

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA  
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT DE GENIE ÉLECTRIQUE



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER**

**Spécialité : Maintenance Industrielle**

---

**Titre : Évolution du rendement d'un système  
électromécanique par la réduction de  
probabilité de défaillance**

---

Proposé et dirigé par :

**Dr. Zine GHEMARI**

Présenté par :

**Nacer BELHOUT**

**Ali BENGUESMIA**

Soutenues devant le jury composé de :

Président : **Dr. Mabrouk DEFDAF**

Rapporteur : **Dr. Zine GHEMARI**

Examineur : **Dr. Samir MABRAK**

N° d'ordre :

**Année Universitaire 2018–2019**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ

***A la mémoire de nos parents,  
A nos frères et nos sœurs.***

## *Remerciements*

Nous Nos vifs remerciements vont d'emblée à Dieu tout puissant qui nous a doté d'une grande volonté et d'un savoir adéquat pour mener à bien cet humble travail.

Nous adressons nos remerciements tout particulièrement :

À nos chers parents, notre fierté et bien sur la source de notre réussite car ils se sont sacrifiés pour nous fournir une atmosphère de travail disposant de toutes les meilleures conditions, sans eux rien n'aurait pu être facile, que dieux nous les garde et les protège afin que l'on puisse leurs rendre un peu du beaucoup qu'ils nous ont procuré.

La rédaction de cette mémoire a été l'un des défis académiques les plus importants que nous ayons jamais rencontré dans notre poursuite universitaire. Néanmoins, sans le soutien, les conseils, les commentaires et les encouragements des personnes suivantes, cette thèse n'aurait jamais été achevée. C'est donc à eux que nous devons notre plus profonde reconnaissance.

À notre Encadreur Dr. Zine GHEMARI.

À notre enseignant Dr. Boudjlelle Bilal

Nos remerciements et nos appréciations sont aussi adressés à Dr. Mabrouk DEFDAF pour avoir accepté de présider ce jury, Dr. Samir MABRAK qui a accepté d'examiner notre modeste travail.

Au personnel de l'ALGAL Plus de M'sila plus précisément Dr. Youcef .BENJOUDI pour son aide et Dr. Mustapha HADJI et Mr. Azouz ABDERAZAK ainsi que Mr. Lakhder DAHDOUH à qui nous exprimons notre profonde reconnaissance pour leurs disponibilité et leurs précieuse aide qui nous a permis d'effectuer notre stage dans un environnement de travail d'exception. À nos très chers amis (es) et à toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de ce travail.

Enfin, nous tenons à remercier toute la promotion 2018-2019 master 2 Maintenance Industrielle.

Ainsi que tous nos enseignants et les membres du département génie électrique de Université Mohamed Boudiaf, M'sila.

## ملخص

في المجال الصناعي يجب على الشركات وضع سياسة صناعية فعالة من أجل ضمان مستوى الأمثل للإنتاج. الهدف من هذه المذكرة هو دمج طرق الصيانة في نظام الإنتاج المختار لتحسين الاعتمادية والأداء والكفاءة. لتحقيق هذا الهدف قمنا بتقييم من ناحية وقمنا بتحسين معايير سلامة التشغيل (التوفر ، قابلية الصيانة ، الموثوقية) من جهة أخرى. هذه التحسينات تمت عن طريق إقتراح توصيات لمختلف عناصر المنظومة الكهروميكانيكية الأكثر عُرضة للعطب و التي تم إستخراجها بإستعمال كل من بيان ABC و مخطط باريتو.

**الكلمات المفتاحية :** تحسينات، عطب، صيانة، مردود.

## Abstract

In the industrial sector, companies must establish an effective maintenance policy to ensure an optimal level of production. The objective of this thesis is to integrate maintenance methods on a chosen production system to improve its operational safety, performance and efficiency. To achieve this objective, we have assessed and improved the parameters of operational safety (availability, maintainability and reliability). These improvements are made by recommendations for the most deficient elements that are extracted by the ABC chart and the Pareto histogram.

**Keywords :** Improvement, Failure, Maintenance, Performance.

## Résumé

Dans le domaine industriel, les sociétés doivent établir une politique de maintenance efficace pour garantir un niveau optimal de production. L'objectif de ce mémoire est d'intégrer les méthodes de maintenance sur un système de production choisi pour améliorer sa sûreté de fonctionnement, ses performances et son rendement. Pour atteindre cet objectif, nous avons évalué d'une part et amélioré d'une autre part les paramètres de la sûreté de fonctionnement (la disponibilité, la maintenabilité et la fiabilité). Ces améliorations sont effectuées par des recommandations concernant les éléments les plus défaillants qui extraits par la courbe ABC et l'histogramme de Pareto.

**Mots clés :** Amélioration, Défaillance, Maintenance, rendement.

# Table des matières

|                                                |             |
|------------------------------------------------|-------------|
| <b>Table des matières.....</b>                 | <b>i</b>    |
| <b>Liste des Figures.....</b>                  | <b>v</b>    |
| <b>Liste des Tableaux.....</b>                 | <b>vii</b>  |
| <b>Acronymes, Sigles et Abréviations .....</b> | <b>viii</b> |
| <b>Introduction générale .....</b>             | <b>2</b>    |

## Chapitre I

|          |                                                               |    |
|----------|---------------------------------------------------------------|----|
| I.1      | Introduction.....                                             | 5  |
| I.2      | Définition de la maintenance .....                            | 5  |
| I.3      | Les deux objectifs fondamentaux de la maintenance .....       | 6  |
| I.4      | Différence entre l'entretien et la maintenance .....          | 7  |
| I.5      | Situation du service de maintenance dans une entreprise ..... | 7  |
| I.6      | Structure d'une organisation de maintenance.....              | 9  |
| I.7      | Structure des activités de l'atelier de maintenance .....     | 10 |
| I.8      | Opérations de prévention .....                                | 11 |
| I.9      | Différentes politiques de maintenance .....                   | 12 |
| I.9.1    | Maintenance préventive .....                                  | 12 |
| I.9.1.1  | Maintenance préventive systématique .....                     | 13 |
| I.9.1.2  | Maintenance préventive conditionnelle .....                   | 13 |
| I.9.1.3  | Maintenance préventive prévisionnelle.....                    | 13 |
| I.9.2    | Maintenance corrective .....                                  | 14 |
| I.9.2.1  | Maintenance corrective palliative .....                       | 14 |
| I.9.2.2  | Maintenance corrective curative .....                         | 14 |
| I.9.3    | Maintenance Améliorative .....                                | 15 |
| I.10     | Niveaux de maintenance .....                                  | 15 |
| I.10.1   | Premier niveau .....                                          | 15 |
| I.10.2   | Deuxième niveau.....                                          | 16 |
| I.10.3   | Troisième niveau.....                                         | 16 |
| I.10.4   | Quatrième niveau .....                                        | 16 |
| I.10.5   | Cinquième niveau .....                                        | 17 |
| I.10.6   | Documents nécessaires à prévoir .....                         | 17 |
| I.10.6.1 | Dossier technique .....                                       | 18 |
| I.10.6.2 | Dossier machine .....                                         | 18 |
| I.10.6.3 | Dossier relatif à son cycle de fonctionnement .....           | 18 |
| I.10.6.4 | Dossier relatif à la partie mécanique .....                   | 18 |
| I.10.6.5 | Sous-dossier dit «fichier historique ».....                   | 19 |

## Chapitre II

|          |                             |    |
|----------|-----------------------------|----|
| I.11     | Conclusion .....            | 19 |
| II.1     | Introduction.....           | 22 |
| II.1.1   | Fiabilité des systèmes..... | 22 |
| II.1.1.1 | Systèmes en série .....     | 22 |
| II.1.2   | Systèmes en parallèle ..... | 23 |

|          |                                                                                       |    |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.1.3   | Systèmes k parmi n .....                                                              | 24 |
| II.2     | Redondances .....                                                                     | 24 |
| II.3     | Les analyses FMD des systèmes réparables .....                                        | 24 |
| II.3.1   | Définitions (CEN).....                                                                | 25 |
| II.3.1.1 | Les différentes sortes de fiabilité : .....                                           | 25 |
| II.3.2   | Analyses FMD : indicateurs opérationnels .....                                        | 26 |
| II.4     | Définitions relatives aux défaillances (projet CEN) .....                             | 27 |
| II.4.1   | Les analyses qualitatives de défaillances et leurs enjeux .....                       | 28 |
| II.4.2   | La durée de vie d'un équipement : la courbe en baignoire .....                        | 29 |
| II.4.3   | Méthodologie de la recherche des lois de probabilité $R(t)$ et $M(t)$ et $D(t)$ ..... | 30 |
| II.4.3.1 | Nature des échantillons de valeurs .....                                              | 30 |
| II.4.3.2 | Les deux méthodes de traitement d'échantillon de TBF .....                            | 30 |
| II.5     | Les analyses quantitatives de défaillances .....                                      | 31 |
| II.5.1   | Le diagramme d'Ishikawa des 5 M .....                                                 | 31 |
| II.5.2   | Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC).....  | 32 |
| II.6     | Principales lois de probabilité utilisées en fiabilité.....                           | 32 |
| II.6.1   | Loi exponentielle $\exp(\lambda)$ .....                                               | 33 |
| II.6.2   | Loi Gamma $G(\alpha, \beta)$ .....                                                    | 34 |
| II.6.3   | Loi log-normale $\text{Log}\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ .....                          | 35 |
| II.6.4   | Loi de Weibull $\mathcal{W}(\beta, \alpha)$ .....                                     | 36 |
| II.7     | Les tests d'ajustement .....                                                          | 37 |
| II.7.1   | Tests Kolmogorov-Smirnov .....                                                        | 37 |
| II.7.2   | Test Khi-Deux.....                                                                    | 38 |
| II.8     | Conclusion .....                                                                      | 39 |

### Chapitre III

|            |                                                          |    |
|------------|----------------------------------------------------------|----|
| III.1      | Introduction.....                                        | 41 |
| III.1.1    | Une brève introduction de l'extrusion en aluminium ..... | 41 |
| III.1.1.1  | Les origines de l'aluminium .....                        | 41 |
| III.1.1.2  | Développement d'aluminium extrudé .....                  | 41 |
| III.1.2    | Vue d'ensemble de l'usine Algal Plus (+).....            | 42 |
| III.1.2.1  | Bref historique.....                                     | 42 |
| III.1.2.2  | Les chiffres relatifs à l'entreprise .....               | 43 |
| III.1.2.3  | Chaînes de production.....                               | 43 |
| III.1.2.4  | Certains des concurrents .....                           | 43 |
| III.1.2.5  | Structure organisationnelle de l'entreprise .....        | 44 |
| III.1.2.6  | Les unités d'entreprise.....                             | 44 |
| III.1.2.7  | Département de maintenance .....                         | 47 |
| III.1.2.8  | Bureau de études et méthodes .....                       | 47 |
| III.1.2.9  | Atelier mécanique .....                                  | 47 |
| III.1.2.10 | Atelier électrique.....                                  | 48 |
| III.2      | Conclusion .....                                         | 48 |

### Chapitre IV

|          |                                                  |    |
|----------|--------------------------------------------------|----|
| IV.1     | Choix des équipements à étudier .....            | 50 |
| IV.1.1   | Introduction.....                                | 50 |
| IV.1.2   | Présentation du système choisi.....              | 51 |
| IV.1.3   | L'opération d'extrusion.....                     | 52 |
| IV.2     | Les analyses quantitatives de défaillances ..... | 53 |
| IV.2.1   | Etude Statistique .....                          | 53 |
| IV.2.1.1 | Méthodologie de travail .....                    | 53 |
| IV.3     | Diagrammes de Pareto .....                       | 53 |

|                                                                  |                                                                                                |            |
|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| IV.3.1                                                           | La méthode ABC de Pareto .....                                                                 | 54         |
| IV.4                                                             | L'analyse statistique de la presse 1600T .....                                                 | 55         |
| IV.4.1                                                           | Diagrammes de Pareto .....                                                                     | 56         |
| IV.4.1.1                                                         | Interpréter les courbes. ....                                                                  | 56         |
| IV.4.1.2                                                         | Commentaires .....                                                                             | 57         |
| IV.4.1.3                                                         | Décision .....                                                                                 | 57         |
| IV.4.2                                                           | Les cinq Equipments de la zone A.....                                                          | 57         |
| IV.4.3                                                           | Analyses FMD de la presse 1600T .....                                                          | 60         |
| IV.4.3.1                                                         | Introduction.....                                                                              | 60         |
| IV.4.3.2                                                         | Etude de la modèle de Weibull .....                                                            | 60         |
| IV.4.3.3                                                         | Méthode de rangs médians :.....                                                                | 61         |
| IV.4.3.4                                                         | Algorithme d'étude de la loi de Weibull : .....                                                | 62         |
| IV.4.3.5                                                         | Collecte de données .....                                                                      | 64         |
| IV.4.4                                                           | Modélisation paramétrique de lois de fiabilité.....                                            | 65         |
| IV.4.4.1                                                         | Evaluation des fonctions de fiabilité et du taux de défaillances des cinq<br>équipements ..... | 67         |
| IV.4.5                                                           | Probabilité de défaillance de la presse 1600T.....                                             | 70         |
| IV.4.5.1                                                         | Calcul la maintenabilité et la disponibilité des cinq équipements.....                         | 71         |
| IV.5                                                             | Les courbes des cinq équipements .....                                                         | 74         |
| IV.5.1                                                           | Cisaille à billettes à chaud.....                                                              | 74         |
| IV.5.2                                                           | Four à billettes.....                                                                          | 77         |
| IV.5.3                                                           | Tracteur de filage .....                                                                       | 80         |
| IV.5.4                                                           | Table de refroidissement.....                                                                  | 83         |
| IV.5.5                                                           | Table de chargement .....                                                                      | 86         |
| IV.6                                                             | Recommandations.....                                                                           | 89         |
| IV.7                                                             | Conclusion .....                                                                               | 91         |
| <b>Conclusion générale.....</b>                                  |                                                                                                | <b>93</b>  |
| <b>Références bibliographiques .....</b>                         |                                                                                                | <b>95</b>  |
| <b>Annexe A : Tables de calcul liée aux les équipements.....</b> |                                                                                                | <b>A-1</b> |
| <b>Annexe B.....</b>                                             |                                                                                                | <b>B-1</b> |
| B.1                                                              | Table d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov .....                                                 | B-1        |
| B.2                                                              | Introduction to EasyFit 5.6 .....                                                              | B-2        |
| <b>Annexe C.....</b>                                             |                                                                                                | <b>C-1</b> |
| C.1                                                              | Le tableau suivant représente les valeurs de A et B en fonction de $\beta$ .....               | C-1        |



## Liste des Figures

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I.1– Les deux objectifs possibles de maintenance d'un équipement. [3] .....                | 6  |
| Figure I.2– Représentation la situation du service de maintenance dans une entreprise. 8          |    |
| Figure I.3– Structure d'une organisation de maintenance.....                                      | 10 |
| Figure I.4– Structure des activités de l'atelier de maintenance.....                              | 10 |
| Figure II.1– configuration série. ....                                                            | 22 |
| Figure II.2– Configuration parallèle. ....                                                        | 23 |
| Figure II.3– Disponibilité et trois paramètres. ....                                              | 26 |
| Figure II.4– Les durées caractéristiques de FMD. [3].....                                         | 27 |
| Figure II.5– Les époques de la vie d'un système électromécanique. [3] .....                       | 29 |
| Figure II.6– Les Deux méthodes de traitement. [3] .....                                           | 30 |
| Figure II.7– Recherche des causes potentielles d'une défaillance. [3] .....                       | 31 |
| Figure III.1– l'interface de l'Enterprise ALGAL+.....                                             | 43 |
| Figure III.2– La structure organisationnelle de l'Entreprise. ....                                | 44 |
| Figure III.3– Représentation la situation du service de maintenance dans une entreprise.<br>..... | 45 |
| Figure III.4– unité d'extrusion. ....                                                             | 45 |
| Figure III.5– l'opération de correction de filières.....                                          | 46 |
| Figure III.6– l'opération d'Anodisation. ....                                                     | 46 |
| Figure III.7– Divisions du département Maintenance.....                                           | 47 |
| Figure IV.1– Extrusion presse (ligne 1600 tonne).....                                             | 51 |
| Figure IV.2– Cycle d'extrusion d'aluminium. ....                                                  | 52 |
| Figure IV.4– Courbe ABC, Histogramme de Pareto.....                                               | 56 |
| Figure IV.4– Les cinq équipements .....                                                           | 59 |
| Figure IV.5– La Fiabilité de cisaille à billettes à chaud.....                                    | 74 |
| Figure IV.6– La Fonction de répartition de cisaille à billettes à chaud .....                     | 74 |
| Figure IV.7– La maintenabilité de cisaille à billettes à chaud .....                              | 75 |
| Figure IV.8– La disponibilité de cisaille à billettes à chaud.....                                | 75 |
| Figure IV.9– La densité de probabilité de cisaille à billettes à chaud.....                       | 76 |
| Figure IV.10– Le Taux de défaillance de cisaille à billettes à chaud.....                         | 76 |
| Figure IV.11– La fiabilité de four à billettes .....                                              | 77 |
| Figure IV.12– La fonction de répartition de four à billettes.....                                 | 77 |
| Figure IV.13– La Maintenabilité de four à billettes .....                                         | 78 |
| Figure IV.14– La Disponibilité de four à billettes.....                                           | 78 |
| Figure IV.15– La Densité de probabilité de four à billettes .....                                 | 79 |
| Figure IV.16– Le Taux de défaillance de four à billettes .....                                    | 79 |
| Figure IV.17– La Fiabilité de tracteur de filage.....                                             | 80 |
| Figure IV.18– La Fonction de répartition de tracteur de filage .....                              | 80 |
| Figure IV.19– La Maintenabilité de tracteur de filage.....                                        | 81 |

---

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure IV.20– La Disponibilité de tracteur de filage .....                 | 81  |
| Figure IV.21–La Densité de probabilité de tracteur de filage .....         | 82  |
| Figure IV.22–Le Taux de défaillance de tracteur de filage.....             | 82  |
| ..... Figure IV.23– La Fiabilité de table de refroidissement               |     |
| .....                                                                      | 83  |
| Figure IV.24– La Fonction de répartition de table de refroidissement ..... | 83  |
| Figure IV.25– La Maintenabilité de table de refroidissement .....          | 84  |
| Figure IV.26– La Disponibilité de table de refroidissement .....           | 84  |
| Figure IV.27– La Densité de probabilité de table de refroidissement .....  | 85  |
| Figure IV.28– Le Taux de défaillance de table de refroidissement .....     | 85  |
| Figure IV.29– La Fiabilité de table de chargement .....                    | 86  |
| Figure IV.30– La Fonction de répartition de table de chargement.....       | 86  |
| Figure IV.31– La Maintenabilité de table de chargement .....               | 87  |
| Figure IV.32– La Disponibilité de table de chargement.....                 | 87  |
| Figure IV.33– La Densité de probabilité de table de chargement .....       | 88  |
| Figure IV.34– Le Taux de défaillance de table de chargement .....          | 88  |
| Figure IV.35 - Déformation de la structure de la Tracteur .....            | 89  |
| Figure IV.36- Les trois solutions.....                                     | 90  |
| Figure V.6–Interface de logiciel EasyFit.....                              | B-2 |

## Liste des Tableaux

|                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Table IV.1 – L’analyse quantitative des défaillances critère de durée d’intervention.....                                      | 55  |
| Table IV.2 — Historique des pannes des 5 équipements. ....                                                                     | 65  |
| Table IV.3 — Nomenclature des 5 équipements. ....                                                                              | 66  |
| Table IV.4 — Résultats du test pour les 5 équipements. ....                                                                    | 67  |
| Table IV.5 – le calcul de différents paramètres ( $R(t_i)$ , $F(t_i)$ , $F$ théorie ( $t_i$ ), $f(t_i)$ ) pour ( $E_1$ ). .... | 68  |
| Table IV.6 — Le $\lambda(t)$ , la $R(t)$ et la $F(t)$ des 5 équipements. ....                                                  | 70  |
| Table IV.7 — $\mu(t)$ , $M(t)$ et $D(t)$ de $E_1$ . ....                                                                       | 72  |
| Table IV.8 — $\lambda(t)$ , $R(t)$ et $F(t)$ des 5 équipements. ....                                                           | 73  |
| Table IV.10 – le calcul de différents paramètres ( $R(t_i)$ , $F(t_i)$ , $F$ théorie ( $t_i$ ), $f(t_i)$ ) pour $E_4$ . ....   | A-1 |
| Table IV.10 – le calcul de différents paramètres ( $R(t_i)$ , $F(t_i)$ , $F$ théorie ( $t_i$ ), $f(t_i)$ ) pour $E_2$ . ....   | A-3 |
| Table IV.11 – le calcul de différents paramètres ( $R(t_i)$ , $F(t_i)$ , $F$ théorie ( $t_i$ ), $f(t_i)$ ) pour $E_5$ . ....   | A-6 |
| Table IV.12 – le calcul de différents paramètres ( $R(t_i)$ , $F(t_i)$ , $F$ théorie ( $t_i$ ), $f(t_i)$ ) pour $E_3$ . ....   | A-7 |
| Table IV.13 – $\mu(t)$ , $M(t)$ et $D(t)$ $E_4$ . ....                                                                         | A-1 |
| Table IV.14 – $\mu(t)$ , $M(t)$ et $D(t)$ $E_2$ . ....                                                                         | A-1 |
| Table IV.15 – $\mu(t)$ , $M(t)$ et $D(t)$ $E_5$ . ....                                                                         | A-3 |
| Table IV.16 – $\mu(t)$ , $M(t)$ et $D(t)$ $E_3$ . ....                                                                         | A-4 |

## Acronymes, Sigles et Abréviations

|              |                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ABC :        | méthode de Pareto (priorité d'actions)                                                                                                                                                                                                  |
| AFNOR :      | Association française de normalisation                                                                                                                                                                                                  |
| AMDEC :      | analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité                                                                                                                                                                 |
| BT :         | bon de travail                                                                                                                                                                                                                          |
| CEN :        | Comité européen de normalisation                                                                                                                                                                                                        |
| DTP :        | <i>down time percentage</i> (pourcentage de temps d'indisponibilité)                                                                                                                                                                    |
| FCF :        | <i>Failure Cumulative Frequency</i> (Fréquence cumule de panne)                                                                                                                                                                         |
| FMD :        | fiabilité, maintenabilité, disponibilité                                                                                                                                                                                                |
| ISHIKAWA :   | Le Diagramme de causes et effets, ou diagramme en arêtes de poisson ou encore 5M (Matière, Matériel, Méthode, Main-d'œuvre, Milieu), est un outil développé par <b>Kaoru Ishikawa</b> en 1962 et servant dans la gestion de la qualité. |
| MTBF :       | <i>mean time between failure</i> (TBF : durée de bon fonctionnement) temps moyen entre deux défaillances successives                                                                                                                    |
| MTTR :       | <i>mean time to repair</i> (TTR : temps technique de réparation)                                                                                                                                                                        |
| MTTF :       | ( <i>mean time to [first] failure</i> ) : temps moyen avant-première défaillance                                                                                                                                                        |
| MDT ou MTI : | ( <i>mean down time</i> ) : temps moyen d'indisponibilité ou temps moyen d'arrêt propre ; (DT :) temps moyen d'indisponibilité                                                                                                          |
| MUT :        | ( <i>mean up time</i> ) : temps moyen de disponibilité                                                                                                                                                                                  |
| TA :         | durée d'arrêt                                                                                                                                                                                                                           |
| PARETO :     | Méthode graphique, son nom doit à l'économiste italien Vilfredo Pareto                                                                                                                                                                  |
| R(t)         | Fiabilité                                                                                                                                                                                                                               |
| F(t)         | Probabilité de défaillance                                                                                                                                                                                                              |
| M(t)         | <i>Maintenabilité</i>                                                                                                                                                                                                                   |

|              |                            |
|--------------|----------------------------|
| $D(t)$       | <i>Disponibilité</i>       |
| $\lambda(t)$ | <i>Taux de défaillance</i> |
| $\mu(t)$     | <i>taux de réparation</i>  |

## **Introduction générale**

## Introduction générale

Le rôle de service de maintenance est de choisir une politique de maintenance adéquate en prenant en considération l'aspect technique, économique et financier, des différentes méthodes en vue d'optimiser la disponibilité des matériels. Pour cela l'ingénieur utilise des méthodes et des outils mathématiques afin de calculer et d'évaluer les critères de maintenance (Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité) qui permet de prendre des décisions.

La fonction de l'entretien consiste à s'assurer que les installations et les équipements sont disponibles dans des conditions satisfaisantes pour pouvoir fonctionner en cas de besoin. La détermination de ce qui constitue une condition satisfaisante pour la machine dépendra en grande partie de la situation d'exploitation, du type d'industrie, des exigences du procédé et des objectifs commerciaux. Dans tous les cas, cependant, la performance de la fonction de maintenance peut être jugée par l'état de la machine, que les facteurs suivants indiqueront [1].

Généralement, les facteurs qui doivent connaître sur le système choisi sont les suivants :

- Performance : c'est la capacité de la machine à exécuter ses fonctions.
- Temps d'arrêt : le temps d'arrêt doit être réduit comparant avec le temps de bon fonctionnement de la machine.
- Efficacité : le niveau d'efficacité de la machine doit être acceptable.
- Sécurité : la machine doit être sûre pour le personnel.
- Impact environnemental : le fonctionnement de la machine doit être respectueux de l'environnement et des autres équipements.
- Coût : il est prévu d'avoir un coût de maintenance à un niveau acceptable.

L'objectif de l'entretien est de s'assurer que les performances de la machine sont satisfaisantes, compte tenu des facteurs ci-dessus.

