir une utilisation correcte des systèmes hydrauliques.

- **Analyse des pannes passées**

- Analyse les pannes précédentes pour identifier des tendances ou des problèmes récurrents. Cela permet d'adapter la stratégie de maintenance préventive et d'éviter des pannes similaires à l'avenir.

13. Conclusion

A la fin de ce chapitre, Il s'agit de plusieurs études et lois liées à La fiabilité et la disponibilité sont les deux principaux de la sureté de fonctionnement qui ont été abordées dans la pratique. Ce qui a montré qu'il s'agit des facteurs essentiels pour réduire les pannes et augmenter la sécurité de fonctionnement.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

A la fin de cette étude nous avons conclu les points suivants :

L'optimisation de la maintenance est essentielle pour améliorer les performances du système en assurant un fonctionnement fiable et rentable. En adoptant une méthodologie basée sur l'étude des paramètres de sûreté de fonctionnement et l'utilisation de techniques d'analyse avancées, et en encourageant la collaboration entre les travailleurs, il est possible de maximiser les avantages de cette approche. D'ouvrir la voie à des solutions plus efficaces, en identifiant et en éliminant les défaillances potentielles.

Les Méthodes de maintenance traditionnelles, telles que celles basées sur des intervalles de temps ont des limites en termes d'efficacité et d'efficience. Voici la nécessité d'aller vers une approche basée sur la sûreté de fonctionnement telle que la maintenance prédictive ainsi que la maintenance conditionnelle. Nous devons mieux prendre en compte l'état réel de l'équipement pour optimiser les activités de maintenance.

L'utilisation de méthodes d'analyse de données avancées, telles que la prévision analytique, est essentielle pour tirer la meilleure partie des avantages de la maintenance et de la fiabilité. Ces méthodes permettent la collecte, l'analyse et l'interprétation proactives des données, ce qui facilite l'identification précoce des pannes et l'organisation efficace des activités de maintenance.

La coopération entre les personnes expérimentées, telles que les ingénieurs de maintenance, les opérateurs de systèmes et les fournisseurs de services, est essentielle dans
L'mélioration de la maintenance, Grâce à la communication et à la coordination entre eux.

Dans ce cas, nous avons utilisé des méthodes interconnectées, d'abord la loi de Pareto pour déterminer les pannes les plus prioritaires, puis l'application d'Ishikawa pour déterminer les causes de ces pannes et enfin le modèle de Weibull pour calculer la fiabilité, et calculer la disponibilité des deux engins pendant 05 ans, les résultats ont été les suivants :

- Variation de fiabilité, disponibilité due à plusieurs raisons, notamment la méthode de maintenance adoptée.
- Les pannes les plus courantes affectant les deux engins sont les pannes hydrauliques généralement causées par la main-d'œuvre, ainsi que d'autres causes, en particulier des méthodes d'application inadéquates telles que la maintenance préventive, Ce qui a conduit à la proposition d'un programme visant à prévenir et à réduire ce type de pannes, qui est le but de cette étude.

Nous espérons que ce document servira d'une référence pour de futures études de sureté de fonctionnement des machines minières.

Bibliographie

[01] DRISS. B, (2023)" Le grand livre de la maintenance, Concepts, démarches, méthodes, outils et techniques".

[02] OUERTANI. A, (2010). ″Effets des stratégies de maintenance sur la performance d'une ligne De production avec zones de stockage à capacité finie″. Mémoire. Trois-Rivières, Université du Québec à Trois-Rivières, 170 p.

[03] DJEBALA. A, (2015) Cours : "maintenance industrielle. " Université du 8 mai1945 –Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie Mécanique.

[04] MANSOURI.M, (2014) Cours : " Introduction à la maintenance. "Institut Supérieur des Études Technologiques de Nabeul – Tunisie.

[05] Ouali M.S., Rezg N., Xie X. (2002) " Maintenance préventive", Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA), Vol. 36, No1, p116.

[06] La Norme NF EN 13306 X 60-319.

[07] MESBAH. M, (2016) Cours : " Généralités sur la maintenance." Université Ibn Khaldoun de Tiaret.

[08] SOUAIAIA. H, (2017). "Etude de maintenance du système moteur-voix rouleaux "TSS" SIDER-Annaba". Mémoire de Master. Université Badji Mokhtar– Annaba, faculté des Sciences de l'ingéniorat, Département de génie mécanique,78p.

[09] Norme NF EN 13306 Janvier 2018.

[10] La Norme NF X 50-501, février 1982.

[11] La Norme Afnor NF-X 60-010 de 1994.

[12] MAHDJOUB. A et TAIBI.A, (2022). "Étude de la fiabilité d'une pompe centrifuge type 300/LNN 750 pour circuit de refroidissement d'un cylindre de laminoir à chaud (LAC) ". Mémoire de Master. Université 8 Mai 1945 – Guelma, Faculté des Sciences et De la Technologie, Département de Génie Electrotechnique et Automatique,110p.

[13] HADJ MABROUK .H, (2010) "Introduction à la sécurité et à l'analyse des risques Technologiques et Humains". 3eme Symposium International sur la Maintenance et La Maitrise des Risques. Rabat, Maroc.