Nous allons faire un stage pratique dans une entreprise pour savoir leur constitution et leur fonctionnement, ce stage nous permettra de choisir un système électromécanique important, ensuite on va extraire l'historique de panne de ce système. Cette historique facilitera d'évaluer la fiabilité, la maintenabilité et disponibilité

Notre mémoire a pour but de maîtriser et d'améliorer les performances d'un système électromécanique choisi à travers un stage au sein d'une entreprise par la réduction de la probabilité de défaillance, l'augmentation de fiabilité et minimisation de besoin de maintenance ainsi que l'amélioration de la production.

### **Question de recherche**

Pour mieux comprendre le défi, l'objectif est divisé en trois questions de recherche. Par ces questions, nous pouvons trouver des solutions plus robustes.

1. Quelles variables doivent être mesurées et analysées et quels composants doivent être sélectionnés dans le système ?
2. Quel est le meilleur modèle statistique à utiliser pour traiter notre échantillon ?
3. Comment améliorer les performances du système électromécanique choisi ?

### **Aperçu sur le mémoire**

Ce mémoire est composé par 4 chapitres organisés comme suit :

- Le premier chapitre présentera des généralités sur la maintenance ainsi que les différents types de maintenance d'une part et exposera les niveaux de maintenance et les dossiers techniques d'une autre part.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la fiabilité d'un système électromécanique et ses lois de calcul.
- Le troisième chapitre est une description de l'entreprise que nous allons faire notre stage et la présentation du système choisi.
- Le quatrième chapitre est la partie spéciale de notre mémoire car nous allons étudier l'historique de panne du système choisi, et ensuite on va calculer la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité à l'aide d'un logiciel de simulation pour connaître l'état du système choisi et l'interprétation des résultats obtenu.
- Finalement une conclusion générale montra tous les travaux de ce mémoire et les perspectives.

# **Chapitre I. Généralités**

## I.1 Introduction

L'évolution et la complexité des systèmes de production ainsi que le besoin de produire vite et bien, ont obligé les industriels à structurer et à organiser les « ateliers d'entretien »; ils ont surtout créé de nouveaux concepts d'organisation et de nouvelles manières d'intervenir sur des structures de production concernant les produits manufacturés.

Aujourd'hui, **l'entretien** a laissé la place à la **maintenance**. Ce changement ne réside pas uniquement dans un changement de dénomination, mais aussi dans un bouleversement complet de la manière de faire et de concevoir ce qui s'appelait « entretien » et que l'on appelle aujourd'hui « maintenance ».

Il y a quelques dizaines d'années, les ateliers de production ne disposaient d'aucune structure de maintenance. L'entretien des machines ou des unités de production se faisait par des personnes, spécialisées ou non, sans logistique établie et surtout définie.

**La production intensive, la complexité des systèmes et surtout la rentabilité**, ont poussé les industriels à créer un domaine et une structure dans l'entreprise appelée : « service maintenance ». Ce service structuré comporte différents corps de métiers comme des électriciens, des mécaniciens, des électroniciens, des automaticiens. Ces spécialistes interviennent chacun dans leur domaine respectif, mais en respectant une coordination dans les tâches à effectuer. [2]

Différentes tâches sont attribuées à ce service, en particulier :

- l'entretien du matériel de production;
- la remise en état du matériel en situation de dysfonctionnement;
- la remise à neuf du matériel (rénovation);
- la gestion et l'étude des coûts d'intervention;
- l'organisation et la planification judicieuse des opérations de maintenance;
- le suivi informatique de l'évolution dans le temps du matériel (fichier historique).

## I.2 Définition de la maintenance

### 1. Définition selon AFNOR X 60-000 (mai 2002)

La maintenance est l'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. [3]

### I.3 Les deux objectifs fondamentaux de la maintenance

Les deux objectifs [3] majeurs de maintien d'un site de production :

- **Premier objectif** : à dominante économique : réduire les dépenses et à travers elles, le budget du service ;
- **Deuxième objectif** : à dominante opérationnelle : améliorer la disponibilité du système productif et à travers elle, la productivité.

Le graphe « économique » de la Figure I.1 illustre chacun des deux objectifs possibles, ainsi que leur incompatibilité de principe, sinon de fait.

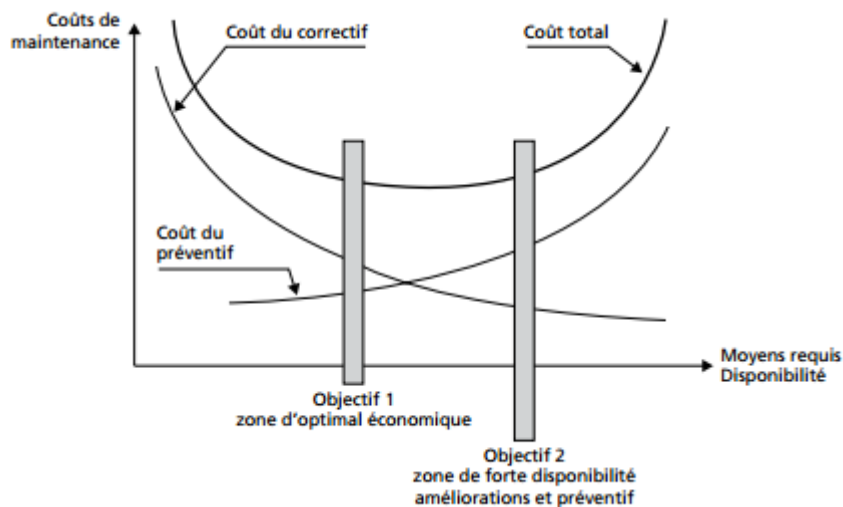


Figure I.1– Les deux objectifs possibles de maintenance d'un équipement. [3]

« Réduire les dépenses » de maintenance consiste à optimiser les coûts directs des moyens mis en œuvre pour maintenir une installation, c'est-à-dire choisir le niveau de préventif qui optimise le coût total. Mais le coût total direct n'intègre pas les coûts des conséquences des défaillances qui justifient souvent l'objectif « plus de disponibilité », donc plus de préventif et d'amélioration. Cette performance ne s'obtient malheureusement pas au coût direct minimal.[2]

## I.4 Différence entre l'entretien et la maintenance

**Entretien** : ce terme désigne les opérations ou les interventions à effectuer sur un matériel de production afin de le conserver en parfait état de produire. Les opérations

Correspondantes, souvent ordonnées par le constructeur, peuvent prendre la forme - de vidange (huile de lubrification) :

- de graissage (paliers de guidage) ;
- de changement de courroies. etc.

**Maintenance** : la maintenance permet d'organiser, prévoir, planifier et gérer les opérations d'entretien. La maintenance permet donc de conserver un bien dans son état maximal de production. Aux activités techniques effectuées par des spécialistes viennent se greffer d'autres responsabilités comme :

- l'organisation d'une structure de maintenance préventive;
- le suivi des coûts;
- l'analyse des pannes ainsi que le compte rendu des interventions de maintenance;
- le suivi informatique du vieillissement du matériel;
- l'établissement d'un fichier historique du suivi de maintenance par secteur et par machine;
- la gestion des stocks de pièces détachées;
- les activités de conseil (AMDEC...).[2]

## I.5 Situation du service de maintenance dans une entreprise

La finalité d'une entreprise est double :

- *de point de vue économique* : elle investit des capitaux, d'état ou privés, afin de rechercher un profit maximal dans la production des biens ou la prestation de services,

- *de point de vue social* : elle facilite l'accession de couches sociales de plus en plus larges à plus de sécurité, de bien-être, d'épanouissement individuel et collectif, Pour satisfaire ce double objectif une entreprise est un système, c'est à dire un tout organisé d'un ensemble de sous-systèmes en inter-relation (figure ci-dessous). ..).[2]

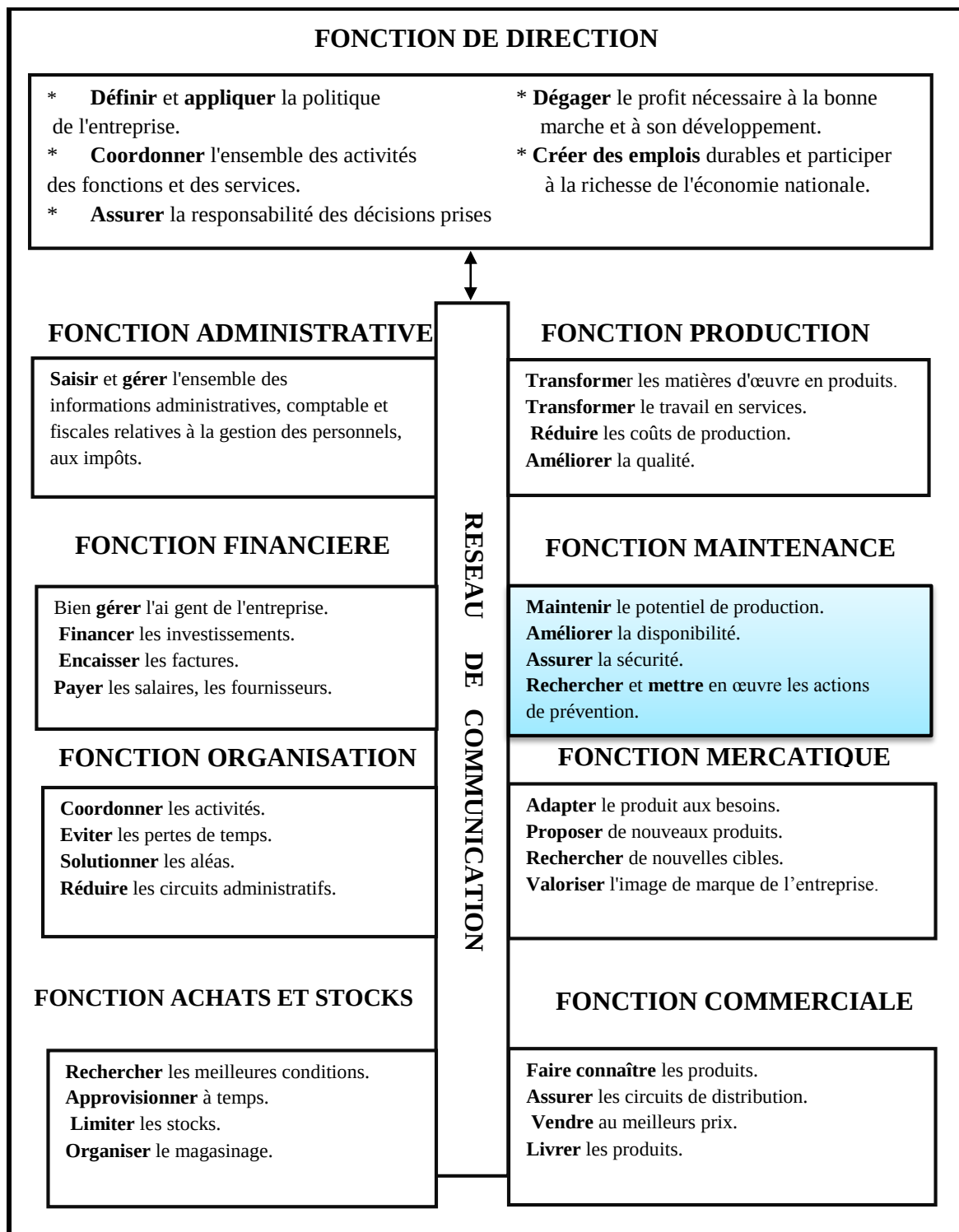


Figure I.2– Représentation la situation du service de maintenance dans une entreprise.

## I.6 Structure d'une organisation de maintenance

Gardien de l'outil de production, le service maintenance comporte une structure parfaitement organisée qui permet d'optimiser au maximum la production et donc d'en réduire les coûts. L'organigramme (lui suit représente une structure d'une organisation type d'un service de maintenance.

Ce schéma représente une structure classique d'une "logistique" de maintenance. La taille et l'organisation de celle-ci dépendent de l'importance du secteur d'activité. Les corps de métiers et le nombre d'intervenants dépendent également de ce facteur. "Logistique" : organisation, structure. [2]

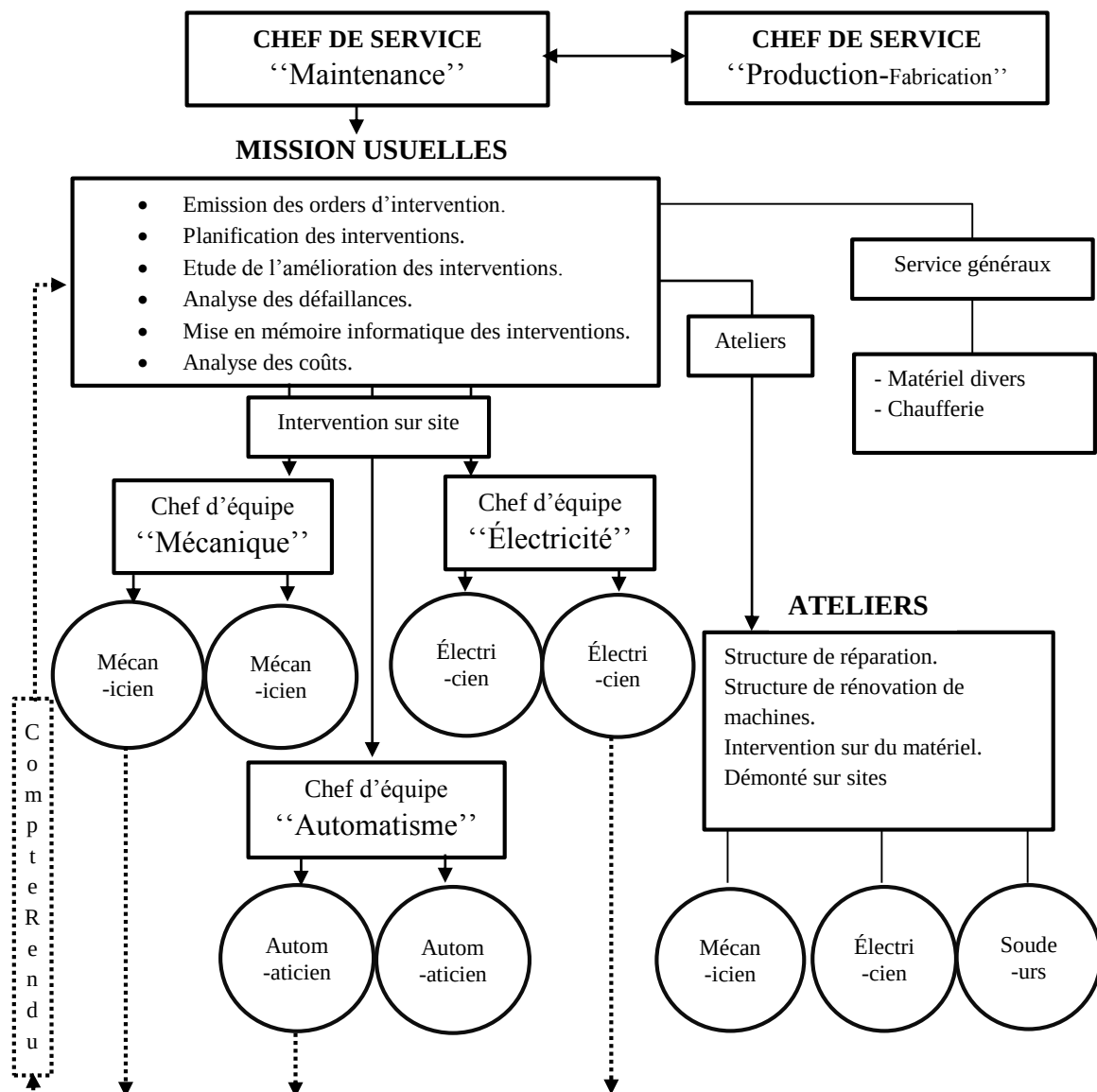


Figure I.3– Structure d'une organisation de maintenance.

## I.7 Structure des activités de l'atelier de maintenance

Le schéma ci-dessous donne un aspect général de cette structure.

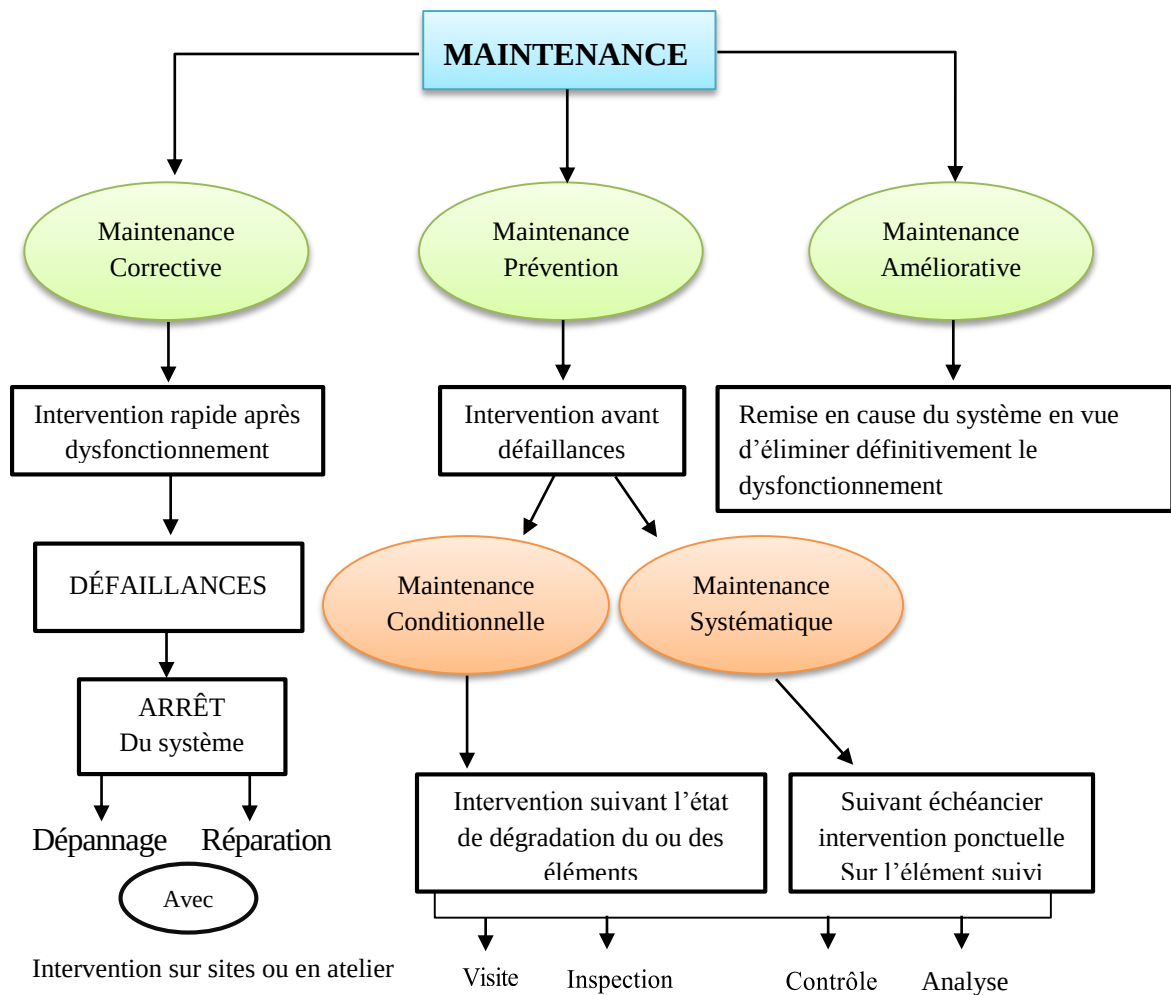


Figure I.4– Structure des activités de l'atelier de maintenance.

Suivant les interventions de maintenance à effectuer, la logique et la méthode de travail qui permettent de garder le système en état de fonctionnement optimum sont différentes.

Deux types d'événements sont possibles :

- **L'intervention est prévue et planifiée**

Dans ce cas, l'intervention est une opération de **maintenance préventive**. L'arrêt machine intervient quand celui-ci ne porte pas à conséquence sur la production. Les interventions peuvent prendre deux aspects différents :

- le changement systématique des éléments ou pièces mécaniques prévus. La maintenance est dite « systématique »

- le changement en fonction de l'état d'usure des éléments mécaniques. La maintenance est dite « conditionnelle »

- **L'intervention est imprévue et provient d'un incident (technique)**

L'intervention est alors une opération de maintenance corrective. L'arrêt machine n'a pas été prévu et a presque toujours des conséquences sur la production. Les interventions doivent être rapides et ne sont pas toujours définitives.

Il peut se produire dans un premier temps, pour remettre rapidement le système en fonctionnement, une opération dite « de dépannage » qui ne sera pas définitive. Elle sera suivie, le plus rapidement possible d'une réparation qui elle sera définitive.

### **Remarques**

Dans le cas d'une intervention de maintenance corrective, si les éléments défectueux sont disponibles, il est alors possible d'effectuer une opération dite « de réparation ». Dans le cas contraire, il faut procéder le plus vite possible à un approvisionnement des pièces manquantes. Suivant le degré d'urgence, le technicien procède à une intervention provisoire afin de remettre le système en service en respectant, toutefois, les consignes de sécurité.

Dans tous les cas, chaque intervention fait l'objet d'un compte rendu d'intervention, suivi d'une mise à jour des fichiers historiques. [2]

## **I.8 Opérations de prévention**

Les opérations relatives à la prévention peuvent être regroupées en trois grandes familles :

- **La visite** : c'est une opération de surveillance, se situant dans le cadre d'actions de maintenance préventive. Elle peut consister en un examen détaillé et approfondi d'une partie ou de l'ensemble du système suivi :

- **Le contrôle** : cette opération a pour objectif de vérifier des critères ou des données définis. Elle a pour base des références de vérification parfaitement établies ;

• **L'inspection** : c'est l'examen attentif exécuté dans un but de surveillance. Au cours d'une inspection, il est possible de suivre l'évolution, sans intervenir, d'un défaut connu et évoluant dans le temps. Les trois opérations de surveillance (visite, contrôle et inspection) se situent dans le cadre d'une structure de maintenance préventive. Elles peuvent par la suite, et suivant l'évolution du ou des défauts constatés, suivis et enregistrés, donner lieu à des opérations de maintenance corrective.

Cette méthode de suivi évite souvent des arrêts accidentels de chaînes de production. Cette façon de concevoir l'entretien des biens de production, permet de planifier à des moments choisis, les interventions correctives de maintenance.

## I.9 Différentes politiques de maintenance

Le choix d'une méthode de maintenance traduit la politique de maintenance de l'entreprise qui a pris en compte certains **objectifs** tels que :

- réduction des périodes d'indisponibilité des matériels ;
- réduction des coûts de maintenance ;
- amélioration de la qualité des produits ;
- assurer la plus grande sécurité possible dans l'exploitation des matériels,...

### I.9.1 Maintenance préventive

Maintenance préventive : « Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinés à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien. [2]

Maintenance ayant pour **objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu**. Autrement dit, la maintenance préventive permet de réduire les risques et probabilités de dysfonctionnement des systèmes de production.

La maintenance préventive peut être :

- systématique ;
- conditionnelle ;
- prévisionnelle.

### **I.9.1.1 Maintenance préventive systématique**

.La maintenance préventive systématique permet d'effectuer des opérations de maintenance, afin d'éliminer ou de diminuer les risques de dysfonctionnement des systèmes de production. Elle s'effectue suivant un échéancier prévu et établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage du bien. Cette unité d'usage caractérise l'exploitation du bien.

*Exemples :*

- le km parcouru pour une locomotive ;
- la tonne produite pour un haut-fourneau ;
- la palette conditionnée pour une empaqueteuse.

Cette méthode de maintenance s'applique à des équipements :

- soumis à une réglementation sécuritaire : ponts roulants, matériels d'incendie, installations sous pression,...
- présentant des coûts de défaillance très élevés : système avec processus de production continu, lignes de fabrication automatisées,...
- pour lesquels une défaillance peut entraîner des accidents graves : matériels de transport en commun des personnes, appareils et constituants utilisés dans l'énergie nucléaire,...

### **I.9.1.2 Maintenance préventive conditionnelle**

La maintenance préventive conditionnelle est subordonnée au franchissement d'un seuil prédéterminé significatif de l'état de dégradation du bien. Le franchissement du seuil peut être mis en évidence par l'information donnée par un capteur ou par tout autre moyen.

*Exemples*

*Sur une presse hydraulique le déclenchement d'un indicateur de colmatage entraîne le remplacement ou nettoyage du filtre encrassé*

### **I.9.1.3 Maintenance préventive prévisionnelle**

La maintenance préventive prévisionnelle est subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de dégradation du bien, permettant, grâce à une surveillance très précise, de suivre l'évolution d'un défaut ou d'une usure et donc planifier une

intervention avant défaillance totale ou partielle. Elle est encore appelée maintenance prédictive, mais ce terme ne pas normalisé.

*Exemples :*

- *La mesure périodique du niveau vibratoire d'une machine permet de programmer des activités de maintenance lorsque ce niveau augmente puis dépasse une valeur prédéterminée,*
- *L'intensité à vide, absorbée par un transformateur de puissance, traduit l'état de l'isolement diélectrique des enroulements et à partir d'une valeur donnée déclenche la révision générale du transformateur.*

La maintenance préventive prévisionnelle peut s'appliquer à tous les matériels. Son efficacité est grandement accrue par l'utilisation de l'outil informatique.

## **I.9.2 Maintenance corrective**

La maintenance corrective regroupe l'ensemble (les activités réalisées après la défaillance (totale ou partielle) d'un bien, ou la dégradation de sa fonction, pour lui permettre d'accomplir une fonction requise moins provisoirement.

La maintenance corrective peut être :

- palliative ;
- curative.

### **I.9.2.1 Maintenance corrective palliative**

La maintenance corrective palliative regroupe les activités de maintenance corrective destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Ces activités du type dépannage qui présentent un caractère provisoire devront être suivies d'activités curatives.

### **I.9.2.2 Maintenance corrective curative**

La maintenance corrective 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. Ces activités du type réparation, modification ou amélioration doivent présenter un caractère permanent.

### **I.9.3 Maintenance Améliorative**

Après plusieurs défaillances de même nature, ce type de maintenance permet, après réflexion et étude, d'éliminer le problème. Elle nécessite obligatoirement une concertation entre services Production - Bureau d'étude et Maintenance.

## **I.10 Niveaux de maintenance**

Un niveau de maintenance se définit par rapport :

- à la nature de l'intervention ;
- à la qualification de l'intervenant ;
- aux moyens mis en œuvre.

La norme NF X 60-010 donne, à titre indicatif, cinq niveaux de maintenance, en précisant le service qui en a la responsabilité, la production ou la maintenance.

### **I.10.1 Premier niveau**

Il s'agit de réglages simples prévus par le constructeur ou le service de maintenance, au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement.

*Exemples :*

- *Echanges en toute sécurité d'éléments consommables tels que : fusibles, voyants,...*
- *Dégagement d'un produit défectueux sur une machine automatisée après la mise en sécurité de la machine.*

Ces interventions de premier niveau peuvent être réalisées par l'exploitant du bien, sans outillage particulier à partir des instructions d'utilisation.

### **I.10.2 Deuxième niveau**

Il s'agit de dépannages par échange standard des éléments prévus à cet effet et d'opérations mineures de maintenance préventive.

*Exemples :*

- *Graissage d'une machine ;*
- *Contrôle du bon fonctionnement d'un four de traitements. Thermiques ;*
- *Remplacement d'une électrovanne sur un système de serrage de pièce.*

Ces interventions de deuxième niveau peuvent être réalisées par un technicien Ou l'exploitant du bien dans la mesure où ils ont reçu une formation pour les exécuter en toute sécurité.

### **I.10.3 Troisième niveau**

Il s'agit d'identification et de diagnostic de pannes suivis éventuellement :

- *d'échanges de constituants ;*
- *de réparations mécaniques mineures ;*
- *de réglage et ré étalonnage général des mesureurs.*

*Exemples*

- *emplacement d'une bobine de contacteur défectueuse à la suite d'une surtension ;*
- *Démontage d'un manomètre donnant des indications erronées, réétalonnage sur un banc de contrôle, remontage sur la machine ;*
- *Remplacement d'une clavette cisailée nécessitant l'ajustage de la nouvelle clavette.*

Les interventions de troisième niveau peuvent être réalisées par un technicien spécialisé directement sur le site ou dans un atelier de maintenance.

### **I.10.4 Quatrième niveau**

Il s'agit de tous les travaux importants de maintenance corrective ou préventive à l'exception de la rénovation et de la reconstruction.

*Exemples*

- *Révision générale d'un compresseur ;*
- *Démontage, réparation, remontage, réglage d'un treuil de levage ;*
- *Remplacement du coffret d'équipement électrique de démarrage d'une machine-outil.*

Ces interventions de quatrième niveau peuvent être réalisées par une équipe disposant d'un encadrement technique très spécialisé et de moyens importants bien adaptés à la nature de l'intervention.

### **I.10.5 Cinquième niveau**

Il s'agit de tous les travaux de rénovation, de reconstruction ou de réparation importante, confiés à un atelier central de maintenance ou à une entreprise extérieure prestataire de services.

*Exemples :*

- *Révision générale de la chaufferie d'une usine ;*
- *Rénovation d'une ligne de conditionnement de flacons pour améliorer son degré d'automatisation ;*
- *Réparation d'un engin de levage portuaire partiellement endommagé à la suite d'une tempête.*

Dans ce type de travaux les moyens et les méthodes sont comparables à ceux mis en œuvre lors de la fabrication des matériels. C'est au constructeur d'en fournir, les spécifications techniques et constructives. [2]

### **I.10.6 Documents nécessaires à prévoir**

Une intervention de maintenance sur un système ne peut se faire sans référence à des documents précis et à jour. Chaque machine ou système possède différents dossiers qui permettent de connaître les différentes structures de l'ensemble. Les interventions de maintenance sont obligatoires pour la conservation du système dans un état optimal de production. De plus, ces interventions doivent se faire au moindre coût, sans gêner la production. Pour tenir cet objectif, il est indispensable de pouvoir consulter à tout moment le passé, au niveau technique, du bien de production.

L'informatique, grâce à des logiciels parfaitement adaptés à cette gestion de maintenance, permet d'établir des dossiers, de les tenir à jour, de les consulter à tous moments, facilitant ainsi les interventions de maintenance.

#### **I.10.6.1 Dossier technique**

Ce dossier d'ordre général regroupe les aspects techniques propres à un type de machine, à savoir :

- les schémas électriques ;
- les plans et schémas mécaniques ;
- les données et paramètres de fonctionnement ;
- les caractéristiques fonctionnelles.

#### **I.10.6.2 Dossier machine**

Ce dossier, particulier à la machine, ne concerne que celle-ci. Il peut comporter des documents ou renseignements comme :

- sa mise en service ;
- les consignes particulières d'installation et de mise en place.

#### **I.10.6.3 Dossier relatif à son cycle de fonctionnement**

- les différents GRAFCET (Graphe Fonctionnel de Commande Etape Transition) ;
- le GEMMA (Guide d'Etude des Modes de Marches et d'Arrêts).

#### **I.10.6.4 Dossier relatif à la partie mécanique**

- les spécifications de réglage ;
- les interventions de maintenance particulières ;
- les modifications intervenues après mise en service ;
- les spécifications particulières, au niveau sécurité, concernant certaines interventions présentant des risques.

### **I.10.6.5    Sous-dossier dit «fichier historique »**

Il va regrouper les traces écrites ou informatisées du passé propres au système. C'est à ce niveau que l'on peut parler d'évolution de maintenance par rapport à un entretien.

On trouve par exemple :

- Tout le passé de l'entretien classique, préconisé par le constructeur comme :
  - les révisions des éléments mécaniques ;
  - les vidanges et graissages des éléments de transmission de mouvement.
- Les *dysfonctionnements* :
  - les pannes ou arrêts anormaux ;
  - les dépannages puis les réparations.
- La *logique maintenance* doit faire apparaître également le coût financier de cette "logistique". Seront pris en compte :
  - les coûts d'intervention ;
  - le temps passé par intervention ;
  - le coût des éléments changés ;
  - la gestion du magasin de pièces détachées, en tenant compte de préserver un stock minimum.
- *L'outil informatique* peut se montrer très performant et permettre une gestion facile et logique de la structure « maintenance » d'une unité de production. [2].

## **I.11 Conclusion**

La méthode de maintenance proposée, pour être efficace, elle doit dans tous les cas être comprise et admise par les responsables de production et avoir l'adhésion de tout le personnel. Ces méthodes doivent être dans la mesure du possible standardisées entre les différents secteurs (production et périphériques).ce qui n'exclut pas l'adaptation essentielle de la méthode au matériel (par exemple à un ensemble de machine, à une machine ou à un organe). Avec l'évolution actuelle des matériels et leurs tendances à être plus fiable, la proportion des pannes accidentelles sera mieux maîtrisée. La maintenance préventive diminuera quantitativement

d'une façon systématique mais s'améliorera qualitativement par la maintenance conditionnelle. La maintenance préventive, hier expérimentale et subjective, tend aujourd'hui à devenir plus scientifique.

## **Chapitre II. La Fiabilité d'un système électromécanique et Leurs Lois de calculs**

## II.1 Introduction

Toutes les activités d'évaluation de la fiabilité (assurer la continuité du service), de la maintenabilité (être réparable), de la disponibilité (être prêt à l'emploi), d'un système, d'un produit ou d'un moyen. Ces évaluations permettent, par comparaison aux objectifs ou dans l'absolu, d'identifier les actions de construction (ou d'amélioration) de la sûreté de fonctionnement de l'entité. Ce chapitre contient les principales lois de calcul de fiabilité

### II.1.1 Fiabilité des systèmes

#### II.1.1.1 Systèmes en série

- **Configuration en série**

S fonctionne si A et B... et N fonctionnent, mais S est défaillant si A ou B... ou N sont défaillants

La configuration en série est caractéristique de l'association d'équipements en lignes de production.



Figure II.1– configuration série.

Pour une telle configuration, le système fonctionne si tous ses éléments fonctionnent.

La durée de vie du système sera alors :

$$X = \min_{i=1,n} X_i$$

Où  $X_i$  est la durée de vie de l'élément  $i$ .

La fiabilité du système est alors

$$\begin{aligned} R(x) &= P(X > x) = P(\min_{i=1,n} X_i > x) \\ &= P(\forall i, X_i > x) \\ &= \prod_{i=1}^n P(X_i > x) \end{aligned}$$

$$= \prod_{i=1}^n Ri(x). \quad (\text{II.1})$$

## II.1.2 Systèmes en parallèle

- **Configuration parallèle**

S est défaillant si A et B (et N) sont simultanément défaillants ;

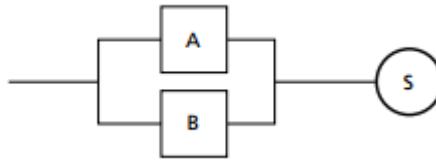


Figure II.2– Configuration parallèle.

Pour une telle configuration, le système fonctionne si au moins un de ses n composants qui le constitue fonctionne.

La durée de vie du système sera alors :

$$X = \max_{i=1,n} Xi$$

,Où  $Xi$  est la durée de vie de l'élément  $i$ .

La fiabilité du système est alors

$$\begin{aligned} R(x) &= P(X > x) = P(\max_{i=1,n} Xi > x) \\ &= 1 - P(\max_{i=1,n} Xi \leq x) \\ &= 1 - P(\forall i, Xi \leq x) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n P(Xi \leq x) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(Xi > x)) \\ &= \prod_{i=1}^n (1 - Ri(x)). \end{aligned} \quad (\text{II.2})$$

### II.1.3 Systèmes k parmi n

Pour une telle configuration, le système fonctionne si au moins k éléments parmi ses n éléments fonctionnent.

Cas particuliers

- Si  $k = 1$  correspond à un système en parallèle.
- si  $k = n$  correspond à un système en série. [8]

## II.2 Redondances

L'étude des divers types de redondances nous conduit à distinguer trois grandes catégories :

- **Redondance active**

Une redondance active est réalisée par la mise en parallèle assurant les mêmes fonctions et travaillant en même temps. On a à faire un système appelé " système parallèle " [4].

- **Redondance passive (Stand-by)**

Nous considérons un système dans lequel un seul élément est en service à la fois. L'ors qu'il tombe en panne, un dispositif de commutation détecte la défaillance et effectue le branchement d'un élément de réserve [5].

- **Redondance majoritaire**

Cette redondance concerne surtout des signaux de grande sécurité, et, en particulier les équipements électroniques. Le signal de sortie est celui de la majorité des composants [4].

## II.3 Les analyses FMD des systèmes réparables

Nous plaçons délibérément ce chapitre sous le signe du « **maintenancier** » et non du « **fiabiliste** ». Ces deux métiers sont différents : le maintenancier est un gestionnaire des activités techniques du terrain, le fiabiliste est un scientifique concepteur de systèmes « sûrs » ou un exploitant des nombreux retours d'expérience mis en place dans quelques grands groupes industriels (automobiles, nucléaire, aéronautique, etc.).

Le premier a toujours trop de pannes, le second n'en a jamais assez dans son retour d'expérience. Le premier est spécialement concerné par la « disponibilité opérationnelle » des équipements, le second par la « fiabilité prévisionnelle » des composants et des systèmes.

Loin de les opposer, notre objectif consiste à combler le fossé qui les sépare trop souvent en mettant à la disposition du premier quelques outils du second. Des outils applicables sur le terrain industriel, leur approche théorique n'étant là que pour justifier le bien-fondé de leur mise en application. [3]

### II.3.1 Définitions (CEN)

- **Fiabilité** « Aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, durant un intervalle de temps donné. »

$$R(t) = P[E \text{ non défaillant sur } [0, t]]$$

#### II.3.1.1 Les différentes sortes de fiabilité :

##### a) *Fiabilité prévisionnelle* :

(Prédite) correspondant à la fiabilité future d'un système et établir par son analyse connaissant les fiabilités de ces composants.

##### b) *Fiabilité opérationnelle* :

(Observé ou estimée) déduite de l'analyse d'entités identiques dans les mêmes conditions opérationnelle ; à partir de l'exploitation d'un retour d'expérience.

##### c) *Fiabilité intrinsèque* :

La fiabilité intrinsèque ou inhérente, découle directement des paramètres de conception. Sans modification de conception des entités, la maintenance visera à maintenir la fiabilité opérationnelle à un niveau au plus égal à la fiabilité intrinsèque.

##### d) *Fiabilité extrinsèque* :

Elle résulte des conditions d'exploitation de la qualité de la maintenance d'une manière générale des contraintes extérieures.

Probabilité : c'est le rapport :  $\frac{\text{nombre de cas favorables}}{\text{nombre de cas possible}} < 1$

- **Maintenabilité** « Dans des conditions données d'utilisation, aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits. »

$$M(t) = P [E \text{ est réparée sur } [0, t]]$$

- **Disponibilité** « 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 est assurée. »

$$D(t) = P[E \text{ non défaillant à l' instant } t] [6]$$

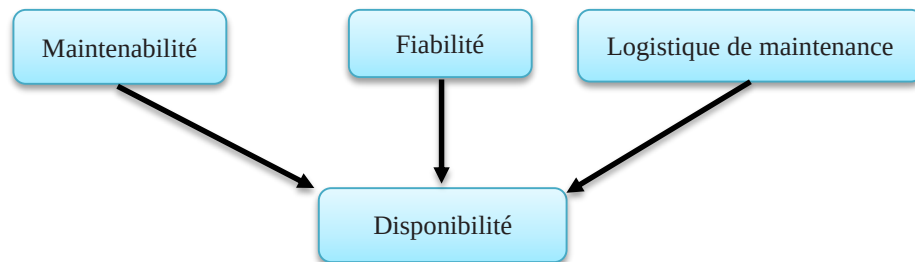


Figure II.3– Disponibilité et trois paramètres.

Ce schéma met en évidence :

- que la maintenabilité est un des leviers d'action pour améliorer la disponibilité, donc la productivité d'un équipement ;
- que fiabilité et maintenabilité sont deux notions « parallèles » de même importance, et dont les démarches d'analyses sont semblables

### II.3.2 Analyses FMD : indicateurs opérationnels

#### Temps de fiabilité, maintenabilité et disponibilité

##### Définitions

Figure II.4 schématise les états successifs que peut prendre un système réparable.

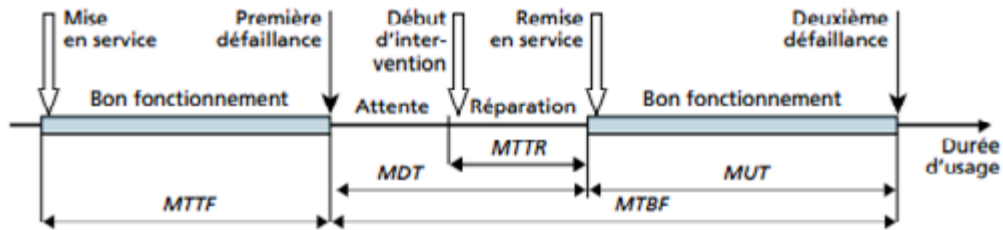


Figure II.4– Les durées caractéristiques de FMD. [3]

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 d'origine anglo-saxonne et correspondent aux notions suivantes :

- MTTF (mean time to [first] failure) : temps moyen avant la 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 ;
- MUT (mean up time) : temps moyen de disponibilité ;
- MTTR (mean time to repair) : temps moyen de réparation. [3]

## II.4 Définitions relatives aux défaillances (projet CEN)

Quelques définitions normalisées utiles :

1. **Défaillance** : « cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise ».

Après une défaillance, le bien est en panne. Termes proches ou synonymes, mais non normalisés : failure en anglais, dysfonctionnement, défaut, faute, panne, avarie, dégradation, anomalie, dommage, erreur, incident, anomalie, arrêt fortuit, détérioration, etc.

2. **Cause de défaillance** : « circonstances liées à la conception, à la fabrication, à l'installation, à l'utilisation et à la maintenance qui ont conduit à la défaillance ».
3. **Mécanisme de défaillance** : « processus physiques, chimiques ou autres qui conduisent ou ont conduit à une défaillance ».
4. **Mode de défaillance** : effet par lequel une défaillance se manifeste.

5. **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 ».
6. **Dégradation** : « évolution irréversible des caractéristiques d'un bien liée au temps ou à la durée d'utilisation ».

Une dégradation peut conduire à la défaillance.

7. **État dégradé** : « état d'un bien par lequel ce bien continue à accomplir une fonction avec des performances inférieures aux valeurs nominales ou continue à accomplir une partie seulement de ces fonctions requises ». [3]

## II.4.1 Les analyses qualitatives de défaillances et leurs enjeux

La norme AFNOR X 60-011 propose plusieurs mises en famille des défaillances,

Parmi lesquelles nous retiendrons :

- *suivant leur cause* (Les causes intrinsèques et extrinsèques) ;
- *suivant leur degré* : défaillances partielles ou complètes, permanentes, fugitives ou intermittentes ;
- *suivant leur vitesse d'apparition* : défaillances soudaines ou progressives.

La défaillance soudaine « ne peut pas être anticipée par un examen ou une surveillance préalable » alors que la défaillance progressive peut l'être (critère de détectabilité).

Par combinaison des deux : défaillance catalectique ou par dégradation.

La défaillance catalectique est soudaine + complète,

La défaillance par la dégradation est progressive + partielle.

Le taux de défaillance, noté  $\lambda(t)$ , est un indicateur de fiabilité qui représente :

– soit un taux supposé constant de défaillances par unité d'usage exprimé sous la forme générale :  $\lambda(t) = \frac{1}{MTBF}$

– soit la fonction  $\lambda(t)$  qui représente une proportion de survivants à l'instant  $t$ , tirée d'un échantillon.

Le taux de défaillance s'exprime le plus souvent en « pannes par heure ».

### Défaillances intrinsèques et majeures

Il est utile de préciser que, dans toute analyse de fiabilité, seules les défaillances intrinsèques » doivent être prises en compte.

## II.4.2 La durée de vie d'un équipement : la courbe en baignoire

### La courbe en baignoire

L'allure générale des variations de la fonction  $\lambda(t)$  d'un équipement le long de sa durée de vie est connue a priori : nous trouvons une courbe en forme de « baignoire ». Cette courbe (figure 5.3) met en évidence trois périodes distinctes : la jeunesse, la maturité et la vieillesse de l'équipement, chaque période ayant ses types de défaillances propres...

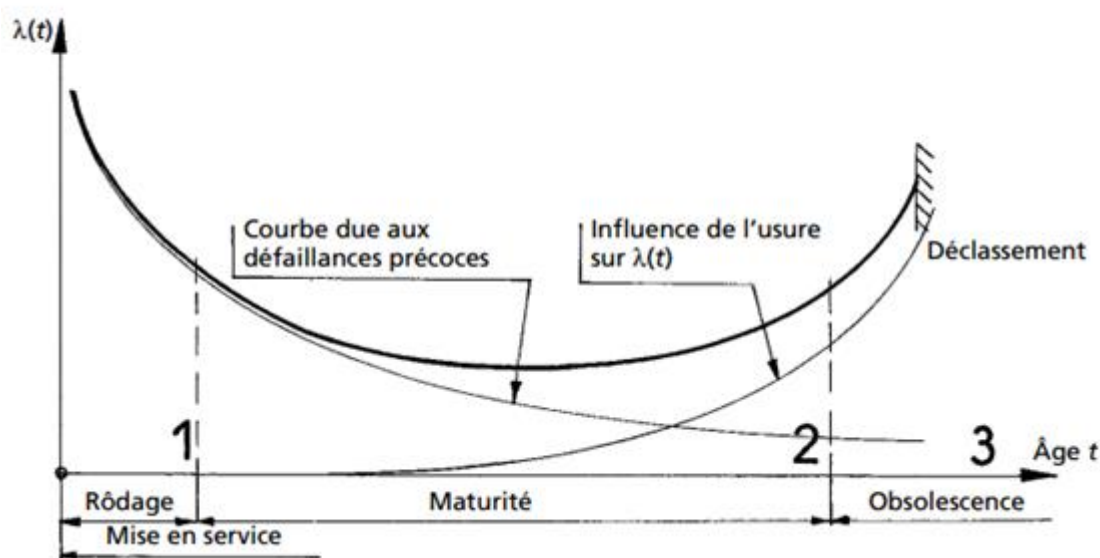


Figure II.5– Les époques de la vie d'un système électromécanique. [3]

Pour un système comportant des technologies variées, la courbe  $\lambda(t)$  peut être considérée comme une « ligne de tendance » résultante des différentes distributions des défaillances des composants. Cette courbe permet de séparer trois populations de défaillances de natures différentes, généralement classées en trois périodes successives (Figure II.5) :

- période de jeunesse, caractérisée par des défaillances « précoces » ;

– période de vie utile, avec des défaillances aléatoires et un taux de défaillance sensiblement constant. Nous nommerons « hypothèse exponentielle » le fait de considérer  $\lambda$  constant sur la période de vie utile ;

– période de vieillesse ou d'usure, avec un taux de défaillance inexorablement croissant jusqu'à l'obsolescence. [3]

### II.4.3 Méthodologie de la recherche des lois de probabilité $R(t)$ et $M(t)$ et $D(t)$

#### II.4.3.1 Nature des échantillons de valeurs

Les valeurs à traiter sont des échantillons de TBF provenant d'un historique pour la fiabilité, ou des échantillons de TTR (durées d'interventions) provenant de BT (papiers ou écran) pour la maintenabilité. Ces échantillons, dans l'industrie, sont généralement de taille modeste : malheureusement pour le fiabiliste et le niveau de confiance de ses résultats, heureusement pour la maintenance. [3]

#### II.4.3.2 Les deux méthodes de traitement d'échantillon de TBF

Deux méthodes de traitement, schématisées à la Figure II.6.

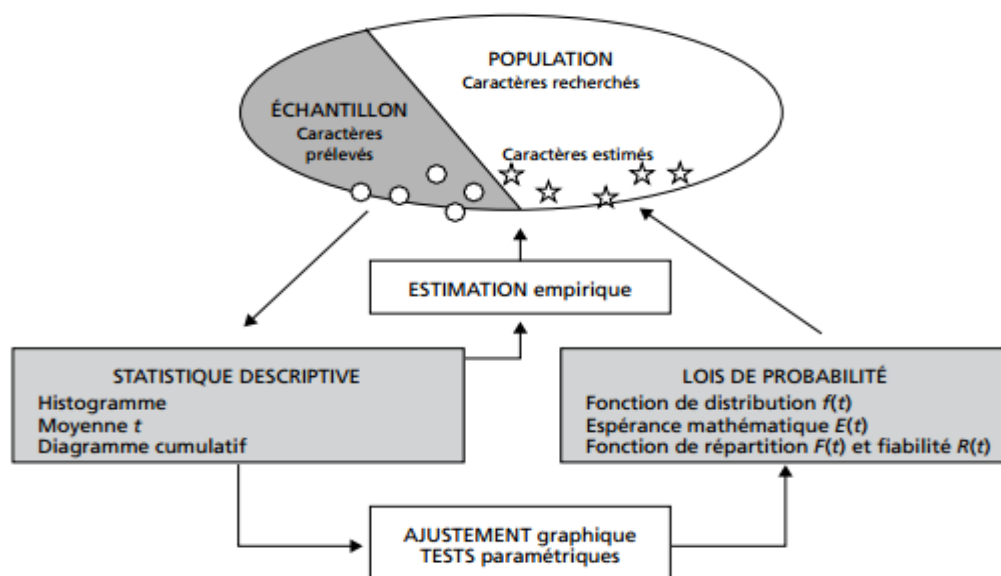


Figure II.6– Les Deux méthodes de traitement. [3]

Les méthodes d'estimations statistiques de la fiabilité d'un dispositif

Pour les grands échantillons ( $N > 50$ , éventuellement  $> 30$ ), mettre en œuvre une estimation statistique en application de la statistique « descriptive ». Cette méthode donnera des estimateurs « empiriques » de la fiabilité de l'échantillon :

$R(i)$ , MTBF et écart-type.

Pour des échantillons petits ( $8 < N < 50$ ), mettre en œuvre une recherche de loi de probabilité ajustable à l'échantillon. Cette méthode fournira les caractéristiques  $R(t)$ ,  $F(t)$ ,  $f(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $E(t) = \text{MTBF}$  de la population mère associée à un intervalle de confiance, sous forme graphique et/ou analytique.

## II.5 Les analyses quantitatives de défaillances

### II.5.1 Le diagramme d'Ishikawa des 5 M

*Un outil d'investigation simple :*

Cet outil « de la qualité » a vocation à rechercher les causes potentielles d'un dysfonctionnement. Appliqué à la maintenance, il permet une investigation a priori menée à partir de cinq familles de causes de défaillance : les méthodes, la main-d'œuvre, les moyens d'exploitation, le milieu environnant et les matières d'œuvre. Il se prête bien à une recherche collective, menée par construction d'une arborescence construite de l'aval (le défaut) vers l'amont (les causes potentielles), suivant l'exemple de la Figure II.7.