[14] KEROUAZ. A et BOUAZIZ.A, (2020). "Etude et analyse des modes de Défaillance d'un Processus de production du céramique". Mémoire de Master. Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département D'electrotechnique,72p.

[15] AUBERVILLE.J. M. (2004). "Livre de la Maintenance Industrielle". De l'entretien de base à l'optimisation de la sûreté.

[16] LAGGOUNE. R, (2019) Cours : " Fiabilité des systèmes". Université Abderahmane Mira Béjaia.

[17] R. LABRECQUE, DESROCHER.S, (1999)"Livre Québec Organisation de la maintenance de la Machinerie de production dans l'industrie manufacturière : Étude Préliminaire Secteurs de formation électrotechnique fabrication mécanique d'entretien".

[18] BELHADJ. D, (2020) Cours : " Maintenance et sûreté de fonctionnement". Université de Chlef.

[19] MANSOURI.M, Cours (2020) : "sûreté de fonctionnement". Université de BATNA.

[20] LAPRIE J. C. (1995) Livre : "Guide de la Sûreté de fonctionnement, Toulouse, Cepadues".

[21] J. LAURENS, (2011) "Mise en place d'un plan de maintenance préventive sur un site de Production pharmaceutique Sciences pharmaceutiques". Thèse de Doctorat en pharmacie. Université Joseph Fourier. Faculté de pharmacie de Grenoble, France, 159p.

[22] REZIG.M, Cours (2024) :" Sécurité de Fonctionnement et Maintenance ". Université Mohamed Khider de Biskra, Faculté des sciences et de la technologie, Département Génie Electrique.

[23] DJELLALI.B et DJEBABLA. B, (2021) " Analyse des causes de défaillance des pompes Centrifuges ". Mémoire de master. Université Badji Mokhtar- Annaba, faculté des sciences De l'Ingéniorat, département électromécanique.

[24] Mellouk.A et CHABBI.K, (2023) " Optimisation de la maintenance par fiabilité (cas de la mine d'Ouenza) ". Mémoire de master. Université Larbi Tebessi – Tébessa, Institut des Mines, département d'electromécanique.76p

[25] Anonyme, Cours : "Généralités sur les défaillances", défaillance et outils d'analyse, M1 MIMS, Université à Constantine.

[26] Anonyme, Cours : "AMDEC" Université Fréres Mentouri Constantine 1.

[27] HENG. J, (2005) livre "pratique de la maintenance préventive", Dunod.

[28] OUARAB. N, DADI. S, (2016) "Analyse de la Fiabilité et optimisation de la Maintenance préventive du système de contrôle d'Accès". Mémoire de master. Université de Béjaïa.

[29] Breton, J. C, Cours (2013) : "Processus stochastique". Université de Rennes.

[30] Taleb .M, Cours (2022) : "Fiabilité des systèmes ". Université Larbi Tebessi – Tébessa. Institut des Mines, département Electromécanique.

[31] BOUSBIA. S. S, Cours : "Fiabilité". Université El oud.

[32] Cours : "Techniques utilisées en maintenance ", spécialité Maintenance industrielle, Université DJELFA.

[33] BELGHIT.I et ATIA.S, (2021). Etude des indicateurs de fiabilité D'un système électromécanique ". Mémoire de Master. Université Larbi Tebessi – Tébessa, Institut des Mines, Département Electromécanique.

[34] BELLAOUAR.A, BELEULMI.S, Cours Fiabilité, maintenabilité et disponibilité (FMD), Université Constantine1, 2014.

[35] Boukhezar. F, Hammouche. S, (2016) " Etude de fiabilité de la ligne de fibre optique Sonatrach". (RTC Béjaia-RTH).

[36] DUSART. P, (2018) Cours : "Statistiques inférentielles".

[37] MAGAIN. P, (2013), " Introduction aux méthodes quantitatives et éléments statistiques".

[38] NARSIS.S, (2012) " Contribution à l'étude d'impact de l'exploitation du gisement ferrifère De la mine de l'Ouenza sur l'environnement". Mémoire de Magister. Université Badji Mokhtar - Annaba, Algérie - Magistère (Ecole doctorale).

[39] Le directeur de ressource humaine. Mine d'ouenza.2025

[40] D.E. FETHALLAH, M.E. BENOUIS, (2018). "L'évaluation de la disponibilité et de la Fiabilité Des composants réparables". Mémoire de Master. Université Tahar Moulay de Saida.

[41] Chouchéne. M et BENFRAJ.B et MERHEBEN.N, Cours (2014) " Introduction à la Maintenance". Institut Supérieur des études technologiques de Nabeul – Tunisie.

[42] AFNOR, FDX60-000, "maintenance industrielle, fonction maintenance".

[43] Pr. LOUAFI.M, (2023) Cours : "Sûreté de Fonctionnement ". Université Larbi Tebessi – Tébessa. Institut des Mines, département d'électromécanique.

[44] Documentations de la mine "catalogue de l'engin Liebherr R 9100 ".

[45] Documentations de la mine "catalogue de l'engin Caterpillar 349D2L".

[46] HOUARI.N, (2022). "Analyse FMD d’un four à induction ". Mémoire de Master. Université Ibn Khaldoun de Tiaret, Faculté des Sciences Appliquées, Département de Génie Mécanique.