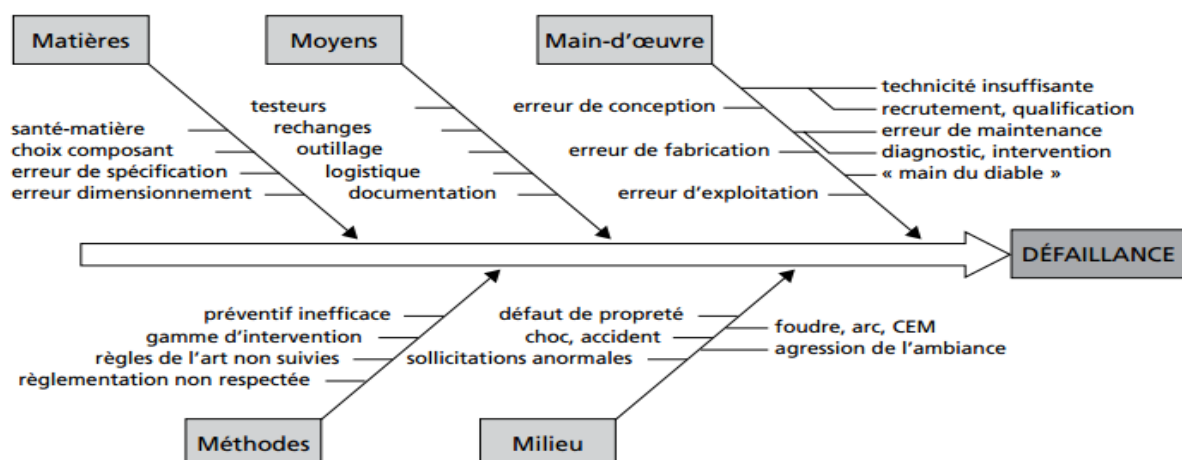


Figure II.7– Recherche des causes potentielles d'une défaillance. [3]

## II.5.2 Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC)

*Définition et différentes formes évolutives :*

### Définition

L'AMDEC est une méthode qualitative et inductive visant à identifier les risques de pannes potentielles contenues dans un avant-projet de produit ou de système, quelles que soient les technologies, de façon à les supprimer ou à les maîtriser *abinitio*. Elle est normalisée par l'AFNOR : norme X 60-510 de décembre 1986.

### Histoire et évolution

La FME(C)A (failure mode effect critically analysis) a été mise au point vers 1960 dans l'industrie aéronautique américaine. Dédiée à l'origine à la mise au point des produits, l'industrie automobile a étendu son usage à la mise au point des procédés, puis des systèmes de production vers 1980. De plus, alors que sa vocation initiale était prévisionnelle, l'outil a été utilisé de façon « opérationnelle » pour améliorer des systèmes existants. Il est possible de réaliser des AMDE ou des AMDEC, l'estimation de la criticité des modes de défaillance apparaissant utile ou non. Actuellement, les AMDE (C) sont mises en œuvre :

- de façon réglementaire : sûreté des industries à risque (nucléaire, chimie, aérospatiale, transports, etc.) ;
- de façon contractuelle : équipementiers de l'automobile principalement ;
- de façon volontaire : construction d'une bonne disponibilité à l'origine ou amélioration de la disponibilité en phase d'exploitation. Nous n'étudierons que les analyses de type « AMDEC-moyens de production » qui concernent le plus les techniciens de maintenance. [3]

## II.6 Principales lois de probabilité utilisées en fiabilité

La fiabilité nécessite la connaissance des distributions de durée de vie afin de l'estimer. Nous présentons les lois et les modèles de fiabilité susceptibles, selon l'expérience, de représenter des distributions de durée de vie qui interviennent le plus fréquemment dans l'analyse de la fiabilité.

Nous rappelons les principales propriétés de ces lois, les fonctions de fiabilité associées, les densités de probabilité ainsi que les taux de défaillance [6].

Les lois de probabilité utilisées en fiabilité

On distingue deux types :

- **Lois discrètes**

1. Loi Uniforme
2. Loi de Bernoulli
3. Loi Binomiale
4. Loi Binomiale négative
5. Loi Géométrique
6. Loi Hypergéométrique
7. Loi de Poisson

- **Lois continues**

1. La loi de Birnbaum-Saunders
2. La loi Gamma
3. La Loi de Cauchy
4. La loi de Student
5. La loi Bêta
6. La loi exponentielle
7. La Loi normal
8. La loi Log normale
9. La loi de Weibull

### II.6.1 Loi exponentielle $\exp(\lambda)$

Une loi exponentielle de paramètre  $\lambda > 0$  modélise la durée de vie d'un élément sans mémoire, ou sans vieillissement (le fait que l'élément ait duré pendant t unité de temps ne

change rien à son espérance de vie à partir du temps  $t$ ). Elle décrit le temps écoulé jusqu'à l'apparition d'une défaillance, ou l'intervalle de temps entre deux défaillances.

\* Fonction de répartition :

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (\text{II.3})$$

Avec :  $x \geq 0$ .

\* Fonction de densité :

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (\text{II.4})$$

Avec :  $x \geq 0$ .

\* Fiabilité :

$$R(x) = e^{-\lambda x} \quad (\text{II.5})$$

Avec :  $x \geq 0$ .

\* Taux de défaillance :

$$\lambda(x) = \lambda \quad (\text{II.6})$$

Avec :  $\lambda$  constant.

## II.6.2 Loi Gamma $G(\alpha, \beta)$

La loi Gamma est définie par un paramètre de forme  $\alpha > 0$  et un paramètre d'échelle  $\beta > 0$ . Elle est utilisée pour modéliser le temps de défaillance d'un élément. [9].

\* Fonction de densité :

$$f(x) = \frac{e^{-\frac{x}{\beta}} x^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}$$

$$D = \max_{x \in \mathbb{R}} |F(x) - F_0(x)| \quad (\text{II.7})$$

Avec  $x \geq 0$ .

\* Taux de défaillance :

$$\lambda(x) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)} }{\beta^\alpha \int_x^\infty \Gamma(\alpha) f(t) dt} \quad (\text{II.8})$$

Avec  $x \geq 0$ ;

$$\Gamma(\alpha) = \int_x^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (\text{II.9})$$

La fonction de répartition de la loi gamma n'a pas d'expression explicite, ce qui est de même pour la fiabilité.

Si  $X \rightarrow G(\alpha = 1, \beta = 1/\lambda)$  alors  $X \rightarrow \exp(\lambda)$ .

### II.6.3 Loi log-normale $\text{Log}\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$

Une variable aléatoire continue et positive est distribuée selon une loi log-normale si son logarithme est distribué suivant une loi normale. Cette distribution est utilisée en fiabilité pour modéliser les défaillances par fatigue.

\* Fonction de densité :

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad x \geq 0. \quad (\text{II.10})$$

\* Fiabilité :

$$R(x) = 1 - \Phi\left(\frac{(\ln(x) - \mu)}{\sigma}\right) \quad (\text{II.11})$$

Avec  $x \geq 0$  ;

Où  $\Phi$  est la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite.

### II.6.4 Loi de Weibull $\mathcal{W}(\beta, \alpha)$

La loi de Weibull est définie par un paramètre de forme  $\beta > 0$  et un paramètre d'échelle  $\alpha > 0$ . 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  $\beta$  : période de jeunesse ( $\beta < 1$ ), période de vie utile ( $\beta = 1$ ) et période d'usure ou vieillissement ( $\beta > 1$ ).

- La fonction de répartition est donnée par la relation suivante :

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}, x \geq 0. \quad (\text{II.12})$$

- La densité de probabilité exprimée par la formule suivante :

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}, x \geq 0. \quad (\text{II.13})$$

- La fiabilité est présentée par :

$$R(x) = e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}, x \geq 0. \quad (\text{II.14})$$

- Le taux de défaillance a l'expression suivante :

$$\lambda(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (\text{II.15})$$

Avec  $\geq 0$ .

Si  $X \rightarrow W$  ( $\beta = 1, \alpha$ ) alors  $X \rightarrow \exp$  ( $\lambda = 1/\alpha$ ).

## II.7 Les tests d'ajustement

Ces tests ont pour but de vérifier qu'une variable aléatoire, dont on possède un n-échantillon indépendant, suit bien une loi donnée (au moins dans sa forme, sinon dans ses paramètres). Il s'agit d'un test portant sur la validité d'un modèle aléatoire. Il a pour but de légitimer le choix du modèle théorique [11].

On test :

$$H_0 \text{ "Fest la loi de X" contre } H_1 \text{ "F n'est pas la loi de X"}$$

### II.7.1 Tests Kolmogorov-Smirnov

Soit  $X_1, X_2, \dots, X_n$  un n-échantillon issue de  $X$  de fonction de répartition  $F$ .

On cherche à tester l'ajustement de la loi de  $X$  par une loi théorique fixé  $F_0$

C'est-à-dire :

$$H_0 \text{ "F = F}_0\text{" contre } H_1 \text{ "F} \neq F_0\text{"}$$

- **Principe du test**

Le test de K.S [12] implique le calcul de :

- fonction de répartition empirique de l'échantillon c'est-à-dire :

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 1_{X_j \leq x} = \frac{\text{nombre d'observation} < x}{\text{taille de l'échantillon}} \quad (\text{II.16})$$

- Calculer le plus grand écart entre la distribution empirique  $F(x)$  et la distribution théorique  $F_0(x)$  c'est-à-dire :

$$D = \max_{x \in \mathbb{R}} |F(x) - F_0(x)| \quad (\text{II.17})$$

- On fixe un seuil de signification  $\alpha$  et on compare cet écart  $D$  à des valeurs critiques particulières qu'on note  $d_{(n,\alpha)}$  obtenus à partir de la table de kolmogrov-smirnov. la décision sera :

$$\begin{cases} \text{On accepte } H_0 & \text{si } D < d_{(n,\alpha)} \\ \text{On rejette } H_0 & \text{sinon} \end{cases}$$

## II.7.2 Test Khi-Deux

Posé par Karl Pearson en 1900, le test  $\chi^2$  est sûrement le test le plus répandu pour tester l'adéquation d'une loi, continue ou discrète, à des données.

Le problème qui se pose est de savoir si les écarts entre la distribution observée et la loi théorique peuvent être jugés faible [12].

- **Principe du test**

Soit  $X_1, X_2, \dots, X_n$  un n-échantillon issue de  $X$  de fonction de répartition  $F$ .

C'est-à-dire :

On cherche à tester l'ajustement de la loi de  $X$  par une loi théorique fixé  $F_0$ .

C'est-à-dire :

$H_0$  "  $F = F_0$  " contre  $H_1$  "  $F \neq F_0$  "

- **Construction du test**

Soit  $X_1, X_2, \dots, X_n$  un n-échantillon issue de  $X$  de fonction de répartition  $F$ .

On partage le domaine de  $X$  en  $r$  intervalles  $I_1, I_2, \dots, I_r$ .

Soit  $n_i$  l'effectif de la classe  $I_i$ .

On note  $p_i$  la probabilité théorique liée à la classe  $I_i$ .

Le test est basé sur la statistique (sous l'hypothèse  $H_0$ ) :

$$K_n^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} \quad (\text{II.18})$$

- **Règle de décision**

**Remarque :**

Si  $K_n^2$  est très petit, c'est que la distribution théorique est Proche de la distribution empirique.

Alors qu'au contraire, si  $K_n^2$  est grand, l'écart entre les deux distributions est important, par conséquent :

- Si  $K_n^2 > \chi_{(r-1-q, \alpha)}^2$  on rejette  $H_0$ .
- Si  $K_n^2 < \chi_{(r-1-q, \alpha)}^2$  on ne rejette pas  $H_0$ .

**Donc :**

L'ajustement est validé.

q : étant le nombre de paramètre estimés.

Mais pour effectuer le test de Khi-deux il faut vérifier certaines conditions :

- Le nombre de classe  $r \geq 7$ .
- L'effectif théorique  $np_i \geq 8$ .
- Avoir dans la mesure du possible des classes d'effectifs théoriques comparables.

## II.8 Conclusion

La Fiabilité et Maintenabilité sont deux notions fondamentales parallèles de même importance. Cependant complémentaires, une Maintenabilité optimale sera particulièrement recherchée là où la fiabilité est douteuse. Ne faisons pas abstraction de la fiabilité humaine loin d'accabler et de rechercher le fautif ; comme la défaillance, l'erreur humaine analysée et admise est source de progrès. L'idée est aussi de les limiter par l'application de procédures, points de contrôle, validation... La disponibilité est la résultante des actions de Maintenabilité et Fiabilité, il est important de comprendre que la disponibilité est aussi un objectif ; issue de l'environnement économique de l'entreprise qui conditionne la politique à appliquer, donc l'objectif de disponibilité fixé à la Maintenance.

## **Chapitre III. Représentation de l'Enterprise « Algal+ »**

## **III.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous présenterons l'entreprise dans laquelle le projet de fin d'études s'est déroulé à savoir, l'Entreprise ALGAL PLUS de M'sila. Pour se faire, nous montrerons une brève introduction de l'extrusion en aluminium et la situation géographique de cette entreprise, ses activités, sa structure et finalement son organisation.

### **III.1.1 Une brève introduction de l'extrusion en aluminium**

Extrusion d'aluminium a été appliquée à bien des égards innovatrices depuis ses débuts il y a plus de 100 ans. De son utilisation précoce dans la création de tubes et fils à des applications futuristes dans la construction de la station spatiale, l'extrusion d'aluminium a une riche histoire.

Le procédé d'extrusion a été breveté en 1797 pour la fabrication de tuyaux de plomb, ce qui a été fait avec le travail manuel jusqu'à ce que l'introduction de la presse à commande hydraulique en 1820. A la fin du XIXe siècle, les méthodes d'extrusion ont également été utilisées pour les alliages de cuivre et de laiton, mais l'application de l'extrusion d'aluminium suivi d'un trajet unique.

#### **III.1.1.1 Les origines de l'aluminium**

Par rapport à d'autres métaux comme le cuivre, le bronze, le fer et l'acier, qui ont été utilisées depuis des milliers d'années, l'aluminium est relativement jeune, ayant été identifié comme un métal élémentaire en 1807. L'aluminium a été raffiné en 1825, et à ce moment-là, il était considéré comme un métal de luxe qui était plus cher que l'or. Il a fallu attendre la fin des années 1880, avec l'invention du procédé de fusion par Hall et Héroult et le développement de la production commerciale, que le métal argenté est devenu abordable pour un usage quotidien. Les processus de travail initiaux consistaient en laminage, du moulage et forgeage.

#### **III.1.1.2 Développement d'aluminium extrudé**

Alexander Dick a inventé le procédé d'extrusion à chaud moderne en 1894, qui était applicable à la plupart des alliages non ferreux. Aujourd'hui, l'aluminium est le métal le plus couramment extrudé, et il peut être utilisé avec les deux procédés d'extrusion à chaud et à froid.

Amérique du Nord a sa première presse d'extrusion d'aluminium en 1904 en Pennsylvanie, États-Unis. L'introduction d'extrusion crée une forte augmentation des applications de pointe pour l'aluminium, en particulier dans la fabrication de pièces automobiles.

La demande croissante pour l'extrusion d'aluminium a atteint de nouveaux sommets au cours des deux guerres mondiales pour une utilisation dans la fabrication d'avions et d'autres exigences militaires. Le développement rapide de l'extrusion a continué après la Seconde Guerre mondiale, et a commencé à se développer dans divers secteurs, notamment le secteur du logement résidentiel, qui a connu une croissance importante dans la période d'après-guerre.

Au cours des décennies suivantes, les secteurs des transports et de la construction ont toujours été les principaux bienfaiteurs de produits d'extrusion d'aluminium. Même dans les temps présents, la majeure partie de l'utilisation d'extrusion est dans la fabrication de portes et fenêtres, suivi par les véhicules de tourisme.

L'histoire courte d'extrusion d'aluminium, par rapport à d'autres métaux, a connu un développement vaste et la croissance, en train de révolutionner la façon dont nous vivons. Comme de nouveaux objectifs sont découverts dans l'exploration spatiale et ici à la maison, l'extrusion d'aluminium continuera d'être une partie importante de l'avenir [15]

### **III.1.2 Vue d'ensemble de l'usine Algal Plus (+)**

#### **III.1.2.1 Bref historique**

Fondée en 1985, est aujourd'hui algale + une entreprise bien établie dans le secteur de l'extrusion en Algérie.

Il a acquis une bonne réputation dans le domaine de l'extrusion, anodisation et laquage de profilés en aluminium pour la construction et l'industrie.

Il est situé à M'sila, à 250 km à l'est d'Alger, à égale distance des ports d'Alger et Bejaia, qui couvrent toute l'Europe en un temps record.

Le complexe d'aluminium M'sila maintiendra sa position de leader en termes de répondre aux demandes croissantes du marché.

En effet, les services publics déjà installés sur une superficie de 127 000 m<sup>2</sup>. À savoir 630 KVA poste électrique à haute tension, 30 la station électrique de moyenne tension KVA,

une station de gaz sont dimensionnés pour accueillir quatre autres presses, en plus des trois presses utilisées. [13]

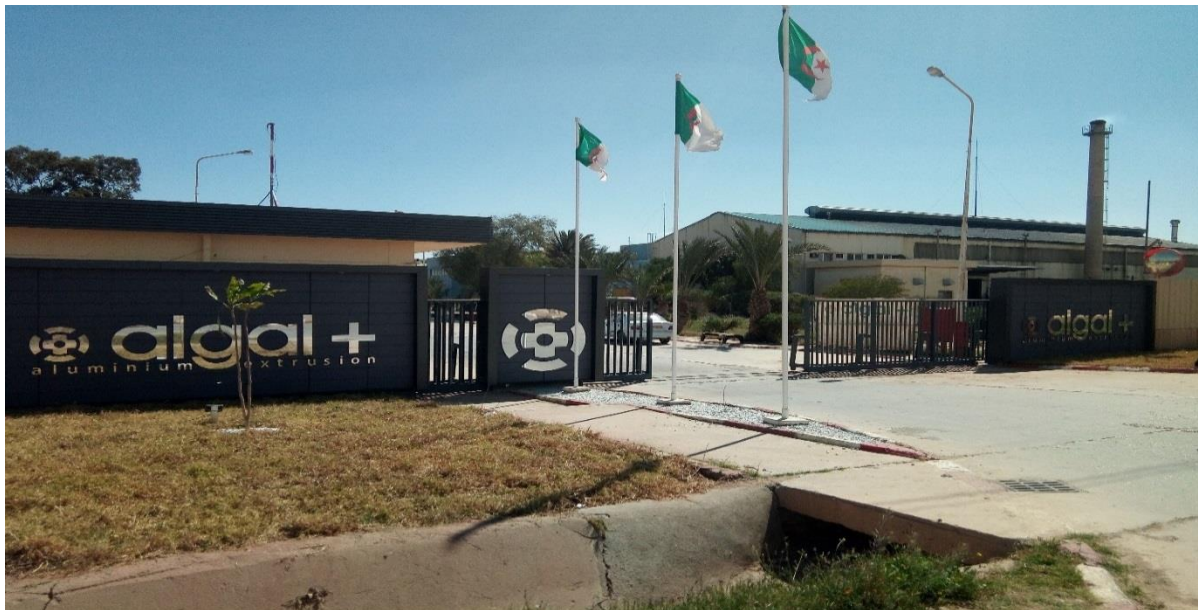


Figure III.1– l'interface de l'Entreprise ALGAL+.

### III.1.2.2 Les chiffres relatifs à l'entreprise

- Nombre d'employés 420 environ
- Le capital social : 1'850'000'000 DZD
- Taille de l'entreprise : 15.000 tonnes / an de profilés d'aluminium en alliages 6060/6063

### III.1.2.3 Chaînes de production

Avec deux presses installées une capacité de 1600, 2 500 tonnes.

### III.1.2.4 Certains des concurrents

Groupe AMR - Setif



Alexo - Bejaïa



Dzal - Oran



Sogema - Alger



### III.1.2.5 Structure organisationnelle de l'entreprise

Algale Plus est composé de plusieurs entités fonctionnelles et opérationnelles.

- **7 Divisions :** (Métallurgie, Maintenance, Direction General, Ressource Humaine, Finance, Commercial, Traitement De Surface)
- **17 Centres De Frais :** (Refont, Extrusion, Contrôle De Qualité, Anodisation, Laquage , Emballage, Bureau D'études Et Méthodes, Laboratoire, Recyclage, Mécanique, Électrique , Traitement Des Eaux, Faux Bois, Sécurité, Informatique, Correction Filières.[7])

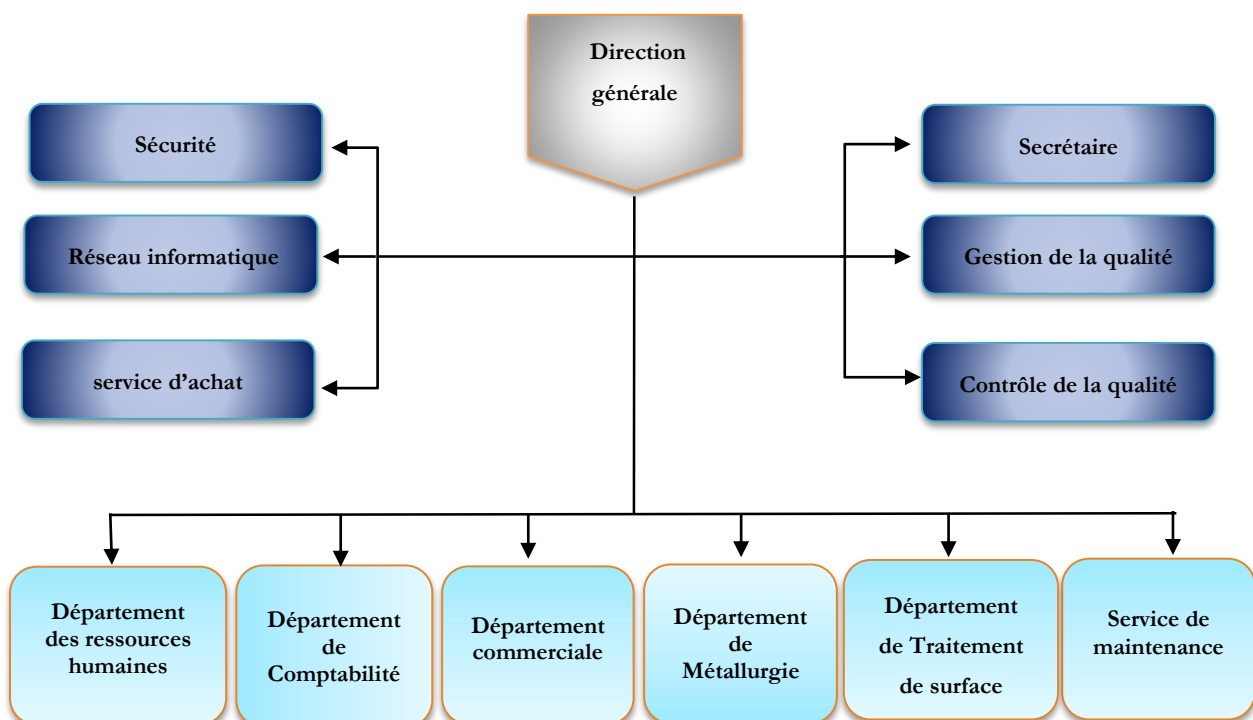


Figure III.2– La structure organisationnelle de l'Entreprise.

### III.1.2.6 Les unités d'entreprise

#### III.1.2.6.1 Répartition géographique des différentes unités

Le tableau suivant illustre la répartition géographique des différentes unités.

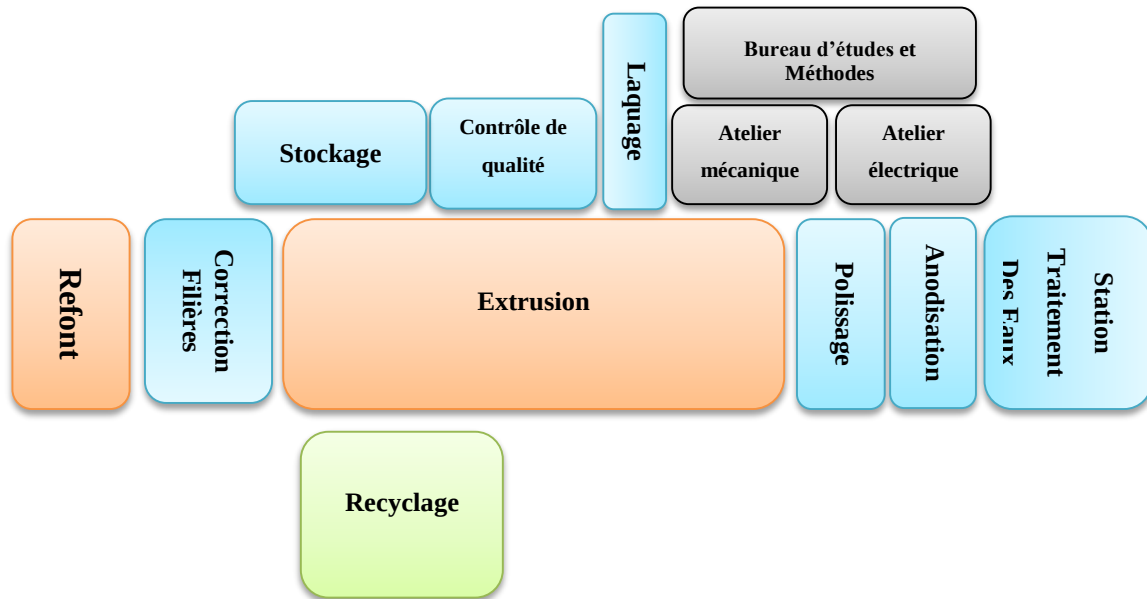


Figure III.3–Représentation la situation du service de maintenance dans une entreprise.