ANNEXE TABLEAUX

Tableau 01 : fiche technique Liebherr R 9100

Fiche technique	
Modèle	R 9100
Type de véhicule	Pelle hydraulique
Poids opérationnel	108,5 T
Puissance du moteur	565 kW
Capacité du godet	6,8 m^3
Largeur de chenilles	600 mm
Type de flèche	Monobloc
Portée maximum	13 m
Profondeur de dragage	7,15 m
Fabricant du moteur	Liebherr
Type de moteur	D 9512
Cylindrée du moteur	24,24 l
Force d’arrachement	404 kN

Tableau 02 : fiche technique Caterpillar 349D2L

Fiche technique	
Poids	46.28 t
Largeur en transport	3.64 m
Largeur chenilles caoutchouc	750 mm
Prof. de dragage	8.92 m
Type de moteur	C13 Acert
Cylindrée	12.5 l
Longueur en transport	12.45 m
Hauteur en transport	3.68 m
Max. Portée	12.94 m
Fabricant du moteur	Caterpillar
Puissance moteur	283 kW

Tableau 03 : Heures d'arrêts en fonction d'années (Liebherr R 9100)

	2020	2021	2022	2023	2024
ELC	0	500	800	880	700
MEC	300	380	550	427	1050
HYD	400	1080	1600	430	2015
Autres	156,5	239	550	950	360

Tableau 04 : Nombre de pannes en fonction d'années (Liebherr R 9100)

	2020	2021	2022	2023	2024
MEC	0	1	2	1	2
ELC	3	5	11	9	19
HYD	2	4	5	2	7
Autres	1	1	4	5	2

Tableau 05 : Heures d'arrêts en fonction d'années (Caterpillar 349D2L)

	2020	2021	2022	2023	2024
ELC	180	740	1200	1000	840
MEC	105	85	500	285	127
HYD	1300	940	2700	2000	1400
Autres	824	231	639	908	760

Tableau 06 : Nombre de pannes en fonction d'années (Caterpillar 349D2L)

	2020	2021	2022	2023	2024
MEC	1	1	3	2	1
ELC	5	4	11	8	6
HYD	3	2	8	4	6
Autres	5	7	4	5	2

Tableau 07 : table de Weibull

β	A	B	β	A	B	β	A	B	β	A	B
0,05	2,43290E+18	9,03280E+23	1,75	0,89062	0,52523	3,45	0,89907	0,28822	5,15	0,91974	0,20505
0,1	3,62880E+06	1,55977E+09	1,8	0,88929	0,51123	3,5	0,89975	0,28473	5,2	0,92025	0,20336
0,15	2,59357E+03	1,21993E+05	1,85	0,88821	0,49811	3,55	0,90043	0,28133	5,25	0,92075	0,20170
0,2	1,20000E+02	1,90116E+03	1,9	0,88736	0,49579	3,6	0,90111	0,27802	5,3	0,92125	0,20006
0,25	2,40000E+01	1,99359E+02	1,95	0,88671	0,47419	3,65	0,90178	0,27479	5,35	0,92175	0,19846
0,3	9,26053E+00	5,00780E+01	2	0,88623	0,46325	3,7	0,90245	0,27164	5,4	0,92224	0,19688
0,35	5,02914E+00	1,99761E+01	2,05	0,88589	0,45291	3,75	0,90312	0,26857	5,45	0,92272	0,19532
0,4	3,32335E+00	1,04382E+01	2,1	0,88569	0,44310	3,8	0,90379	0,26558	5,5	0,92320	0,19379
0,45	2,47869E+00	6,46009E+00	2,15	0,88561	0,43380	3,85	0,90445	0,26266	5,55	0,92368	0,19229
0,5	2,00000E+00	4,47214E+00	2,2	0,88562	0,42495	3,9	0,90510	0,25980	5,6	0,92414	0,19081
0,55	1,70243E+00	3,34530E+00	2,25	0,88573	0,41652	3,95	0,90576	0,25701	5,65	0,92461	0,18935
0,6	1,50458E+00	2,64514E+00	2,3	0,88591	0,40848	4	0,90640	0,25429	5,7	0,92507	0,18792
0,65	1,36627E+00	2,17887E+00	2,35	0,88617	0,40080	4,05	0,90704	0,25162	5,75	0,92552	0,18651
0,7	1,26582E+00	1,85117E+00	2,4	0,88648	0,39345	4,1	0,90768	0,24902	5,8	0,92597	0,18512
0,75	1,19064	1,61077	2,45	0,88685	0,38642	4,15	0,90831	0,24647	5,85	0,92641	0,18375
0,8	1,13300	1,42816	2,5	0,88726	0,37967	4,2	0,90894	0,24398	5,9	0,92685	0,18240
0,85	1,08796	1,28542	2,55	0,88772	0,37319	4,25	0,90956	0,24154	5,95	0,92729	0,18107
0,9	1,05218	1,17111	2,6	0,88821	0,36696	4,3	0,91017	0,23915	6	0,92772	0,17977
0,95	1,02341	1,07769	2,65	0,88873	0,36097	4,35	0,91078	0,23682	6,05	0,92815	0,17848
1	1,00000	1,00000	2,7	0,88928	0,35520	4,4	0,91138	0,23453	6,1	0,92857	0,17721
1,05	0,98079	0,93440	2,75	0,88986	0,34963	4,45	0,91198	0,23229	6,15	0,92898	0,17596
1,1	0,96491	0,87828	2,8	0,89045	0,34427	4,5	0,91257	0,23009	6,2	0,92940	0,17473
1,15	0,95170	0,82971	2,85	0,89106	0,33909	4,55	0,91316	0,22793	6,25	0,92980	0,17351
1,2	0,94066	0,78724	2,9	0,89169	0,33408	4,6	0,91374	0,22582	6,3	0,93021	0,17232
1,25	0,93138	0,74977	2,95	0,89233	0,32924	4,65	0,91431	0,22375	6,35	0,93061	0,17113
1,3	0,92358	0,71644	3	0,89298	0,32455	4,7	0,91488	0,22172	6,4	0,93100	0,16997
1,35	0,91699	0,68657	3,05	0,89364	0,32001	4,75	0,91544	0,21973	6,45	0,93139	0,16882
1,4	0,91142	0,65964	3,1	0,89431	0,31561	4,8	0,91600	0,21778	6,5	0,93178	0,16769
1,45	0,90672	0,63522	3,15	0,89498	0,31135	4,85	0,91655	0,21586	6,55	0,93216	0,16657
1,5	0,90275	0,61294	3,2	0,89565	0,30721	4,9	0,91710	0,21397	6,6	0,93254	0,16547
1,55	0,89939	0,59252	3,25	0,89633	0,30319	4,95	0,91764	0,21212	6,65	0,93292	0,16439
1,6	0,89657	0,57372	3,3	0,89702	0,29929	5	0,91817	0,21031	6,7	0,93329	0,16332
1,65	0,89421	0,55635	3,35	0,89770	0,29550	5,05	0,91870	0,20853	6,75	0,93366	0,16226
1,7	0,89224	0,54024	3,4	0,89838	0,29181	5,1	0,91922	0,20677	6,8	0,93402	0,16121