#### Extrusion :

Avec deux presses installées et une troisième en cours d'installation, d'une puissance de 1.600, 2.500 tonnes, la capacité installée annuellement dépassera les 15.000 tonnes de profiles aluminium par an. [13]



Figure III.4– unité d'extrusion.

#### Correction de filières :

Le matériau de base pour les filières est un acier de haute qualité, et le processus d'usinage est exigeant et demande un savoir-faire et une précision élevée. Outils sont assistés dans leur travail par des équipements commandes par ordinateur (CAM).

Un filage d'essai est effectué avec une matrice ainsi fabriquée. Les déformations des profils sont corrigées par une dernière rectification, cette étape est un travail manuel de précision qui exige une grande expérience dont disposent les correcteurs d'ALGAL+. [13]



**Figure III.5– l'opération de correction de filières.**

#### **Anodisation :**

Une installation d'anodisation et de coloration répondant aux exigences les plus strictes du marché. Ces installations permettent d'exécuter toutes les couleurs. En combinant la transformation mécanique de la texture de l'aluminium et la transparence de la couche d'anodisation on obtient des aspects spéciaux et originaux. [13]



**Figure III.6–l'opération d'Anodisation.**

#### **Laquage :**

L'innovation constante dans le domaine des poudres de thermo laquage permet de répondre aux demandes esthétiques et techniques le plus en plus exigeantes. Aux nuanciers traditionnels s'ajoutent de nouveaux aspects satines, mats, métallises, graines, sables, givres,

décors bois et dérivés. Les limites techniques sont repoussées par de nouvelles technologies tel que les poudres encore plus résistantes aux U.V. [13]

### III.1.2.7 Département de maintenance

Service d'entretien est le cœur de l'entreprise, car elle contribue à faire revivre les différents systèmes et faire face à un divers problème pour maintenir le système sur la statue de veille.

Le ministère a trois divisions :

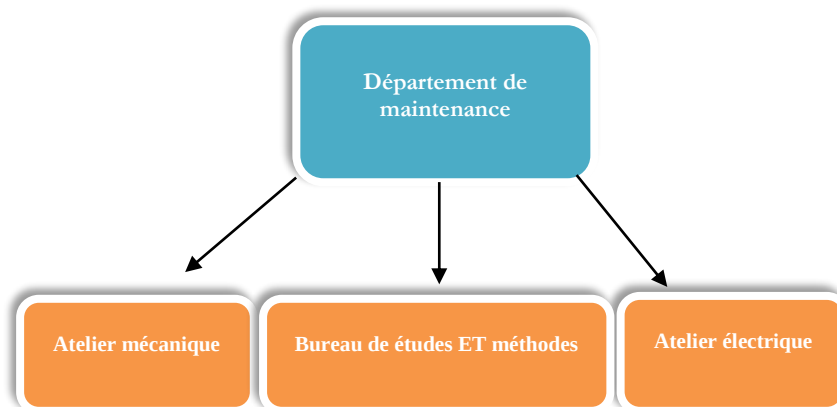


Figure III.7– Divisions du département Maintenance.

### III.1.2.8 Bureau de études et méthodes

Le Bureau des études et des méthodes est une division responsable des tâches suivantes :

- Discuter de tous les plans et les problèmes et proposer des solutions.
- Administration d'intervention.
- La réalisation des rapports d'état des systèmes.
- Étude fichiers de recrutements.

### III.1.2.9 Atelier mécanique

Un atelier de mécanique dirigé par un ingénieur mécanicien qui a commandé et son équipage pour réparer et gérer tous les problèmes d'équipement mécanique qui a été endommagé pendant la production.

### **III.1.2.10 Atelier électrique**

Atelier électrique dirigé par un ingénieur électricien qui a commandé et son équipe pour réparer et gérer tous les problèmes sera d'équipement électrique qui a été endommagé pendant la production.

## **III.2 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'entreprise qu'on a fait notre stage, cette entreprise s'appelle ALGAL+, au cours de ce stage, nous avons pris des informations considérables sur les systèmes électromécaniques existants dans cette entreprise. La presse 1600T est la machine que nous avons choisie grâce de leur importance dans la production. Dans le chapitre suivant, on va évaluer les paramètres de la sureté de fonctionnement tels que la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité et proposer des recommandations.

## **Chapitre IV. Analyses de FMD de la presse 1600T**

## IV.1 Choix des équipements à étudier

### IV.1.1 Introduction

L'analyse FMD a pour but d'estimer la fiabilité et la disponibilité des systèmes électromécaniques à travers leur historique de panne, cette évaluation permet de connaître l'état de santé de ces systèmes. Dans ce chapitre, les temps de bon fonctionnement seront extraits à partir de l'historique de panne de la presse pour évaluer sa fiabilité et sa disponibilité, les calculs de ces paramètres vont être réalisés par l'utilisation d'un logiciel de simulation qui s'appelle **EasyFit**.

Il existe plusieurs méthodes de calculs de fiabilité et pour choisir l'une de ces méthodes, il faut appliquer un test pour connaître quelle méthode conviendrait au calcul.

## IV.1.2 Présentation du système choisi

Dans l'unité de l'extrusion il existe deux lignes de production, Avec deux presses installées et d'une puissance de 1.600, 2.500 tonne.

Le figure suivant représente le système choisi la presse 1600T ;



Figure IV.1–Extrusion presse (ligne 1600 tonne).

### IV.1.3 L'opération d'extrusion

Le processus d'usinage est exigeant et nécessite un savoir-faire et une grande précision. L'opération d'extrusion est représentée sur la figure ci-dessous [14] ;

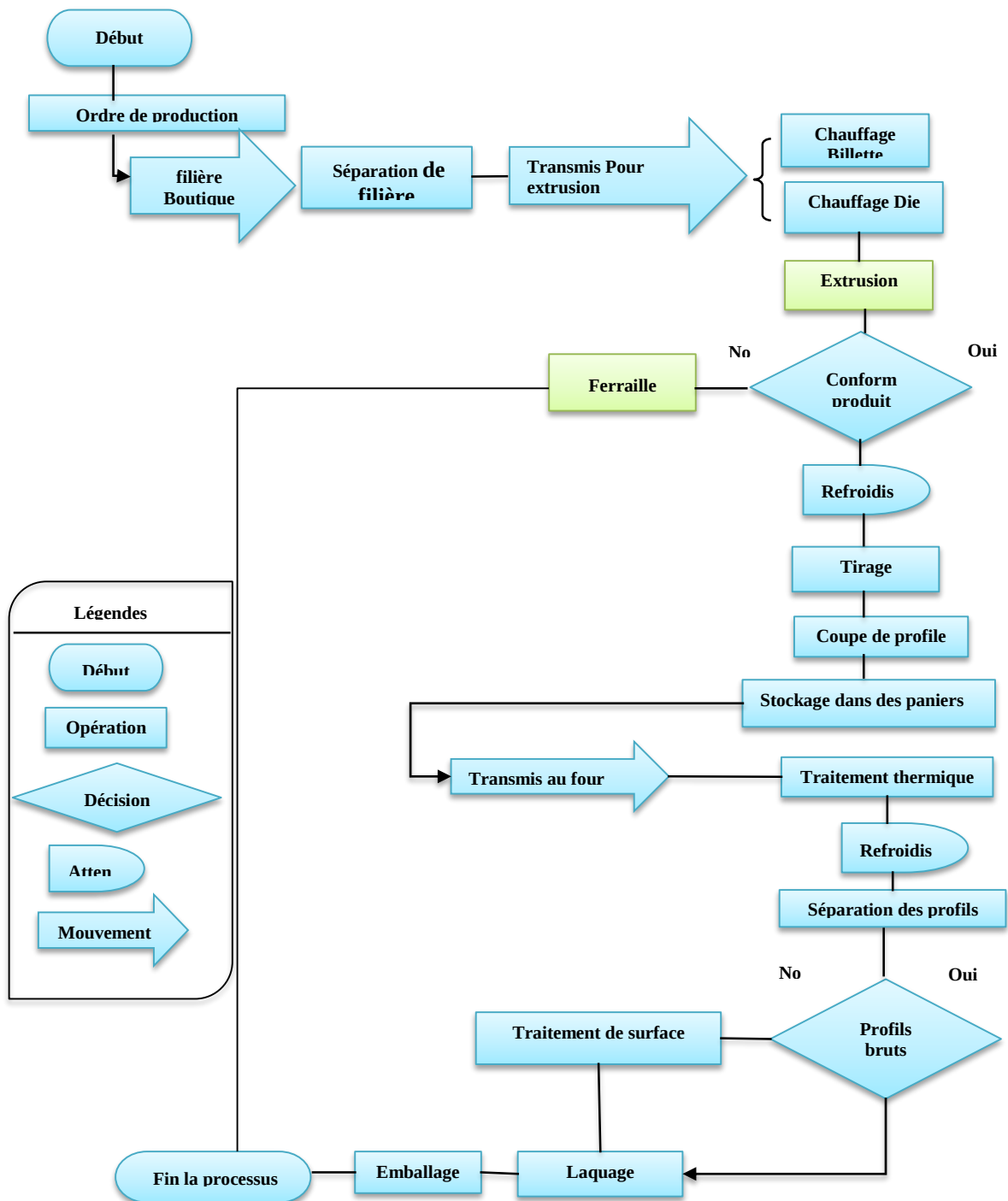


Figure IV.2–Cycle d'extrusion d'aluminium.

## IV.2 Les analyses quantitatives de défaillances

### IV.2.1 Etude Statistique

#### IV.2.1.1 Méthodologie de travail

Dans cette étude, on cherche à connaître les différentes causes fréquentes de panne de la **presse 1600T**. Pour arriver à cet objectif, on va effectuer aux tâches suivantes :

- On collecte tous les informations liés à la presse ;
- On regroupe par famille les modes de défaillance ;
- On classe en ordre décroissant le cumul de temps d'arrêt pour les différents sous-systèmes ;
- On calcule le taux d'arrêt ;
- Construire le diagramme de Pareto représentant le taux d'arrêt de chaque équipement.

## IV.3 Diagrammes de Pareto

Les diagrammes de Pareto permettent de sélectionner des actions prioritaires à mettre en œuvre, à partir de données statistiques objectives. Ils permettent également de communiquer grâce à leur facilité d'interprétation visuelle.

Les deux formes d'usages complémentaires :

- la méthode ABC de Pareto, d'usage très polyvalent ;
- le diagramme de Pareto en bâton, simple à utiliser, dont la lisibilité facile fait un bon outil de communication ; Permet, outre la détermination des éléments qui pénalisent le plus la disponibilité d'un équipement, d'analyser les pistes d'action à mettre en œuvre.

### IV.3.1 La méthode ABC de Pareto

#### - Principe de la méthode ABC

Wilfredo Pareto (1848-1923) était un économiste italien, membre du groupe de Lausanne. Il fut le précurseur de l'économie mathématique. Ayant à étudier la répartition de l'impôt foncier aux États-Unis, il constata que 15 % des contribuables payaient 85 % du total. Cette loi de Pareto, dite loi ABC ou loi des 20/80, illustre de nombreuses répartitions.

En maintenance :

- 20 % des machines ont 75 % des défaillances enregistrées ;
- 20 % des rechanges en magasin représentent 85 % des immobilisations ;
- 15 % des bons de travaux couvrent 65 % des heures d'atelier, mais aussi, en corollaire, 55 % des BT (bons de travaux) ne couvrent que 20 % de la charge de travail.

La méthode ABC permet donc au gestionnaire d'identifier des cibles d'actions prioritaires, mais également de déterminer les éléments négligeables pour alléger l'étude [3]

## IV.4 L'analyse statistique de la presse 1600T

Les statistiques de la section Production incluent des informations sur tous les équipements des unités d'extrusion, mais l'enregistrement numérique de ces statistiques n'a malheureusement démarré qu'en 2017. Notre étude ne couvre que deux années de l'historique des pannes comme illustré le tableau suivant.

**Table IV.1 – L'analyse quantitative des défaillances critère de durée d'intervention.**

| Equipment                    | Nombre de panne | Temps d'arrêt (h) | Cumule de panne | Cumule de Temps d'arrêt | Cumule de panne (%) | Cumule de Temps d'arrêt (%) |
|------------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Tracteur de filage           | 158             | 435.35            | 158             | 435.35                  | 31.04               | 52.29                       |
| Four à billettes             | 122             | 171.6             | 279             | 606.95                  | 54.81               | 72.91                       |
| Table de refroidissement     | 50              | 48.15             | 319             | 655.10                  | 62.67               | 78.69                       |
| Cisaille à billettes à chaud | 47              | 37.2              | 346             | 692.30                  | 67.98               | 83.16                       |
| Table de chargement          | 40              | 35.05             | 396             | 727.35                  | 77.80               | 87.37                       |
| Etireuse                     | 27              | 24.8              | 419             | 752.15                  | 82.32               | 90.35                       |
| Chargeur de billettes        | 20              | 21.9              | 462             | 774.05                  | 90.77               | 92.98                       |
| Scie initiale                | 17              | 17.3              | 479             | 791.35                  | 94.11               | 95.06                       |
| Glissière de profiles        | 12              | 12.7              | 488             | 804.05                  | 95.87               | 96.58                       |
| Four de filière              | 9               | 12.25             | 500             | 816.30                  | 98.23               | 98.05                       |
| Scie finale                  | 6               | 9.2               | 505             | 825.50                  | 99.21               | 99.16                       |
| Table de mise à longueur     | 4               | 5                 | 508             | 830.50                  | 99.80               | 99.76                       |
| Four de revenu               | 2               | 2                 | 509             | 832.50                  | 100.00              | 100.00                      |

### IV.4.1 Diagrammes de Pareto

Le diagramme de Pareto de la presse 1600T et la courbe ABC présentées par la figure suivante ;

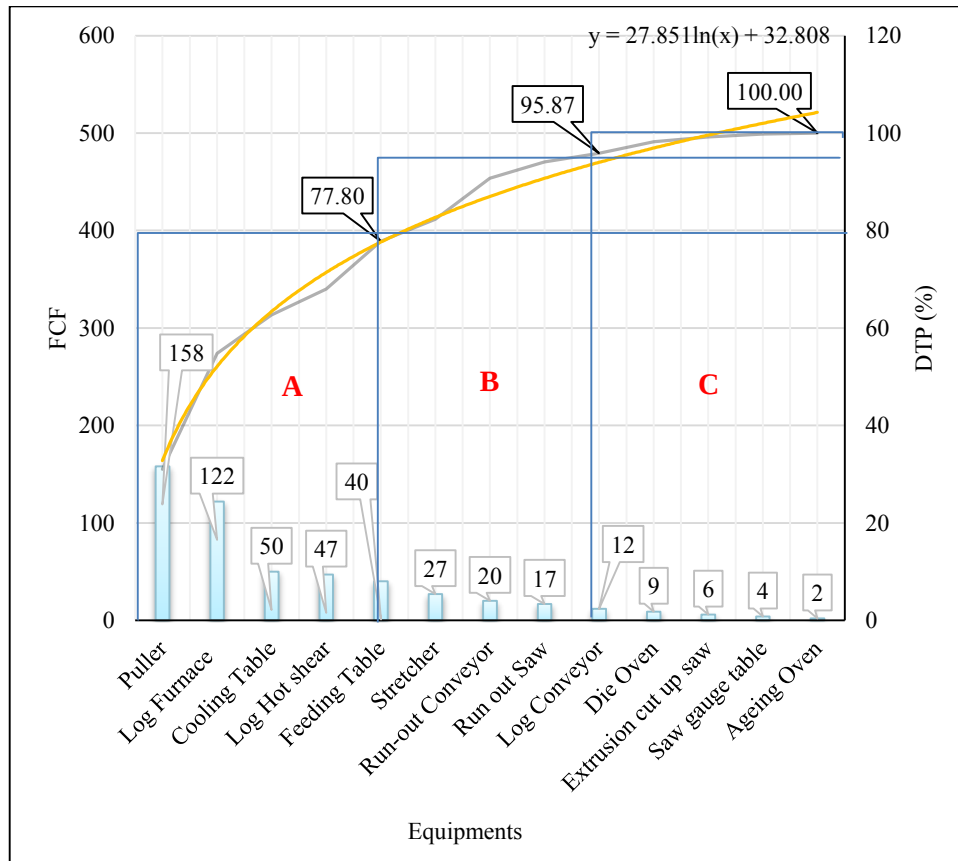


Figure IV.3—Courbe ABC, Histogramme de Pareto.

#### IV.4.1.1 Interpréter les courbes.

**38.46%** des BT (5 Equipments avec **417** pannes) consomment **77.8 %** des temps de non-disponibilité de la presse : ces equipments représenté (**la zone A**). Seront analysés qualitativement pour détecter les gisements de gain de productivité. Soit en évitant leur réapparition (diagnostic et actions sur les causes), soit en les rendant moins pénalisants. **23.08 %** des BT (3 Equipments avec **64** pannes) se rapportent à une non-disponibilité de **18.07 %** (**la zone B**).

**4.13%** des temps de non-disponibilité due **38.46%** des BT (5 Equipments avec **33** pannes) ces equipments représenté (**la zone C**). Ces interventions ne méritent aucune attention à court terme, sauf critère de risque.

#### **IV.4.1.2 Commentaires**

Notre étude porte dans un premier temps les éléments constituant **la zone A en priorité**. Si les décisions et modifications apportées aux éléments de la zone A ne donnent pas satisfaction, on continuera l'étude sur les premiers éléments de **la zone B**, jusqu'à satisfaction. Les éléments appartenant à **la zone C peuvent être négligés**, car ils ont peu d'influence sur le critère étudié.

#### **IV.4.1.3 Décision**

D'après les données précédentes, nous avons constaté que les équipements de **la zone A** comprenait **417** des **514** pannes sur la presse, ce qui représente **514**; nous allons donc concentrer notre étude sur cette zone en utilisant la **distribution de Weibull** pour trait cet échantillon.

### **IV.4.2 Les cinq Equipments de la zone A**

- **Tracteur de filage (puller)**

Le tracteur de filage le système de (puller) permet de guider et de maintenir le profilé en tension pendant l'opération de filage. Le matériel d'extraction. [14]

- **Cisaille à billettes à chaud (Log Hot shear)**

La cisaille à chaud coupe la billette préchauffée à la longueur prédéfinie par le programme de fabrication. [15]

- **Four à billettes (Log Furnace)**

Le four à billettes est utilisé pour préchauffer la température de la billette 420-450°C .Les plus courants sont les fours à gaz ou à induction. Les températures élevées de la billette (plus de 480°C) vont réduire la pression d'extrusion, mais diminuer la vitesse d'extrusion de l'extrusion afin d'éviter les défauts de surface. [12]

- **Table de refroidissement (Cooling Table)**

Une Table de refroidissement est installée derrière un pilulier pour : Refroidir rapidement le produit pour procéder aux phases d'enrobage et d'emballage. [14]

- **Table de chargement (Feeding Table)**

Table de chargement est un type d'alimentation de chariot et a le balayage, le centrage et le chargement complètement automatiques. [15]

- Les cinq équipements sont représentés dans le figure suivant, avec ;

(a) : Le tracteur de filage, (b) : La cisaille à chaud, (c) : Le four à billettes

(d) : Table de refroidissement, (e) : Table de chargement



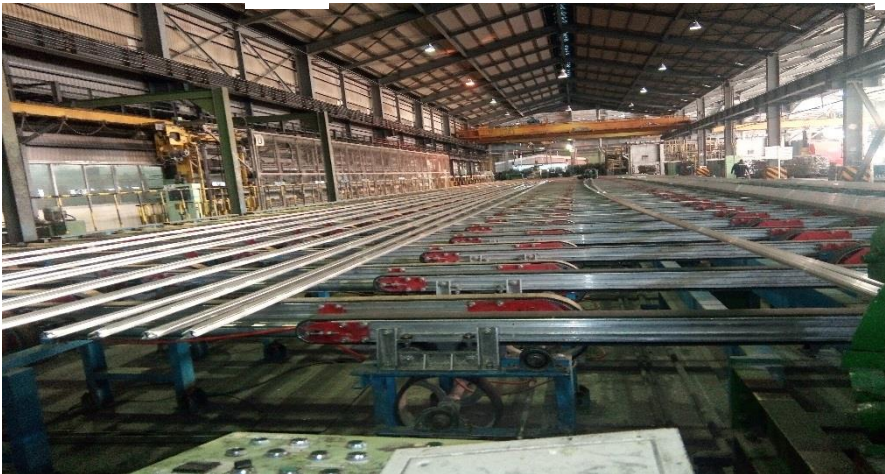
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figure IV.4– Les cinq équipements

## **IV.4.3 Analyses FMD de la presse 1600T**

### **IV.4.3.1 Introduction**

Comme nous l'avons déjà signalé, l'absence des techniques scientifiques facilitant l'utilisation rationnelle des équipements d'une part et le manque d'une politique de maintenance d'autre part, ont un impact direct et néfaste sur la production et la productivité de l'entreprise.

Donc notre travail consiste au traitement et à l'analyse des informations recueillies, ainsi à la détermination du taux de défaillance qui caractérise la fiabilité des systèmes.

### **IV.4.3.2 Etude de la modèle de Weibull**

C'est un modèle statistique particulièrement bien adapté à l'étude statistique de défaillance.

Le modèle de Weibull est très précis car la loi à trois paramètres permettant (ajuster) correctement toutes sortes de résultats expérimentaux et opérationnels.

La loi de Weibull couvre les cas où le taux de défaillance  $\lambda$  est variable et permet d'ajuster au période de jeunesse et aux différentes formes de vieillissement.

Le modèle de Weibull est le plus adapté aux matériels électromécaniques, car il s'adapte bien, aux différentes distributions rencontrées.

Le modèle de Weibull tient compte trois paramètres :

- Paramètre d'échelle  $\eta$
- Paramètre de forme  $\beta$
- Paramètre de localisation (réparation)  $\gamma$

Les éléments nécessaires à l'application du modèle de Weibull sont TBF durée de temps de bon fonctionnement entre deux intervalles consécutif et le nombre de pannes correspondant au TBF A chaque instant  $t$ , nous pouvons déterminer analytiquement ou graphiquement les fonctions liées au comportement du matériel. [6]

L'application de ce modèle nécessite ;

1. **TBF** ; temps de bon fonctionnement entre défaillance.
2. le nombre de panne correspond à **TBF**.

#### IV.4.3.3 Méthode de rangs médians :

On dispose pour nos études de fiabilité d'un certain nombre de données expérimentales ou réelles sur les TBF ; TBF dont on veut étudier la fonction de répartition.

Ces données représentent un échantillon « **n** » de la population que l'on veut appréhender. Elles doivent être classées par ordre croissant de durée (en heures, jours, etc.), suivant l'unité la plus adaptée.

L'estimation de la fonction de densité pour une durée  $t_i$  est donnée par :

$$f(t_i) = \frac{i}{n + 1} \quad (\text{IV.1})$$

Or, ce n'est pas la fonction de densité qui nous intéresse mais la fonction de répartition  $F(t_i)$ . Cette fonction de répartition peut être estimée selon plusieurs méthodes dont 2 sont particulièrement applicables pour les lois de fiabilité (exponentielle et Weibull) : ce sont les méthodes des **rangs médians** et des **rangs moyens**. Le choix entre l'une ou l'autre des méthodes est fonction de la taille « **n** » de l'échantillon. [10].

SI,  $n < 20$ , on utilise la méthode des rangs médians et

$$F(t_i) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (\text{IV.2})$$

SI, on  $n > 20$  utilisé la méthode des rangs moyens et

$$F(t_i) = \frac{i}{n + 1} \quad (\text{IV.3})$$

#### IV.4.3.4 Algorithme d'étude de la loi de Weibull :

##### IV.4.3.4.1 Préparation des données :

- Saisir des données d'exploitation et recensement de TBF
- Tableau de classement par ordre croissant
- Ordre attribué à chaque TBF
- Suivant la taille de l'échantillon  $n$  on calcule  $F_i(t_i)$

##### IV.4.3.4.2 Détermination de la fonction $F_i(t_i)$ :

- **Méthode des rangs moyens :**

On applique cette méthode, si  $50 > n > 20$

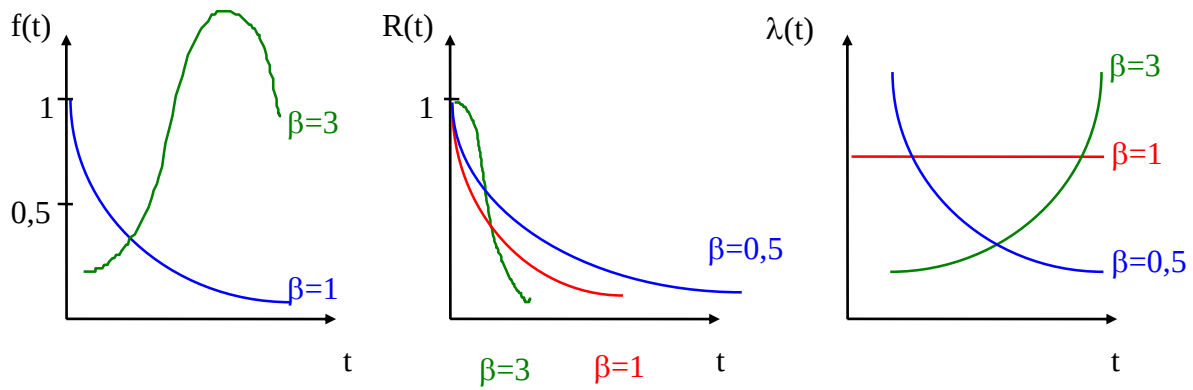
$$F(t) = \frac{\sum ni}{N + 1} \quad (IV.4)$$

##### IV.4.3.4.3 Détermination des paramètres de Weibull :

- **paramètre de forme  $\beta$  :**

C'est un paramètre sans dimension, nous avons vu qu'il détermine la forme de la distribution  $f(t)$  de défaillance d'un système et que sa valeur caractérise chacune des trois phases de la vie d'un système.

- **$\beta < 1$  :** phase de jeunesse avec défaillance de défauts de fabrication ou de montage.
- **$\beta = 1$  :** phase de maturité avec défaillances aléatoires. Ce cas particulier correspond au taux de défaillance constant.
- **$\beta > 1$  :** phase de vieillissement avec apparition d'un mode de défaillance particulier.

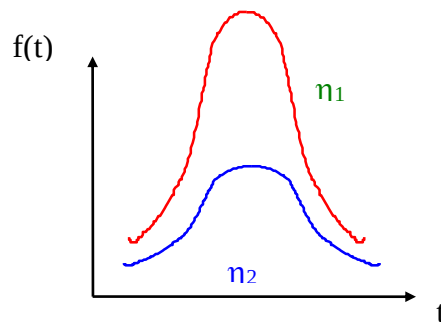


**Remarque :** pour  $\gamma=0$  et  $\beta=1$ , on retrouve la distribution exponentielle, cas particulier de la loi de Weibull :

$$\lambda = \frac{1}{\eta} = \frac{1}{MTBF} \quad (IV.5)$$

- **paramètre d'échelle  $\eta$  :**

Caractérisant le choix d'une échelle, il s'exprime dans la même unité de temps que les TBF



Avec  $\eta_2 < \eta_1$

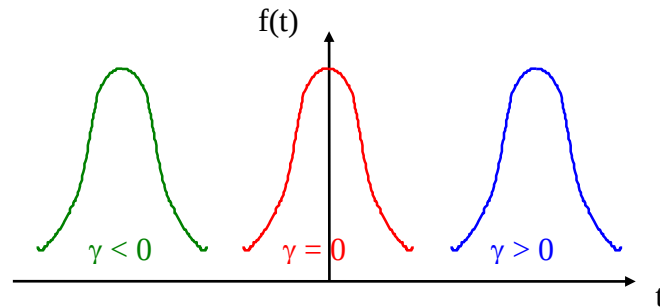
- **paramètre de localisation  $\gamma$  :**

Nommé paramètre de décalage ou de position, il s'exprime en unité de temps, il indique la date de l'apparition du mode de défaillance caractérisé par  $\beta$ .

**Si  $\gamma > 0$  :** il y'a une survie totale à  $t=0$  et  $t=\gamma$

**Si  $\gamma = 0$  :** les défaillances débutent à l'origine de temps

**Si  $\gamma < 0$  :** les défaillances ont débutées avant l'origine des temps relevés, ce qui montre que la mise de l'équipement étudié a précédé la mise en historique de TBF



#### IV.4.3.4.4 Algorithme de calcul de Weibull :

On porte les valeurs de  $F(t)$  sur un graphique spécial gradué .le graphique nous donne les valeurs de  $\beta, \eta, \gamma$  d'où en déduit :  $F(t), R(t), f(t), \lambda(t)$ .

#### Remarque :

Nous calcule les paramètres  $\beta, \eta, \gamma$  à l'aide **logiciel EasyFit**.

On recherche les coefficients liés à  $\beta$  par l'intermédiaire d'une table pour le calcul de différents paramètres ( **$R(t_i)$ ,  $F(t_i)$ ,  $F_{théorie}(t_i)$ ,  $f(t_i)$** )

$$MTBF = A . \eta + \gamma \quad (IV.6)$$

Le tracé est l'application numérique des fonctions  $F(t), R(t), f(t), \lambda(t)$  sont définie par les trois paramètres trouvés.

On peut donc étudier la fiabilité de l'équipement avec les données existantes.

#### IV.4.3.5 Collecte de données

Le retour d'expériences relatives aux la presse a été obtenu par confrontation de plusieurs sources (fiches historiques, rapports d'intervention). Sachant que la précision d'une étude de fiabilité se mesure par le nombre de données collectées, nous avons dépouillé les différents fichiers cités ci-dessus, pour la période allant de 2017 à 2019. Nous aurions aimé pour plus d'exactitude rallonger la période d'observation, mais vue que la recherche ne peut être faite que manuellement, donc la recherche est longue, fastidieuse et présente un grand risque d'erreurs. , Le tableau suivant c'est une **1/9** pages de l'historique de pannes de la presse 1600T

depuis l'année 2017 jusqu'à 2019, (2019 uniquement 2 mois) L'exploitation de ces différentes fiches, nous a permis de prélever les heures et les dates du début et fin de défaillance.

Table IV.2 — Historique des pannes des 5 équipements.

| Mois    | jour     | DESCRIPTION                  | H Début  | H Fin    | Durée de pannes (H) |
|---------|----------|------------------------------|----------|----------|---------------------|
| janvier | 02.01.17 | Four a billettes             | 0:45:00  | 1:30:00  | 0:45                |
|         | 03.01.17 | Four a billettes             | 3:05:00  | 3:30:00  | 0:25                |
|         | 04.01.17 | Tracteur de filage           | 12:40:00 | 12:45:00 | 0:50                |
|         | 09.01.17 | Tracteur de filage           | 6:35:00  | 10:50:00 | 4:15                |
|         | 10.01.17 | Tracteur de filage           | 14:45:00 | 16:25:00 | 1:00                |
|         |          | Four a billettes             | 20:10:00 | 20:50:10 | 0:40                |
|         | 11.01.17 | Four a billettes             | 10:00:00 | 10:03:00 | 0:30                |
|         | 15.01.17 | Tracteur de filage           | 7:45:00  | 8:20:00  | 0:35                |
|         | 19.01.17 | Four a billettes             | 9:10:00  | 10:05:00 | 0:55                |
|         | 25.01.17 | Four a billettes             | 17:15:00 | 18:00:00 | 0:45                |
|         |          | Tracteur de filage           | 21:35:00 | 22:00:00 | 0:25                |
|         | 26.01.17 | Four a billettes             | 11:45:00 | 11:46:00 | 0:10                |
|         | 30.01.17 | Table de refroidissement     | 9:25:00  | 11:00:00 | 1:35                |
| février | 05.02.17 | Four a billettes             | 13:20:00 | 13:55:00 | 0:35                |
|         | 15.02.17 | Cisaille à billettes à chaud | 11:30:00 | 11:45:00 | 0:15                |
|         |          | Tracteur de filage           | 14:05:00 | 14:55:00 | 0:50                |
|         | 16.02.17 | Tracteur de filage           | 9:35:00  | 12:25:00 | 2:50                |
|         | 21.02.17 | Four a billettes             | 17:45:00 | 18:25:00 | 0:40                |
|         |          | Table de refroidissement     | 19:33:00 | 20:02:00 | 0:29                |
|         | 22.02.17 | Tracteur de filage           | 19:10:00 | 21:05:00 | 1:55                |
|         | 23.02.17 | Four a billettes             | 8:20:00  | 12:20:00 | 4:00                |
|         | 27.02.17 | Tracteur de filage           | 21:04:00 | 21:44:00 | 0:40                |
|         | 28.02.17 | Four a billettes             | 11:30:00 | 12:10:00 | 0:40                |

#### IV.4.4 Modélisation paramétrique de lois de fiabilité

Les seuls éléments qui tombent fréquemment en panne, les cinq equipments.

Soit  $\{T\}$   $t > 0$  la variable aléatoire désignant "la durée de bon fonctionnement d'Equipment.

Table IV.3 — Nomenclature des 5 équipements.

|                      |                                     |
|----------------------|-------------------------------------|
| <b>E<sub>1</sub></b> | <b>Cisaille à billettes à chaud</b> |
| <b>E<sub>2</sub></b> | <b>Four à billettes</b>             |
| <b>E<sub>3</sub></b> | <b>Tracteur de filage</b>           |
| <b>E<sub>4</sub></b> | <b>Table de chargement</b>          |
| <b>E<sub>5</sub></b> | <b>Table de refroidissement</b>     |

Nous avons choisi la loi de Weibull [4] car elle est largement utilisée comme modèle probabiliste dans des études sur les temps de survie en raison de sa grande flexibilité. Nous avons estimé ces trois paramètres par le logiciel **Easyfit** et nous avons fait l'ajustement avec le test de Kolmogorov-Smirnov avec le même logiciel.

- **Cisaille à billettes à chaud (E<sub>1</sub>):**

Paramètres de la Loi de Weibull avec Gamma : (Résultat du logiciel)

- $\beta = 0,71842$ .
- $\eta = 422,27$  (H).
- $\gamma = 0$ .
- MTBF = 632 (H).
- Ecart maximum (Dn) : 0,097292314 ; d de Kolmogorov : 0,4800

$D_n < d$  de Kolmogorov c'est-à-dire **la Loi acceptable**.

Estimation des paramètres de la loi de Weibull ( $\eta, \beta, \gamma$ ) :

$\beta = 0,71842 \Rightarrow A = 1.2638$  et  $B = 1.850$  (des coefficients liée à  $\beta$ )

Nous obtenue cette valeurs à l'aide table de Smirnov Kolmogorov (voir l'annexe A).

**Pour les' autres équipements :**

Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

(Dn) : statistique empirique de test de Kolmogorov-Smirnov ;

$d_{(n, 0.05)}$  : statistique tabulée du test de Kolmogorov-Smirnov avec un seuil signification égal à **0,05** (voir l'annexe).

**Table IV.4 — Résultats du test pour les 5 équipements.**

| L'Équipement         | $n$        | Loi ajustée | paramètres                              | $D_n$              | $d_{(n, 0.05)}$ | Validité du test |
|----------------------|------------|-------------|-----------------------------------------|--------------------|-----------------|------------------|
| <b>E<sub>1</sub></b> | <b>24</b>  | Weibull     | $\beta=0.7184, \eta=422.27, \gamma=0.$  | <b>0.097292314</b> | <b>0.4800</b>   | Accepté          |
| <b>E<sub>2</sub></b> | <b>102</b> | Weibull     | $\beta= 1.0607, \eta=151.41, \gamma=0$  | <b>0.097023627</b> | <b>0.1713</b>   | Accepté          |
| <b>E<sub>3</sub></b> | <b>95</b>  | Weibull     | $\beta=0.9570, \eta=128.34, \gamma=0$   | <b>0.206667068</b> | <b>0.2553</b>   | Accepté          |
| <b>E<sub>4</sub></b> | <b>43</b>  | Weibull     | $\beta 0.9491, \eta= 241.72, \gamma=0.$ | <b>0,11728147</b>  | <b>0,3205</b>   | Accepté          |
| <b>E<sub>5</sub></b> | <b>26</b>  | Weibull     | $\beta=1.0494, \eta= 22.136, \gamma=0.$ | <b>0,155908453</b> | <b>0,5140</b>   | Accepté          |

#### **IV.4.4.1 Evaluation des fonctions de fiabilité et du taux de défaillances des cinq équipements**

Basant sur l'échantillon qui présente les temps de bon fonctionnement d'équipement et on traite cet échantillon avec **Microsoft Excel**.

Le tableau suivant présente le calcul de différents paramètres (**R (t<sub>i</sub>)**, **F (t<sub>i</sub>)**, **F<sub>théorie</sub> (t<sub>i</sub>)**, **f (t<sub>i</sub>)**) pour Cisaille à billettes à chaud (**E<sub>1</sub>**).

#### **Remarque :**

Pour consulter les tableaux de calcul des autres équipements voir l'**annexe A**

Table IV.5 – le calcul de différents paramètres (R (ti), F (ti), F théorie (ti), f (ti)) pour (E1).

| Rang | TBF(H) | ni | $\sum ni$ | F (ti)<br>théorie | F (ti)  | $\beta$ | $\eta$ | $\gamma$ | R (ti)  | $\lambda$ (ti) | f(ti)   | Dni       |
|------|--------|----|-----------|-------------------|---------|---------|--------|----------|---------|----------------|---------|-----------|
| 1    | 15     | 2  | 1         | 0.0385            | 0.08691 | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.91309 | 0.00435        | 0.00398 | 0.0484461 |
| 2    | 28     | 1  | 3         | 0.1154            | 0.13269 | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.86731 | 0.00365        | 0.00317 | 0.0173072 |
| 3    | 40     | 1  | 4         | 0.1538            | 0.16801 | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.83199 | 0.0033         | 0.00275 | 0.0141679 |
| 4    | 54     | 1  | 5         | 0.1923            | 0.20403 | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.79597 | 0.00304        | 0.00242 | 0.0117248 |
| 5    | 62     | 1  | 6         | 0.2308            | 0.22276 | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.77724 | 0.00292        | 0.00227 | 0.0080081 |
| 6    | 66     | 1  | 7         | 0.2692            | 0.23171 | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.76829 | 0.00287        | 0.0022  | 0.0375233 |
| 7    | 70     | 1  | 8         | 0.3077            | 0.2404  | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.7596  | 0.00282        | 0.00214 | 0.0672904 |
| 8    | 74     | 1  | 9         | 0.3462            | 0.24886 | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.75114 | 0.00278        | 0.00209 | 0.0972923 |
| 9    | 157    | 1  | 10        | 0.3846            | 0.38814 | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.61186 | 0.00225        | 0.00138 | 0.0035229 |
| 10   | 158    | 1  | 11        | 0.4231            | 0.38951 | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.61049 | 0.00224        | 0.00137 | 0.033566  |
| 11   | 166    | 1  | 12        | 0.4615            | 0.4003  | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.5997  | 0.00221        | 0.00133 | 0.0612414 |
| 12   | 223    | 1  | 13        | 0.5000            | 0.46853 | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.53147 | 0.00204        | 0.00108 | 0.0314692 |
| 13   | 270    | 1  | 14        | 0.5385            | 0.51578 | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.48422 | 0.00193        | 0.00093 | 0.0226844 |
| 14   | 334    | 1  | 15        | 0.5769            | 0.57042 | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.42958 | 0.00182        | 0.00078 | 0.0064999 |
| 15   | 515    | 1  | 16        | 0.6154            | 0.6844  | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.3156  | 0.00161        | 0.00051 | 0.0690199 |
| 16   | 661    | 1  | 17        | 0.6538            | 0.74837 | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.25163 | 0.0015         | 0.00038 | 0.0945221 |
| 17   | 700    | 1  | 18        | 0.6923            | 0.76255 | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.23745 | 0.00148        | 0.00035 | 0.070243  |
| 18   | 777    | 1  | 19        | 0.7308            | 0.7877  | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.2123  | 0.00143        | 0.0003  | 0.0569283 |
| 19   | 936    | 1  | 20        | 0.7692            | 0.82993 | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.17007 | 0.00136        | 0.00023 | 0.0606959 |
| 20   | 969    | 1  | 21        | 0.8077            | 0.83735 | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.16265 | 0.00135        | 0.00022 | 0.0296613 |
| 21   | 1009   | 1  | 22        | 0.8462            | 0.84583 | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.15417 | 0.00133        | 0.00021 | 0.0003191 |
| 22   | 1571   | 1  | 23        | 0.8846            | 0.92346 | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.07654 | 0.00118        | 9E-05   | 0.0388433 |
| 23   | 3369   | 1  | 24        | 0.9231            | 0.98827 | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.01173 | 0.00095        | 1.1E-05 | 0.0651955 |
| 24   | 3567   | 1  | 25        | 0.9615            | 0.99026 | 0.71842 | 422.27 | 0        | 0.00974 | 0.00093        | 9.1E-06 | 0.0287263 |
| MTBF | 658    |    |           |                   |         |         |        |          |         |                |         |           |

Les expressions de la fonction fiabilité ainsi que le taux de défaillance et la fonction de répartition après validation du modèle de Weibull, s'écrivent pour Cisaille à billettes à chaud (**E1**) sous forme suivante

*Calcul de la fiabilité :*

$$R(x) = e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}, x \geq 0. \quad (\text{IV.14})$$

$$\text{MUT} = \gamma + A. \eta$$

$$= 0 + 1.0234. 128,34 = 131,343\text{h}$$

**MUT** : *Mean Up Time*, correspond à la durée moyenne de la défaillance de bon fonctionnement après réparation du système.

Taux de défaillance :

$$(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (\text{IV.15})$$

$$R(t = \text{MUT}) = e^{-\left[\frac{(131,343-0)}{128,34}\right]^{0,95696}}$$

$$R(t = \text{MUT}) = \mathbf{0,3597}.$$

*Calcul de la probabilité de défaillance :*

Fonction de répartition :

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}, x \geq 0. \quad (\text{IV.12})$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - 0.3597 = \mathbf{0.6403}$$

Cela veut dire qu'il y a **64.03** chances sur 100 pour que l'**E1** tombe en panne au-delà de **131.343 h**.

**Pour les' autres équipements :**

Le tableau suivant illustre la fonction de fiabilité ainsi que le taux de défaillance et la fonction de répartition ;

Table IV.6 —Le  $\lambda(t)$ , la  $R(t)$  et la  $F(t)$  des 5 équipements.

| L'Equipment          | Taux de défaillance $\lambda(t)$ | Fiabilité $R(t)$ | Fonction de répartition $F(t)$ |
|----------------------|----------------------------------|------------------|--------------------------------|
| <b>E<sub>1</sub></b> | <b>0.00002533</b>                | <b>0,3063</b>    | <b>0,6937</b>                  |
| <b>E<sub>2</sub></b> | <b>0,00011038</b>                | <b>0,3756</b>    | <b>0,6244</b>                  |
| <b>E<sub>3</sub></b> | <b>0,00010893</b>                | <b>0,3597</b>    | <b>0,6403</b>                  |
| <b>E<sub>4</sub></b> | <b>0,00005192</b>                | <b>0,3598</b>    | <b>0,6402</b>                  |
| <b>E<sub>5</sub></b> | <b>0,00072464</b>                | <b>0,3757</b>    | <b>0,6243</b>                  |

#### IV.4.5 Probabilité de défaillance de la presse 1600T

Sur la base des résultats, nous concluons que probabilité de défaillance des équipements de la zone A reflète de manière significative la probabilité de défaillance du presse dans son ensemble et le système monté on série.

Donc :

$$R_{\text{presse}}(t) = R_{E1}(t) * R_{E2}(t) * R_{E3}(t) * R_{E4}(t) * R_{E5}(t)$$

$$R_{\text{presse}}(t) = 0,3063 * 0,3756 * 0,3597 * 0,3598 * 0,3757 = \mathbf{0.005593}$$

On a :

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

$$F_{\text{presse}}(t) = 1 - R_{\text{presse}}(t) = 1 - 0.005593 = \mathbf{0.9944}$$

Cela veut dire qu'il y a **99,44** chances sur 100 que la presse défaille au-delà de **temps d'ouverture**.

**Remarque :** La probabilité de défaillance est jugée **très élevée**. Un moyen pour réduire de la probabilité de défaillance de cette Presse reste l'outil 5M pour analyser les causes de défaillance.

#### IV.4.5.1 Calcul la maintenabilité et la disponibilité des cinq équipements

##### Cisaille à billettes à chaud (E<sub>1</sub>)

La maintenabilité :

La fonction de maintenabilité est donnée par la relation suivante :

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

Le taux de réparation  $\mu$  est exprimé par :

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

Avec :

$$MTTR = \frac{\sum TTR}{N^{\circ}} = 95 \text{ (min)}$$

$$\mu = 0,010526315$$

La disponibilité :

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (\text{IV.2})$$

Avec :

$$MTBF = 39480 \text{ (min)}$$

$$MTTR = 95 \text{ (min)}$$

Alors :

$$D = \frac{39480}{39480 + 95} = 0,9975$$

##### Disponibilité intrinsèque au asymptotique

L'utilisation de la formule suivante permet de calculer la disponibilité intrinsèque :

$$D(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)TTR} \quad (\text{IV.3})$$

Le tableau suivant montre le calcul de la maintenabilité et la disponibilité (**M (t)**, **D (t)**) pour Cisaille à billettes à chaud (**E<sub>1</sub>**).

**Remarque :**

Pour consulter les tableaux de calcul des les autres équipements voir **l'annexe A**

**Table IV.7 —  $\mu$  (t), M(t) et D(t) de E<sub>1</sub>.**

| N° | TTR (min) | $\mu$   | M(t)  | D(t)  |
|----|-----------|---------|-------|-------|
| 1  | 10        | 0.01051 | 0.1   | 1.000 |
| 2  | 15        | 0.01051 | 0.146 | 1.000 |
| 3  | 15        | 0.01051 | 0.146 | 1.000 |
| 4  | 15        | 0.01051 | 0.146 | 1.000 |
| 5  | 20        | 0.01051 | 0.19  | 1.000 |
| 6  | 20        | 0.01051 | 0.19  | 1.000 |
| 7  | 20        | 0.01051 | 0.19  | 1.000 |
| 8  | 20        | 0.01051 | 0.19  | 1.000 |
| 9  | 30        | 0.01051 | 0.27  | 0.999 |
| 10 | 35        | 0.01051 | 0.308 | 0.999 |
| 11 | 45        | 0.01051 | 0.377 | 0.999 |
| 12 | 45        | 0.01051 | 0.377 | 0.999 |
| 13 | 50        | 0.01051 | 0.409 | 0.999 |
| 14 | 60        | 0.01051 | 0.468 | 0.999 |
| 15 | 75        | 0.01051 | 0.545 | 0.999 |
| 16 | 85        | 0.01051 | 0.591 | 0.999 |
| 17 | 85        | 0.01051 | 0.591 | 0.999 |
| 18 | 110       | 0.01051 | 0.685 | 0.998 |
| 19 | 120       | 0.01051 | 0.717 | 0.998 |
| 20 | 150       | 0.01051 | 0.793 | 0.998 |
| 21 | 170       | 0.01051 | 0.832 | 0.998 |
| 22 | 175       | 0.01051 | 0.841 | 0.998 |
| 23 | 200       | 0.01051 | 0.878 | 0.998 |
| 24 | 240       | 0.01051 | 0.92  | 0.998 |
| 25 | 290       | 0.01051 | 0.953 | 0.998 |
| 26 | 375       | 0.01051 | 0.981 | 0.998 |

**Table IV.8 —  $\lambda(t)$ ,  $R(t)$  et  $F(t)$  des 5 équipements.**

| L'Equipment          | Taux de<br>réparation $\mu(t)$ | Maintenabilité $M(t)$ | Disponibilité $D(t)$ |
|----------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------|
| <b>E<sub>1</sub></b> | <b>0.0105051</b>               | <b>0,6315499</b>      | <b>0,9975</b>        |
| <b>E<sub>2</sub></b> | <b>0,0105263</b>               | <b>0,6321205</b>      | <b>0,9896</b>        |
| <b>E<sub>3</sub></b> | <b>0,0054347</b>               | <b>0,6319321</b>      | <b>0,9803</b>        |
| <b>E<sub>4</sub></b> | <b>0,0192307</b>               | <b>0,6321205</b>      | <b>0,9973</b>        |
| <b>E<sub>5</sub></b> | <b>0,0117847</b>               | <b>0,6338330</b>      | <b>0,9419</b>        |

## IV.5 Les courbes des cinq équipements

Les figures suivantes représentent les allures de différents équipements obtenus par Matlab ;

### IV.5.1 Cisaille à billettes à chaud

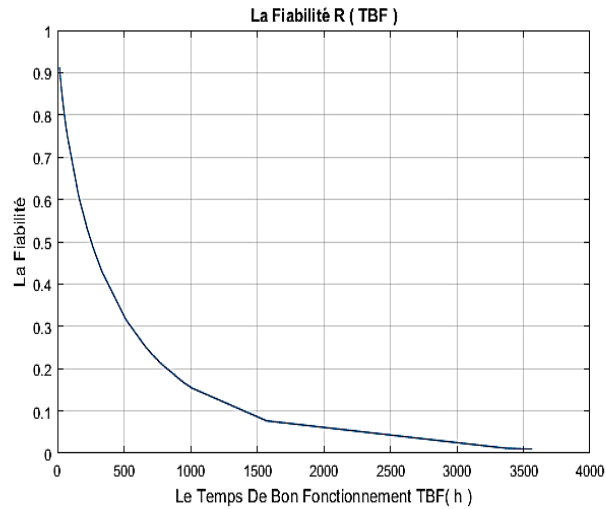


Figure IV.5–La Fiabilité de cisaille à billettes à chaud

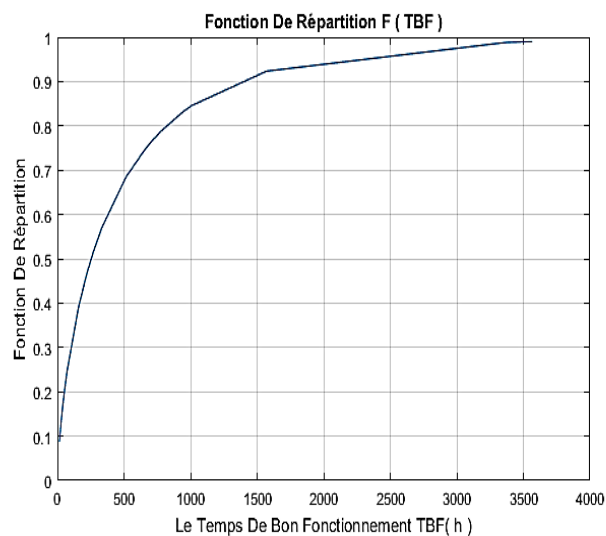
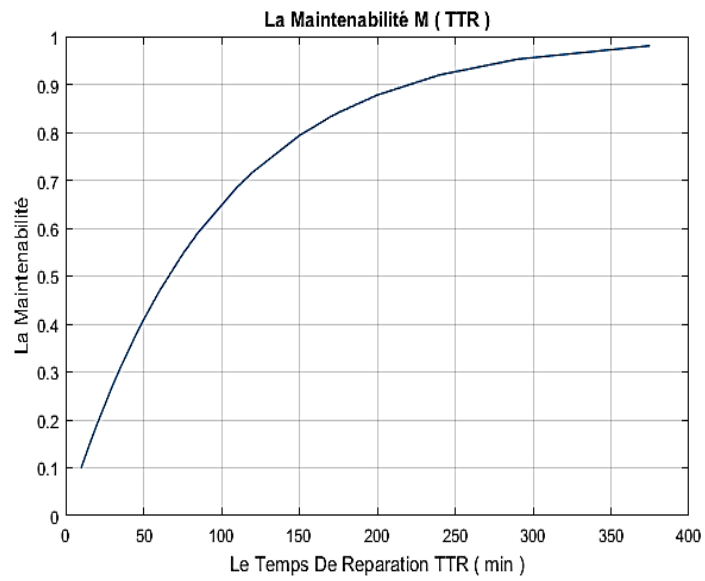
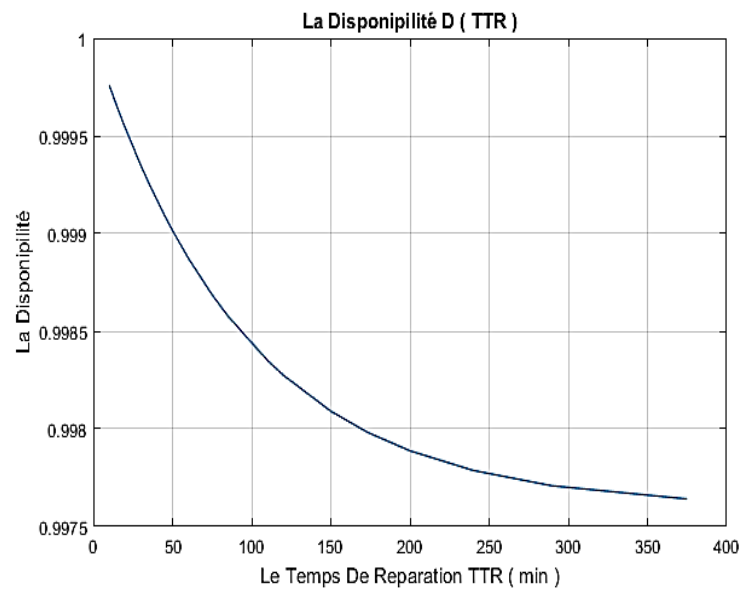