Tableau 08 : TBF Liebherr R 9100 (2020)

2020		
Order i	TBF	Fi
1	150	0,129
2	180	0,314
3	200	0,5
4	220	0,685
5	639	0,87

Tableau 09 : TBF Liebherr R 9100 (2021)

2021		
Order i	TBF	Fi
1	308	0,067
2	450	0,163
3	500	0,259
4	500	0,355
5	520	0,451
6	580	0,548
7	600	0,644
8	650	0,74
9	680	0,836
10	700	0,932

Tableau 10 : TBF Liebherr R 9100 (2022)

2022		
Order i	TBF	Fi
1	100	0.045
2	100	0.090
3	105	0.136
4	110	0,181
5	133	0,227
6	147	0,272
7	151	0,318
8	155	0,363
9	159	0,409
10	160	0,454
11	180	0,5
12	210	0,545
13	217	0,59
14	293	0,636
15	300	0,681
16	320	0,727
17	380	0,772
18	400	0,818
19	445	0,863
20	450	0,909
21	495	0,954

Tableau 11 : TBF Liebherr R 9100 (2023)

2023		
Order i	TBF	Fi
1	180	0,042
2	195	0,103
3	200	0,164
4	210	0,225
5	230	0,286
6	280	0,347
7	350	0,408
8	380	0,469
9	400	0,534
10	460	0,591
11	483	0,652
12	490	0,713
13	495	0,774
14	510	0,835
15	600	0,896
16	610	0,957

Tableau 12 : TBF Liebherr R 9100 (2024)

2024		
Order i	TBF	Fi
1	57	0,033
2	58	0,066
3	61	0,1
4	63	0,133
5	64	0,166
6	66	0,2
7	70	0,233
8	72	0,266
9	74	0,3
10	76	0,333
11	79	0,366
12	80	0,4
13	83	0,433
14	86	0,466
15	89	0,5
16	93	0,533
17	102	0,566
18	122	0,6
19	130	0,633
20	155	0,666
21	165	0,7
22	195	0,733
23	245	0,766
24	275	0,8
25	317	0,833
26	350	0,866
27	387	0,9

28	480	0,933
29	520	0,966

Tableau 13 : TBF Caterpillar 349D2L (2022)

2022		
Order i	TBF	Fi
1	52	0,038
2	55	0,076
3	58	0,115
4	60	0,153
5	61	0,192
6	62	0,230
7	63	0,269
8	70	0,307
9	76	0,346
10	82	0,384
11	85	0,423
12	87	0,461
13	89	0,5
14	90	0,538
15	91	0,576
16	96	0,615
17	103	0,653
18	110	0,692
19	112	0,730
20	114	0,769
21	120	0,807
22	123	0,846
23	130	0,884
24	145	0,923
25	165	0,961

Tableau 14 : TBF Caterpillar 349D2L (2023)

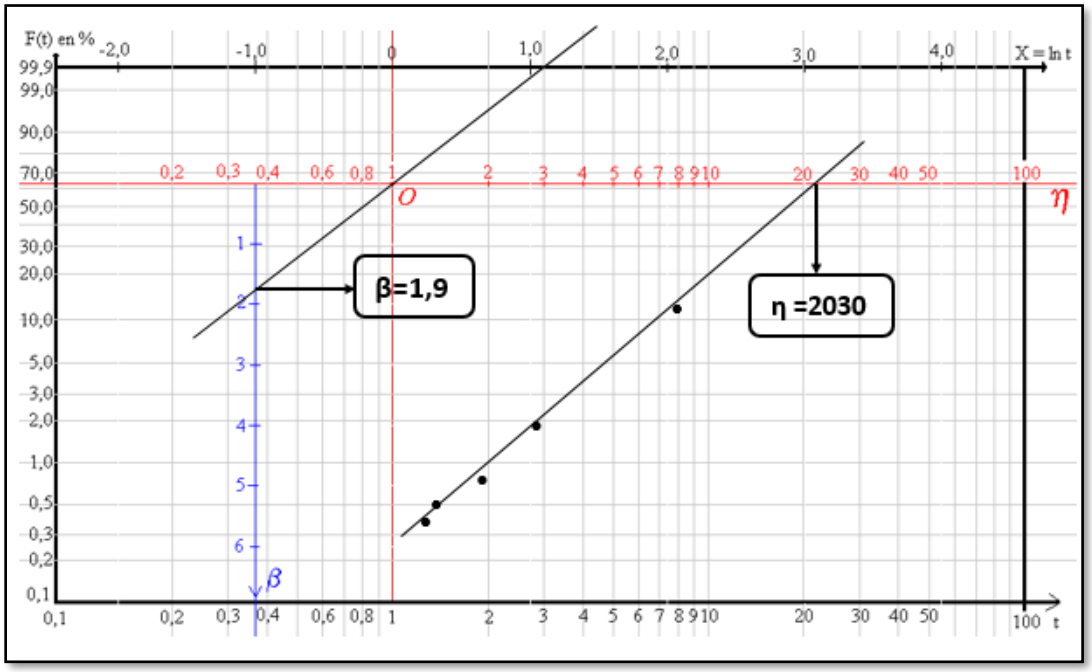
2023		
Order i	TBF	Fi
1	149	0,038
2	175	0,092
3	179	0,146
4	187	0,201
5	195	0,255
6	198	0,309
7	200	0,364
8	230	0,418
9	245	0,472
10	269	0,527
11	280	0,581
12	291	0,635
13	295	0,692
14	320	0,744
15	350	0,798
16	380	0,853
17	400	0,907
18	440	0,961

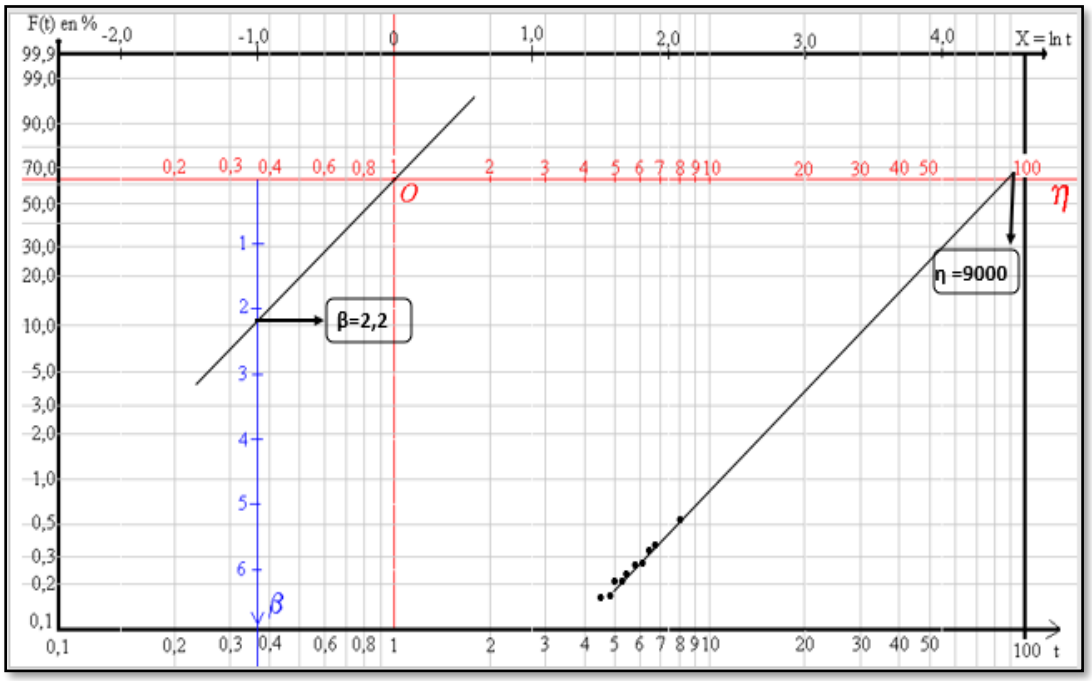
Tableau 15 : TBF Caterpillar 349D2L (2024)