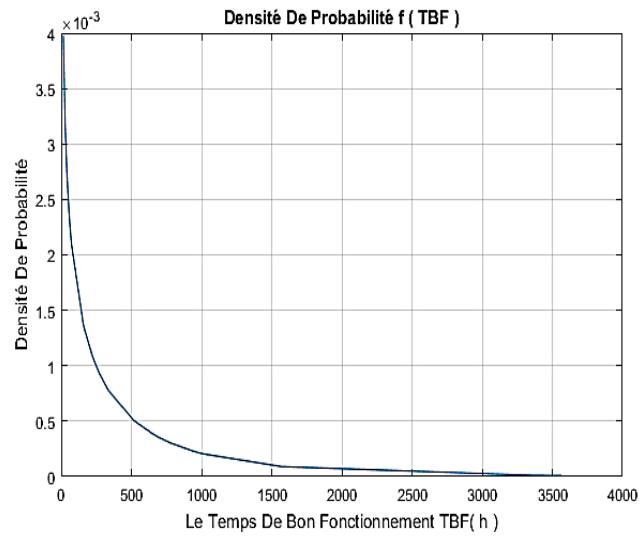
Figure IV.6–La Fonction de répartition de cisaille à billettes à chaud



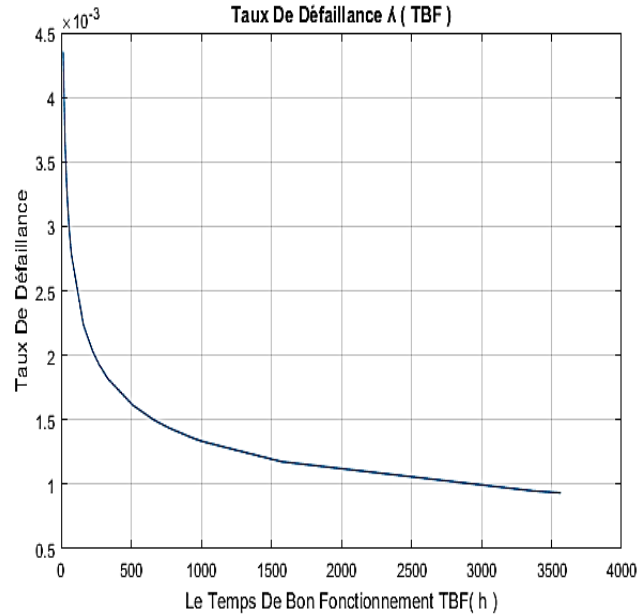
**Figure IV.7– La maintenabilité de cisaille à billettes à chaud**