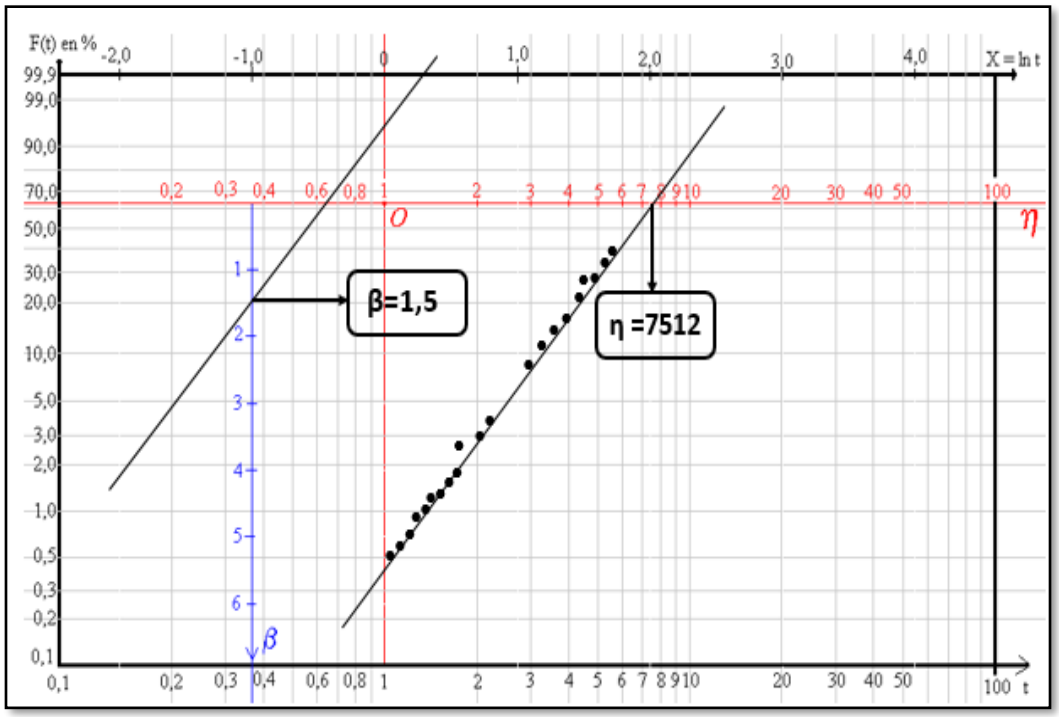
2024		
Order i	TBF	Fi
1	40	0,048
2	50	0,118
3	57	0,187
4	60	0,256
5	68	0,326
6	71	0,395
7	82	0,465
8	99	0,534
9	100	0,604
10	110	0,673
11	115	0,743
12	125	0,812
13	140	0,881
14	150	0,951

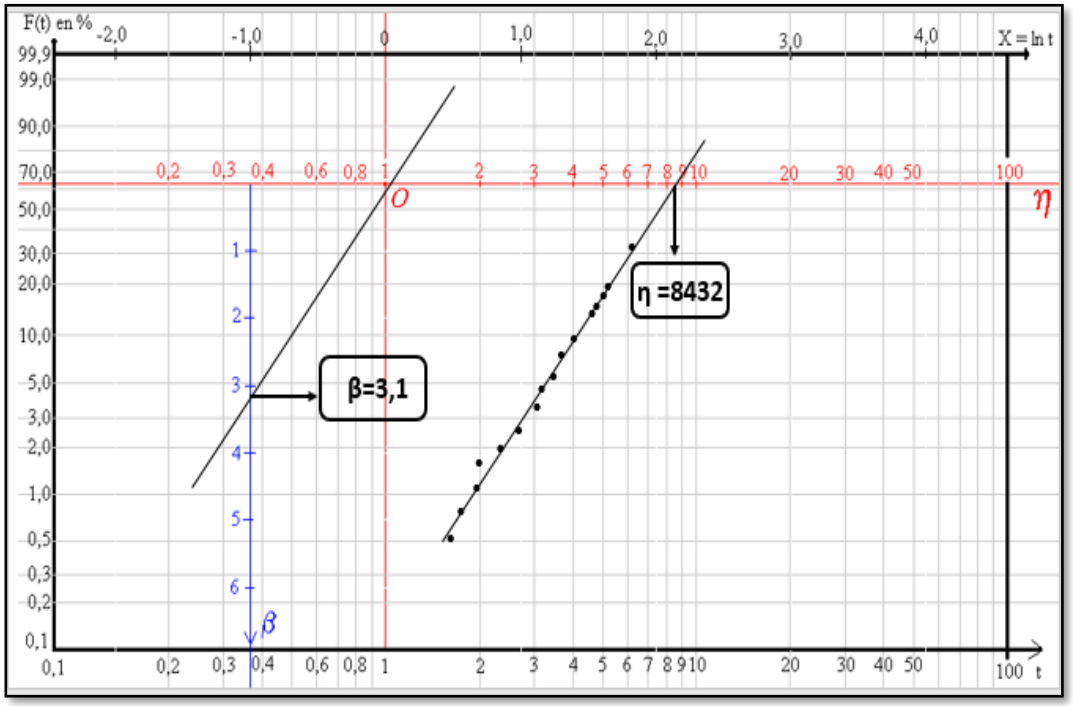
ANNEXE FIGURES

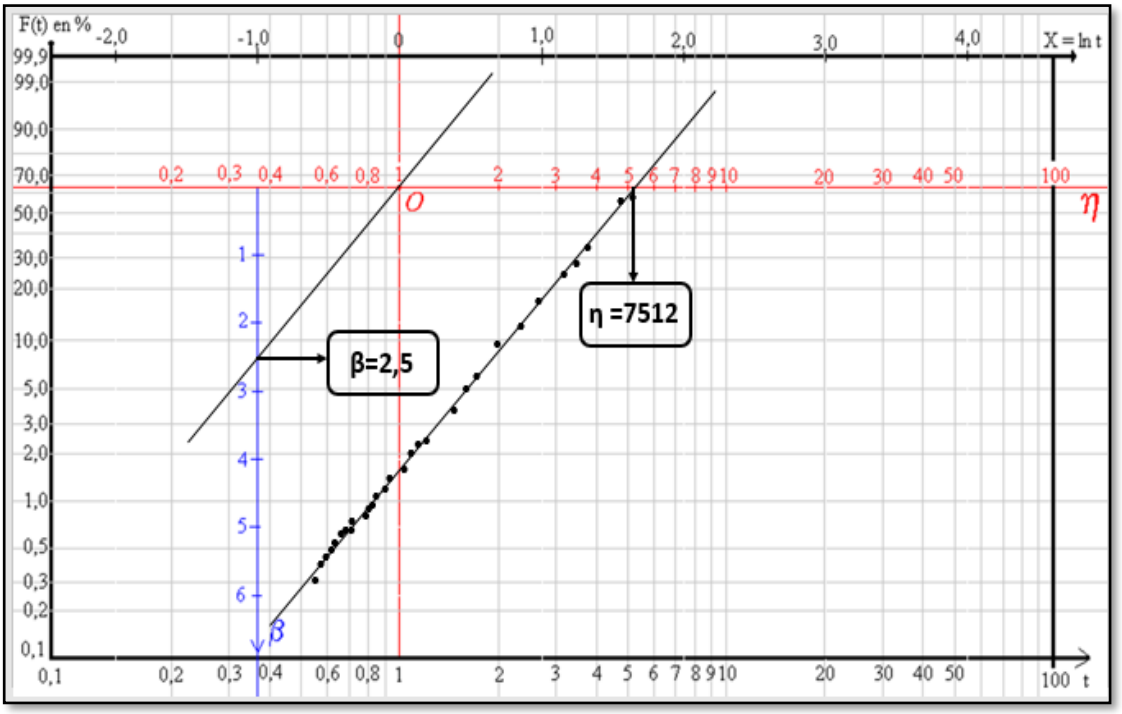
Annexe 01 : Liebherr R 9100



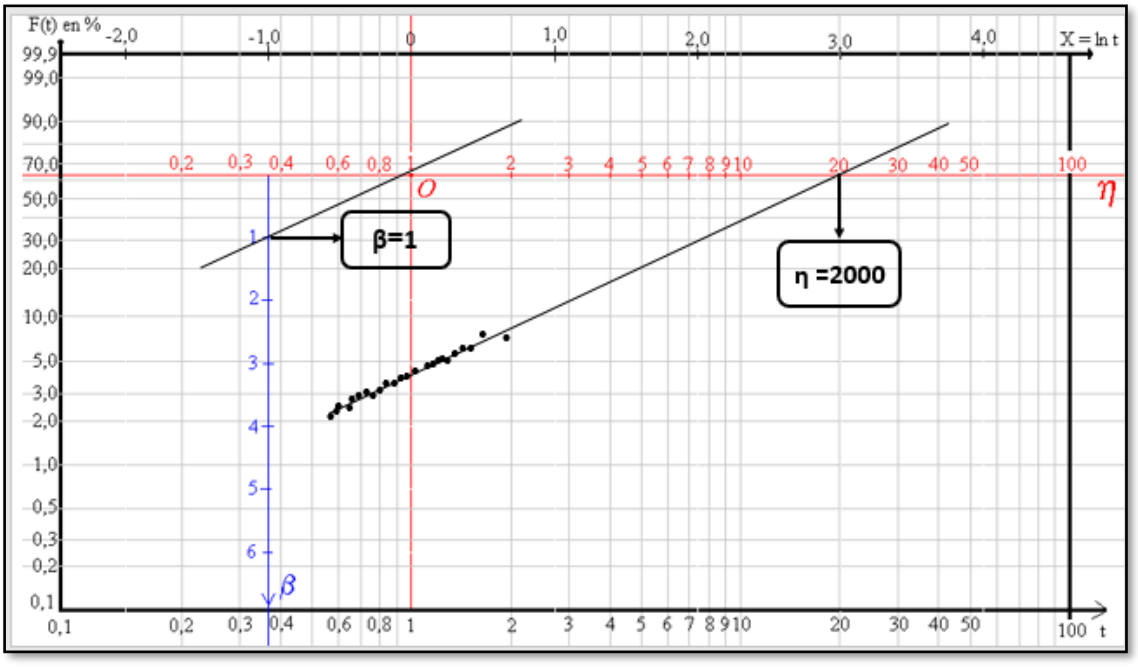


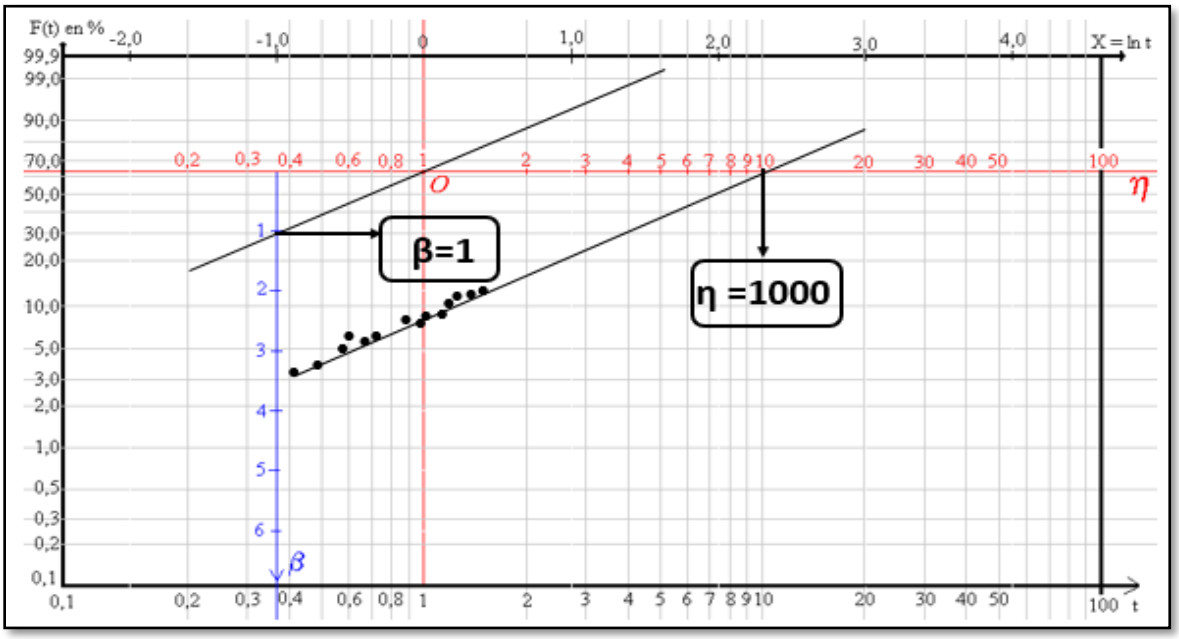

F(t) en %
X = ln t
β=1,5
η =7512
O
η
β
t

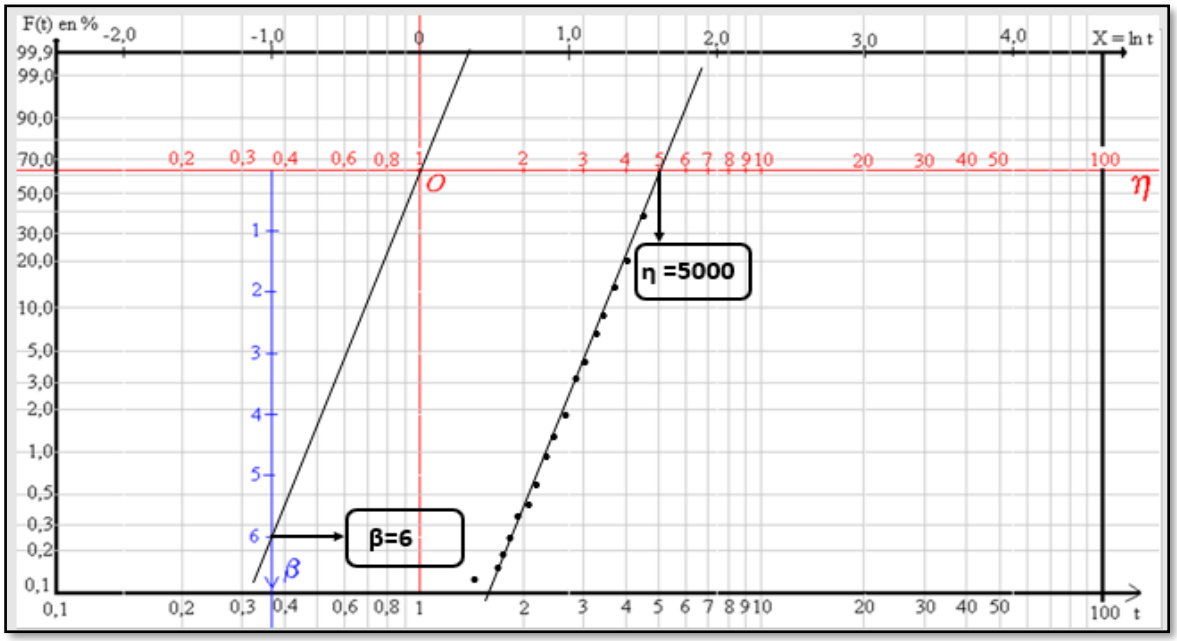

F(t) en %
X = ln t
β=3,1
η =8432
O
η
β
t



Annexe 02 : Caterpillar 349D2L




F(t) en %
X = ln t
β=1
η =1000
O
η
β
t


F(t) en %
X = ln t
β=6
η =5000
O
η
β
t