**Figure IV.8–La disponibilité de cisaille à billettes à chaud**



**Figure IV.9–La densité de probabilité de cisaille à billettes à chaud**



**Figure IV.10–Le Taux de défaillance de cisaille à billettes à chaud**

## IV.5.2 Four à billettes

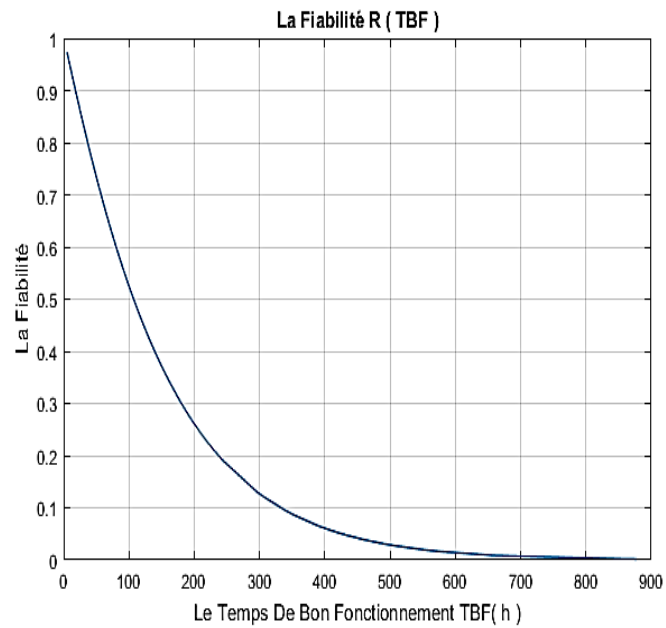


Figure IV.11–La fiabilité de four à billettes

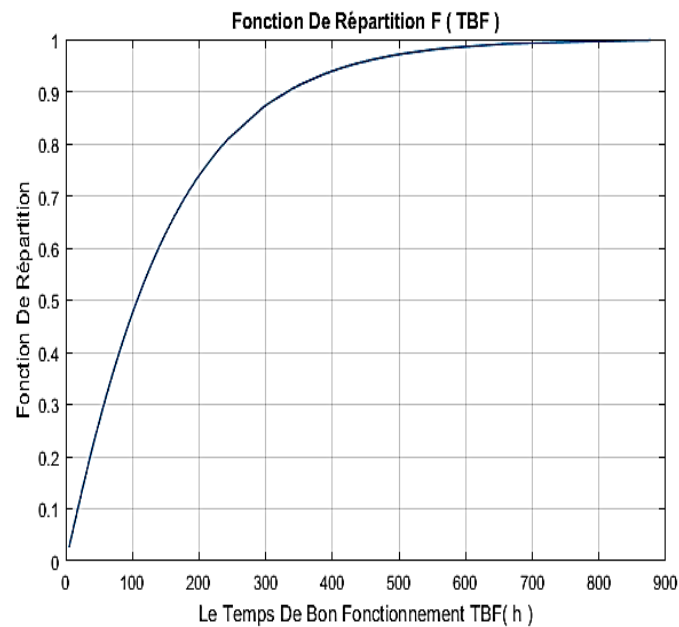


Figure IV.12–La fonction de répartition de four à billettes

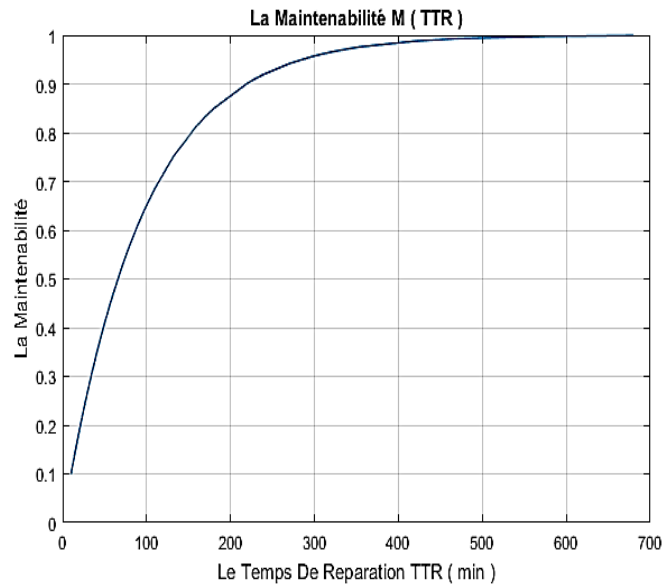


Figure IV.13–La Maintenabilité de four à billettes

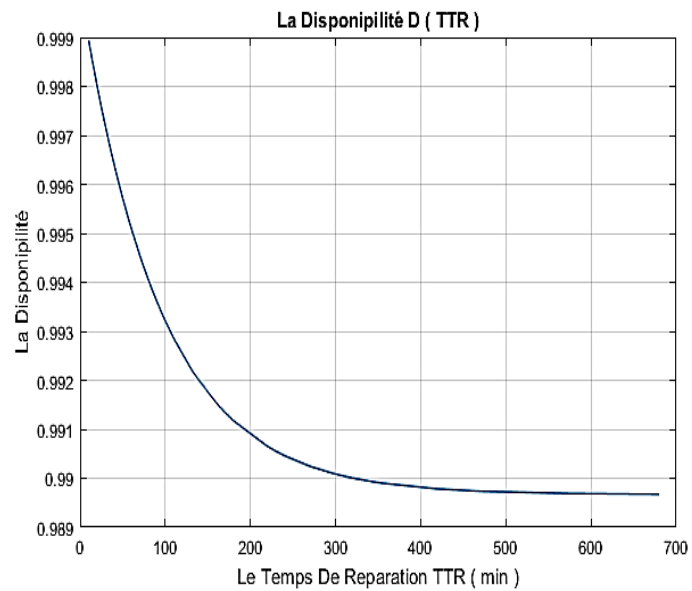


Figure IV.14–La Disponibilité de four à billettes

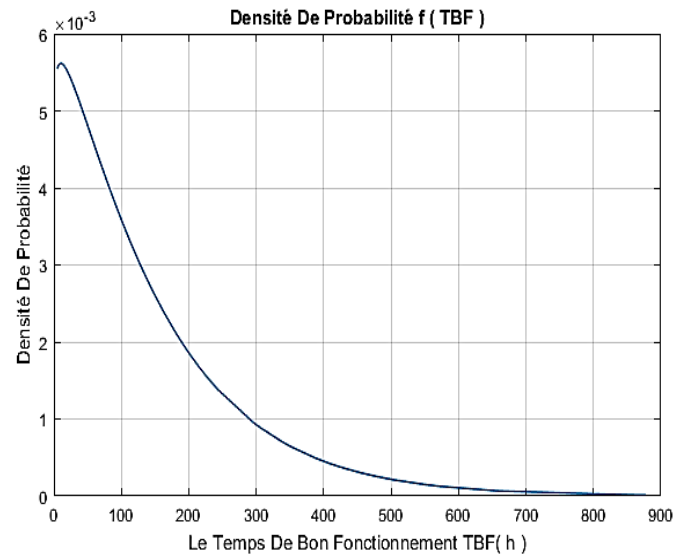


Figure IV.15–La Densité de probabilité de four à billettes

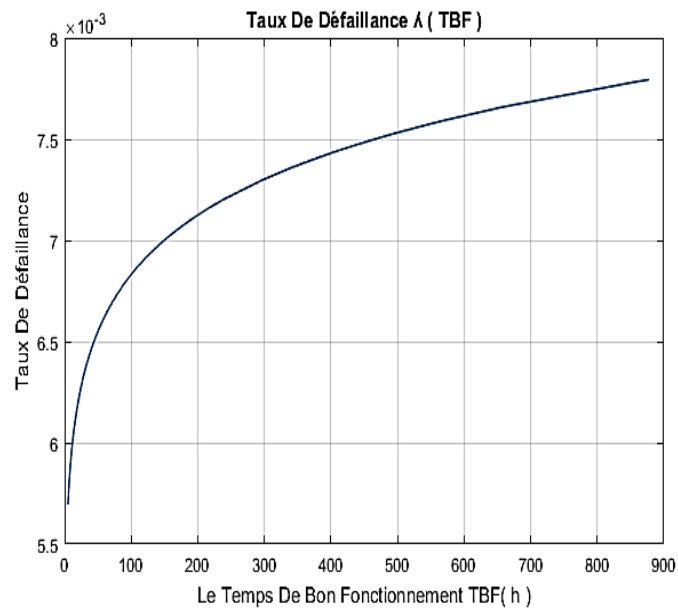


Figure IV.16–Le Taux de défaillance de four à billettes

### IV.5.3 Tracteur de filage

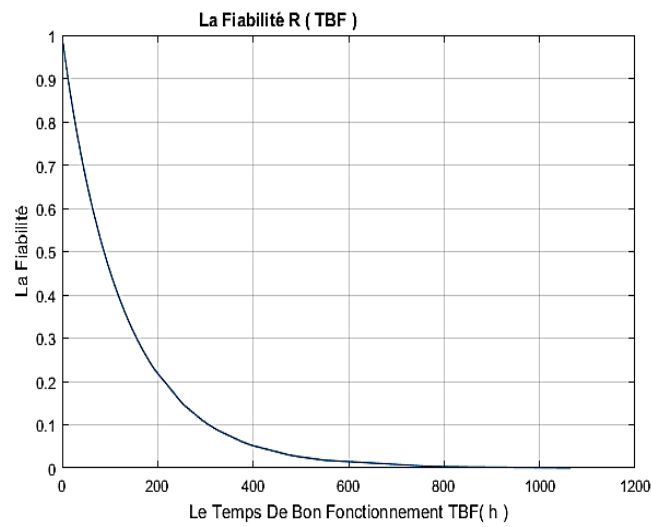


Figure IV.17– La Fiabilité de tracteur de filage

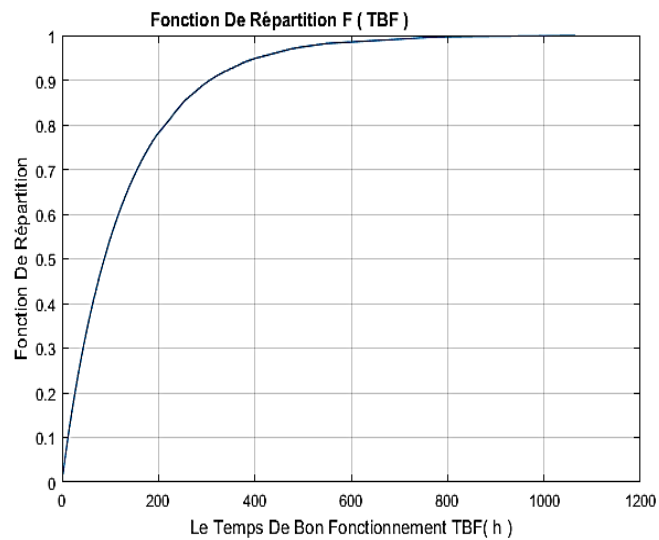


Figure IV.18– La Fonction de répartition de tracteur de filage

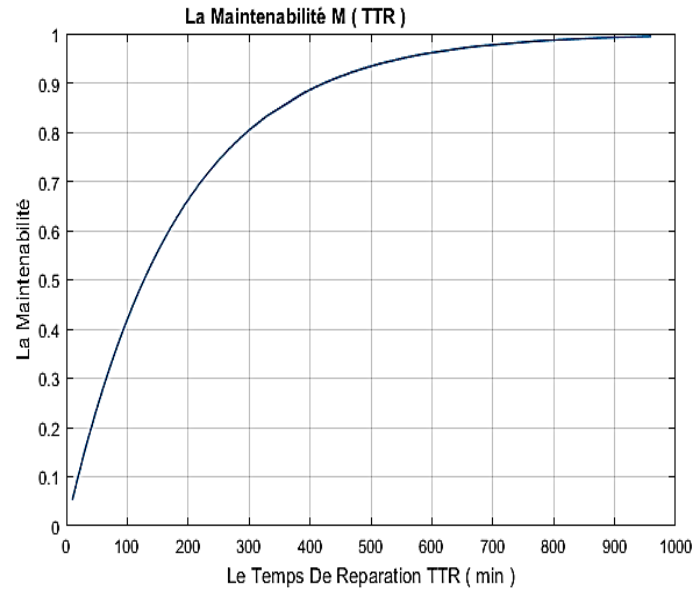


Figure IV.19– La Maintenabilité de tracteur de filage

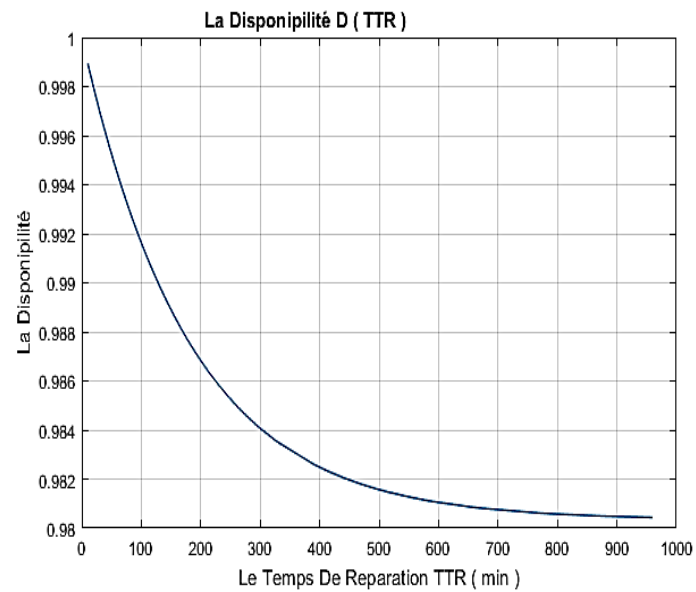


Figure IV.20– La Disponibilité de tracteur de filage

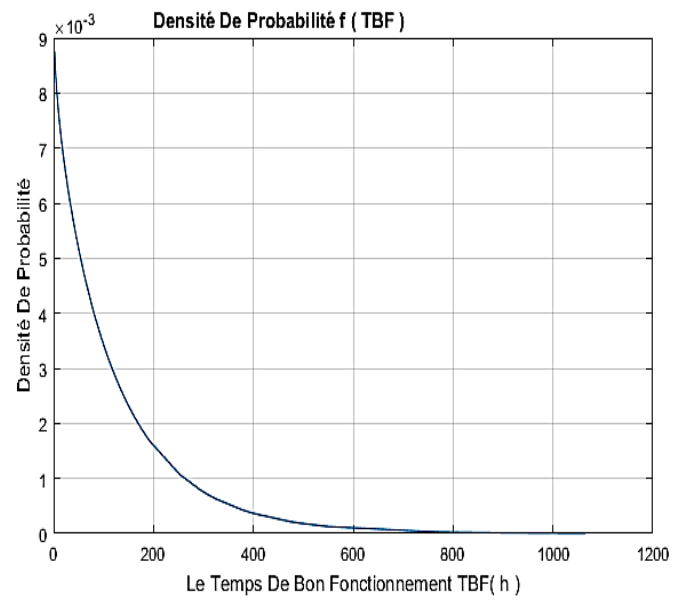


Figure IV.21–La Densité de probabilité de tracteur de filage

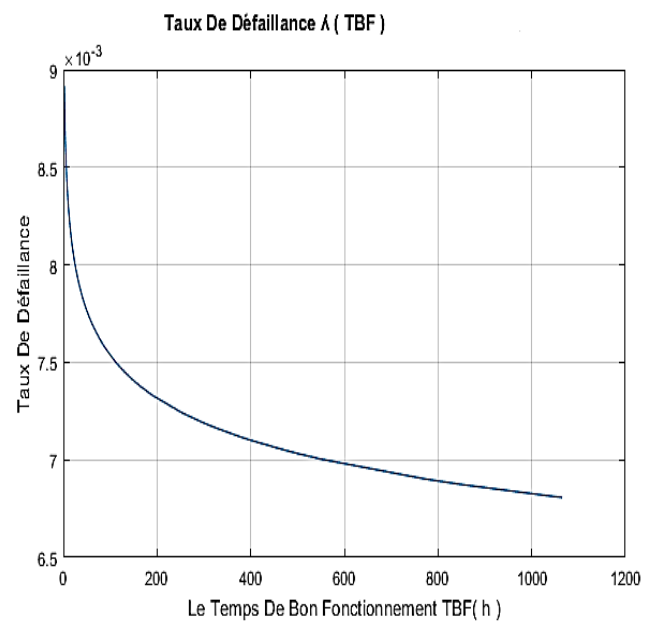


Figure IV.22–Le Taux de défaillance de tracteur de filage

## IV.5.4 Table de refroidissement

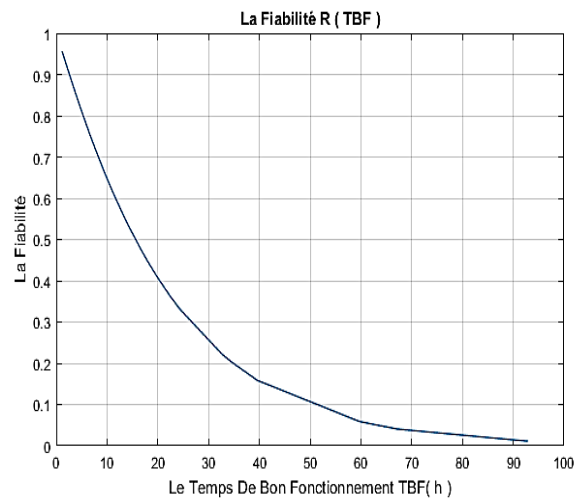


Figure IV.23– La Fiabilité de table de refroidissement

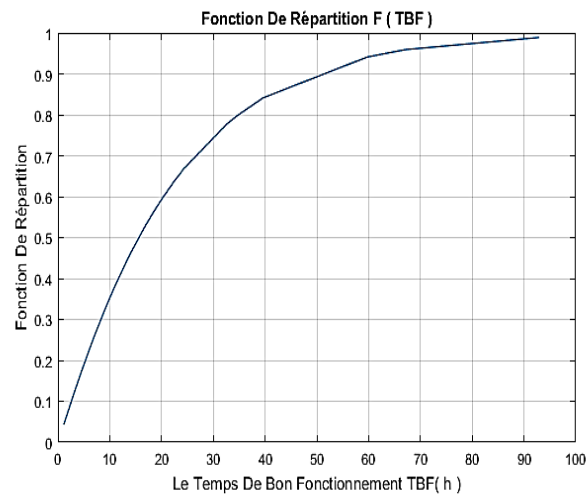


Figure IV.24– La Fonction de répartition de table de refroidissement

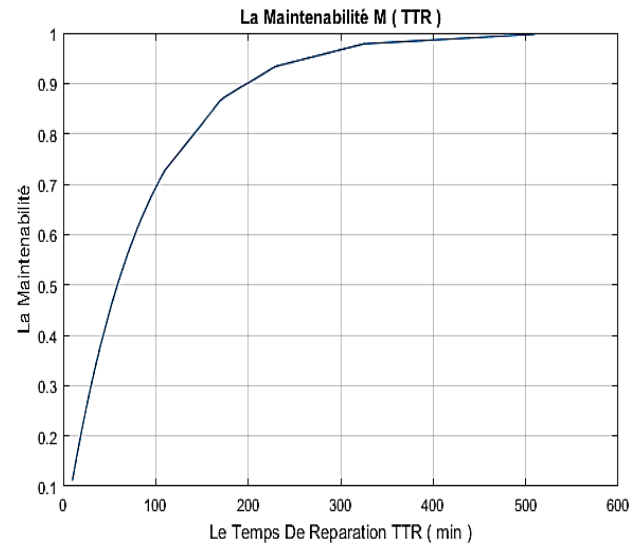


Figure IV.25– La Maintenabilité de table de refroidissement

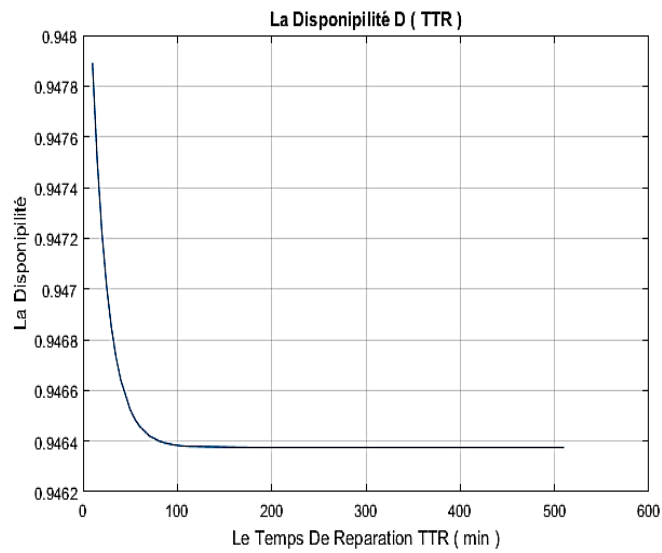


Figure IV.26– La Disponibilité de table de refroidissement

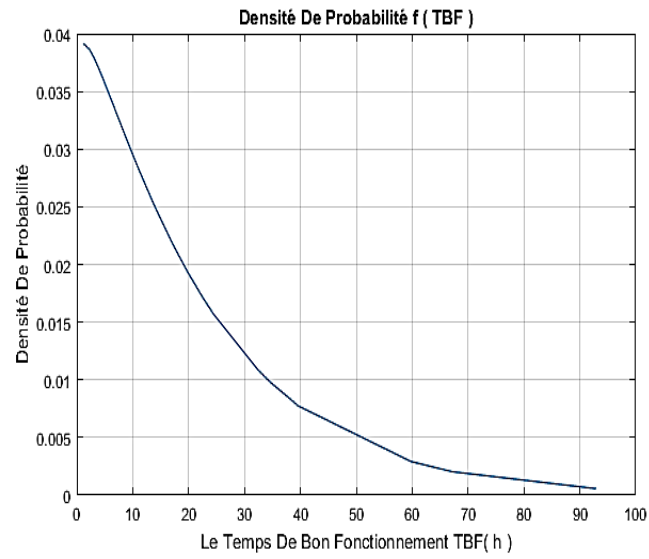


Figure IV.27– La Densité de probabilité de table de refroidissement

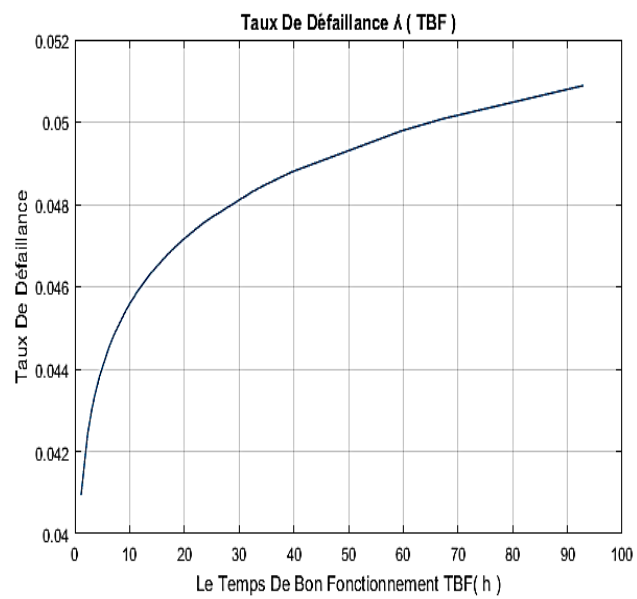


Figure IV.28– Le Taux de défaillance de table de refroidissement

### IV.5.5 Table de chargement

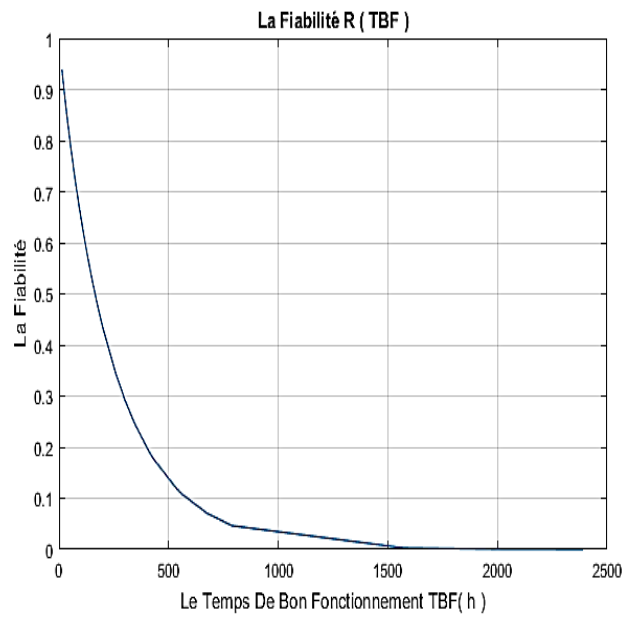


Figure IV.29– La Fiabilité de table de chargement

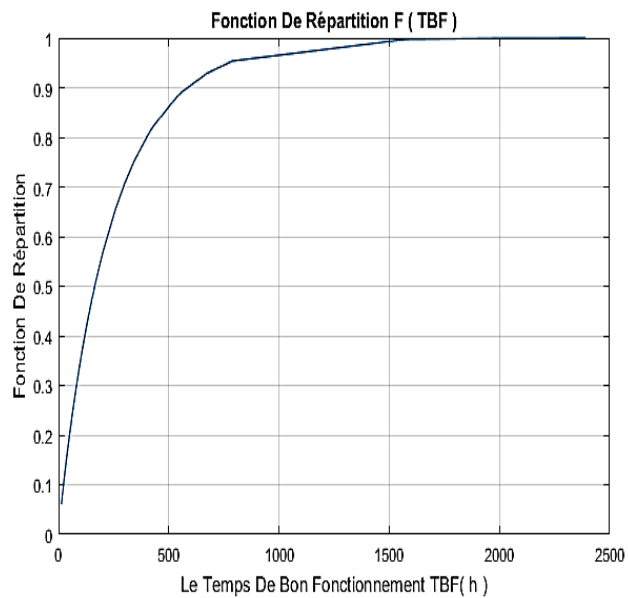


Figure IV.30– La Fonction de répartition de table de chargement

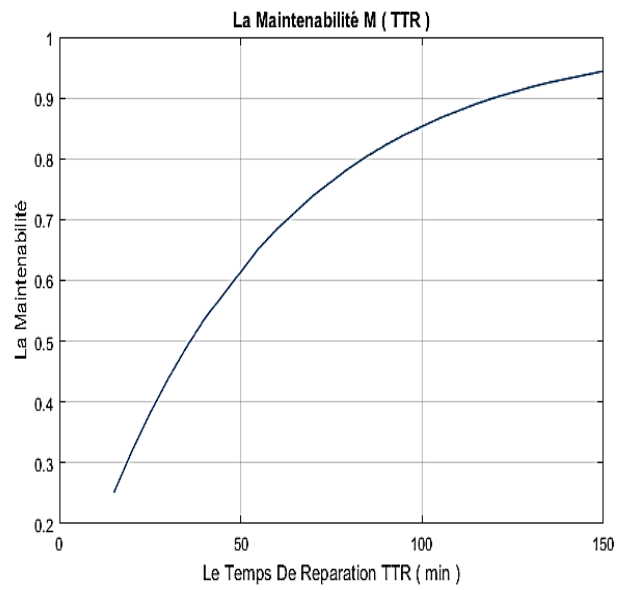


Figure IV.31– La Maintenabilité de table de chargement

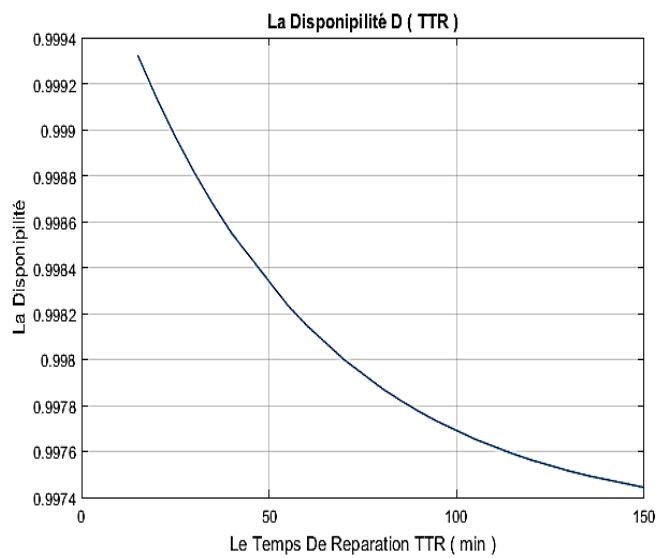


Figure IV.32– La Disponibilité de table de chargement

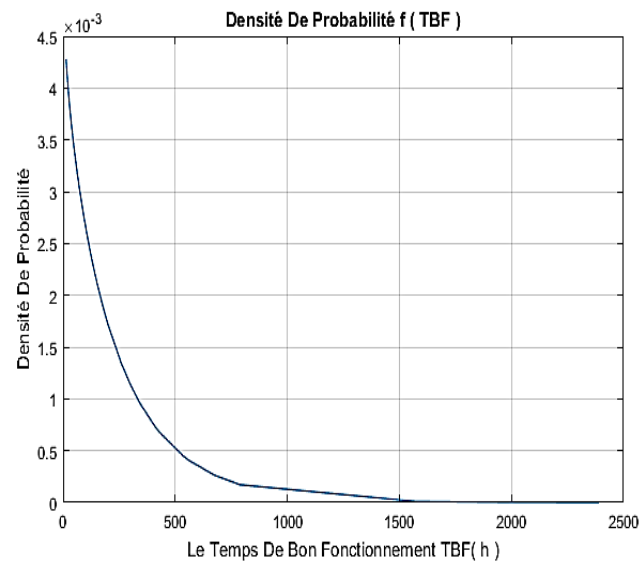


Figure IV.33– La Densité de probabilité de table de chargement

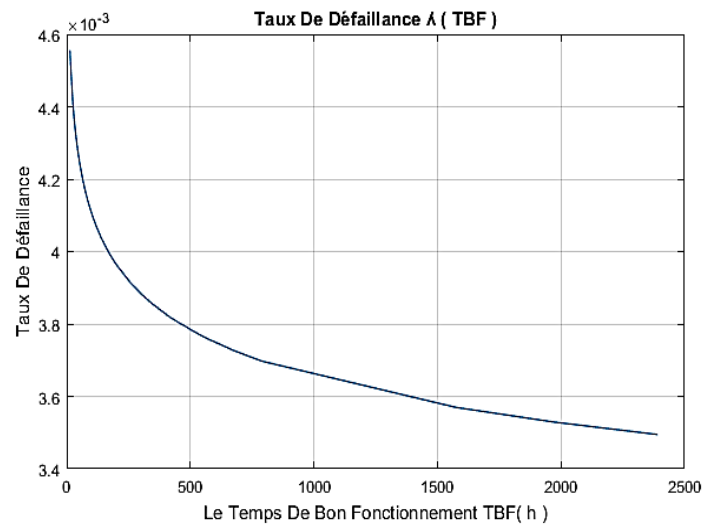


Figure IV.34– Le Taux de défaillance de table de chargement

## IV.6 Recommandations

Les dégâts énormes sur la structure du tracteur de filage (puller) causés par le choc du démarrage et le freinage brusque lors d'un déplacement dans les deux sens. La figure suivante illustre la déformation de structure de cet équipement :



Figure IV.35 - Déformation de la structure de la Tracteur

A travers les résultats obtenus, nous proposons les deux solutions suivantes :

- La première solution est de changer de système de commande (tambour, câble) avec un nouveau système (Rack, Pinon).
- La deuxième solution est de garder le même système et ajouter un démarreur progressif pour contrôler la vitesse de Tracteur.

L'équipe de maintenance de l'entreprise lance une construction d'un nouvel extracteur pour traiter ce problème.

La figure suivante représente les deux solutions avec : (A) : Tambour, Câble (B) : Rack, Pinon (C) : Démarreur progressif (D) : Nouvelle extracteur.



Figure IV.36- Les trois solutions

Dans le but d'améliorer le taux brut de fonctionnement, nous proposons les actions d'amélioration suivantes :

- Organiser la zone d'extrusion et gagner un espace de travail confortable pour l'intervention a courte terme, ce qui augmente l'efficacité de travail et réduit les temps de réglage.
- Etablir une fiche de réglage et de maintenance corrective pour éclaircir et assouplir les interventions.

Le taux de performance est influencé par les micros-arrêts et les baisses de cadence. Pour améliorer ce taux, nous avons proposé les actions suivantes :

- Réaliser une fiche d'auto-maintenance pour maitriser les réglages, et réduire la fréquence de micro-arrêts
- Réaliser une maintenance préventive afin d'augmenter la cadence des machine

## IV.7 Conclusion

D'après l'étude statistique appliquée sur la presse, nous avons calculé les temps de bon fonctionnement (TBF) pour estimer la fiabilité de chaque composant de la presse. Le calcul de paramètre  $\beta$  pour chaque composant est pris à peu près la valeur 1, c'est à dire que la presse est dans l'époque de maturité.

L'application du test de KOLMOGOROV SMIRNOV a montré que la loi de Weibull est acceptée pour calculer les valeurs de fiabilité, maintenabilité et de disponibilité. Les résultats de calculs obtenus ont montré que la presse a une fiabilité réduite pour cela, nous avons tracé la courbe ABC et l'histogramme de Pareto pour connaitre les éléments les plus défaillants. A la fin de ce chapitre, nous avons préconisé des solutions concernant ces éléments pour améliorer la moyenne du temps de bon fonctionnement, minimiser le temps de panne et progresser la production de la presse.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Dans notre travail, nous avons étudié l'importance de maintenance dans le domaine industriel et leur influence sur la production et le profit économique. L'application d'une politique de maintenance sur un système électromécanique permet de réduire sa probabilité de défaillance, améliorer sa disponibilité et augmenter son rendement.

Le stage qu'on a fait au sein de la société Algal plus nous a permis de prendre une idée sur le monde industriel et de connaître leurs systèmes électromécaniques existants. Ce stage nous a facilité de choisir un système électromécanique (notre système choisi est presse1600T) a un rôle important dans la production dans cette société et de collecter l'historique de panne de la presse, cet historique de panne collecté de la presse 1600T permet d'évaluer leur niveau de sureté de fonctionnement.

D'après l'historique de panne de presse, nous avons calculé les temps de bon fonctionnement (TBF) à travers les temps de panne et le mode d'emploi de la presse. Le nombre de TBF calculés nous a aidés de choisir la relation de la fonction de répartition théorique convenable, ensuite pour extraire les paramètres de Weibull nous utilisons le logiciel EasyFit, ces paramètres permettent de calculer la fonction de répartition réelle. Ces deux fonctions de répartition ont pour but de savoir la loi de calcul acceptée pour évaluer la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité par l'utilisation de test .

A partir le test, nous avons constaté que la loi de Weibull est acceptée pour calculer les paramètres de la sureté de fonctionnement. L'évaluation de la fiabilité a montré qu'elle est réduite ce qui nous oblige de tracer la courbe ABC pour extraire les éléments les plus tombent en panne, et nous avons traité les problèmes de ces éléments pour réduire la probabilité de défaillance et augmenter le rendement de la presse.

## **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

1. Tthew ALADESAYE. Application Of Predictive Maintenance To Industry Including Cepstrum Analysis Of A Gearbox , Massey University Auckland, New Zealand July 2008
2. L. BENALI. *Maintenance Industrielle*. Office des Publications Universitaires (OPU) 2006.
3. François Monchy, Jean-Pierre Vernier .*Méthodes et organisations*. 3e édition, 2010.
4. O. Gaudoin. *Fiabilité des Systèmes et des Logiciels*, notes de cours, Ecoles d'ingénieurs et formations de docteurs Grenoble, 2014.
5. P. Lyonnet. *La maintenance mathématiques et méthodes*. Techniques et documentation édition, 2000.
6. M. Slimane.Flavien AUDIN Fiabilité, Système, cours magistral, Ecole Polytechnique de l'Université de Tours2008-2009
7. Documents interne de l'Enterprise Algal plus
8. S. Adjabi. *Statistique Mathématique*. Éditions Universitaires Européennes.
9. G. Zwingelstein. la Maintenance basée sur la Fiabilité
10. P. Lingnelet et F. Quittard-Pinon. *Cours de statistiques mathématiques*. Décembre
11. Catalogue général des profiles mai 2010.
12. S. Butdee et al. CaseXPert A Process Planning System with Feature Based Neural Network Search Strategy for Aluminum Extrusion Die Manufacturing.2008
13. [www.algalplus.com](http://www.algalplus.com)
14. N. Carvalho, A. Correia, F. De Almeida The Evaluation of Defects in the Aluminium Extrusion Process Through Quality Tools ESTG - School of Technology and Management P. Porto.
15. [www.tecalex.com/fr/produits](http://www.tecalex.com/fr/produits).
16. [www.spectraaluminum.com/article-history-of-aluminum-extrusion.html](http://www.spectraaluminum.com/article-history-of-aluminum-extrusion.html).

## **Annexes**

# Annexe A : Tables de calcul liée aux les équipements

Table de chargement :

Table IV.9 – le calcul de différents paramètres (R (ti), F (ti), F théorie (ti), f (ti)) pour E4.

| Rang | TBF(H) | ni | $\sum ni$ | F (ti)<br>théorie | F (ti)  | R (ti)  | $\lambda$ (ti) | f (ti)  | Dni        |
|------|--------|----|-----------|-------------------|---------|---------|----------------|---------|------------|
| 1    | 13     | 1  | 1         | 0.0213            | 0.06049 | 0.93951 | 0.00456        | 0.00428 | 0.03921725 |
| 2    | 15     | 1  | 2         | 0.0426            | 0.06898 | 0.93102 | 0.00452        | 0.00421 | 0.0264309  |
| 3    | 25     | 1  | 3         | 0.0638            | 0.10959 | 0.89041 | 0.00441        | 0.00392 | 0.04576291 |
| 4    | 30     | 1  | 4         | 0.0851            | 0.12891 | 0.87109 | 0.00437        | 0.0038  | 0.04380004 |
| 5    | 35     | 3  | 7         | 0.1489            | 0.14764 | 0.85236 | 0.00433        | 0.00369 | 0.00129347 |
| 6    | 37     | 1  | 8         | 0.1702            | 0.15499 | 0.84501 | 0.00432        | 0.00365 | 0.01522735 |
| 7    | 40     | 1  | 9         | 0.1915            | 0.16584 | 0.83416 | 0.0043         | 0.00359 | 0.02564514 |
| 8    | 45     | 1  | 10        | 0.2128            | 0.18355 | 0.81645 | 0.00428        | 0.00349 | 0.02922086 |
| 9    | 49     | 2  | 12        | 0.2553            | 0.19736 | 0.80264 | 0.00426        | 0.00342 | 0.05795471 |
| 10   | 50     | 1  | 13        | 0.2766            | 0.20077 | 0.79923 | 0.00425        | 0.0034  | 0.0758222  |
| 11   | 62     | 1  | 14        | 0.2979            | 0.24033 | 0.75967 | 0.00421        | 0.0032  | 0.05754033 |
| 12   | 64     | 1  | 15        | 0.3191            | 0.24669 | 0.75331 | 0.0042         | 0.00316 | 0.07245559 |
| 13   | 70     | 1  | 16        | 0.3404            | 0.2654  | 0.7346  | 0.00418        | 0.00307 | 0.07502364 |
| 14   | 76     | 1  | 17        | 0.3617            | 0.28357 | 0.71643 | 0.00416        | 0.00298 | 0.07813478 |
| 15   | 77     | 1  | 18        | 0.3830            | 0.28654 | 0.71346 | 0.00416        | 0.00297 | 0.09643491 |
| 16   | 84     | 1  | 19        | 0.4043            | 0.30698 | 0.69302 | 0.00414        | 0.00287 | 0.09727154 |
| 17   | 88     | 1  | 20        | 0.4255            | 0.31836 | 0.68164 | 0.00413        | 0.00282 | 0.10717028 |
| 18   | 92     | 1  | 21        | 0.4468            | 0.32953 | 0.67047 | 0.00412        | 0.00277 | 0.11728147 |
| 19   | 106    | 1  | 22        | 0.4681            | 0.36701 | 0.63299 | 0.00409        | 0.00259 | 0.10107532 |
| 20   | 121    | 1  | 23        | 0.4894            | 0.40459 | 0.59541 | 0.00407        | 0.00242 | 0.08476842 |
| 21   | 122    | 1  | 24        | 0.5106            | 0.40701 | 0.59299 | 0.00407        | 0.00241 | 0.10362876 |
| 22   | 131    | 1  | 25        | 0.5319            | 0.42828 | 0.57172 | 0.00405        | 0.00232 | 0.10363822 |
| 23   | 140    | 1  | 26        | 0.5532            | 0.44871 | 0.55129 | 0.00404        | 0.00223 | 0.10448069 |
| 24   | 152    | 1  | 27        | 0.5745            | 0.47473 | 0.52527 | 0.00402        | 0.00211 | 0.09973978 |
| 25   | 172    | 1  | 28        | 0.5957            | 0.51519 | 0.48481 | 0.004          | 0.00194 | 0.08055899 |
| 26   | 179    | 1  | 29        | 0.6170            | 0.52854 | 0.47146 | 0.00399        | 0.00188 | 0.08847851 |
| 27   | 192    | 1  | 30        | 0.6383            | 0.55231 | 0.44769 | 0.00397        | 0.00178 | 0.08598292 |
| 28   | 199    | 1  | 31        | 0.6596            | 0.56458 | 0.43542 | 0.00397        | 0.00173 | 0.09499197 |
| 29   | 201    | 1  | 32        | 0.6809            | 0.56802 | 0.43198 | 0.00396        | 0.00171 | 0.11282968 |
| 30   | 259    | 1  | 33        | 0.7021            | 0.65621 | 0.34379 | 0.00391        | 0.00135 | 0.0459152  |
| 31   | 301    | 1  | 34        | 0.7234            | 0.70812 | 0.29188 | 0.00388        | 0.00113 | 0.01527951 |
| 32   | 341    | 1  | 35        | 0.7447            | 0.74999 | 0.25001 | 0.00386        | 0.00096 | 0.00530776 |
| 33   | 345    | 1  | 36        | 0.7660            | 0.75382 | 0.24618 | 0.00386        | 0.00095 | 0.01214093 |
| 34   | 409    | 1  | 37        | 0.7872            | 0.80745 | 0.19255 | 0.00382        | 0.00074 | 0.02021219 |
| 35   | 431    | 1  | 38        | 0.8085            | 0.82296 | 0.17704 | 0.00381        | 0.00068 | 0.01444806 |

*Annexe A : Tables de calcul liée aux les équipements*

|    |      |   |    |        |         |         |         |         |            |
|----|------|---|----|--------|---------|---------|---------|---------|------------|
| 36 | 536  | 1 | 39 | 0.8298 | 0.88109 | 0.11891 | 0.00377 | 0.00045 | 0.05130701 |
| 37 | 556  | 1 | 40 | 0.8511 | 0.88972 | 0.11028 | 0.00376 | 0.00042 | 0.03866011 |
| 38 | 563  | 1 | 41 | 0.8723 | 0.89259 | 0.10741 | 0.00376 | 0.0004  | 0.02025002 |
| 39 | 674  | 1 | 42 | 0.8936 | 0.92911 | 0.07089 | 0.00373 | 0.00026 | 0.03549487 |
| 40 | 789  | 1 | 43 | 0.9149 | 0.95374 | 0.04626 | 0.0037  | 0.00017 | 0.03884779 |
| 41 | 1575 | 1 | 44 | 0.9362 | 0.99732 | 0.00268 | 0.00357 | 9.6E-06 | 0.06115365 |
| 42 | 1971 | 1 | 45 | 0.9574 | 0.99934 | 0.00066 | 0.00353 | 2.3E-06 | 0.04189671 |
| 43 | 2391 | 1 | 46 | 0.9787 | 0.99985 | 0.00015 | 0.00349 | 5.2E-07 | 0.02112637 |
|    |      |   |    |        |         |         |         | MTBF    | 321        |

Four à billettes :

Table IV.10 – le calcul de différents paramètres (R (ti), F (ti), F théorie (ti), f (ti)) pour E<sub>2</sub>.

| Rang | TBF(H) | ni | Σni | F (ti)<br>théorie | F (ti)  | R (ti)  | λ (ti)  | f (ti)  | Dni       |
|------|--------|----|-----|-------------------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| 1    | 5      | 1  | 1   | 0.0082            | 0.02649 | 0.97351 | 0.0057  | 0.00554 | 0.0182938 |
| 2    | 6      | 1  | 2   | 0.0164            | 0.03205 | 0.96795 | 0.00576 | 0.00557 | 0.0156575 |
| 3    | 7      | 1  | 3   | 0.0246            | 0.03764 | 0.96236 | 0.00581 | 0.00559 | 0.0130457 |
| 4    | 9      | 2  | 4   | 0.0328            | 0.04885 | 0.95115 | 0.0059  | 0.00561 | 0.016061  |
| 5    | 10     | 2  | 6   | 0.0492            | 0.05446 | 0.94554 | 0.00594 | 0.00562 | 0.0052832 |
| 6    | 11     | 1  | 8   | 0.0656            | 0.06008 | 0.93992 | 0.00597 | 0.00562 | 0.0054937 |
| 7    | 13     | 1  | 9   | 0.0738            | 0.0713  | 0.9287  | 0.00604 | 0.00561 | 0.0024678 |
| 8    | 14     | 1  | 10  | 0.0820            | 0.0769  | 0.9231  | 0.00606 | 0.0056  | 0.0050635 |
| 9    | 16     | 3  | 11  | 0.0902            | 0.08808 | 0.91192 | 0.00611 | 0.00557 | 0.0020888 |
| 10   | 17     | 2  | 14  | 0.1148            | 0.09364 | 0.90636 | 0.00613 | 0.00556 | 0.0211118 |
| 11   | 18     | 2  | 16  | 0.1311            | 0.0992  | 0.9008  | 0.00616 | 0.00555 | 0.0319524 |
| 12   | 19     | 3  | 18  | 0.1475            | 0.10473 | 0.89527 | 0.00618 | 0.00553 | 0.0428084 |
| 13   | 22     | 2  | 21  | 0.1721            | 0.12124 | 0.87876 | 0.00623 | 0.00548 | 0.0508887 |
| 14   | 23     | 1  | 23  | 0.1885            | 0.12671 | 0.87329 | 0.00625 | 0.00546 | 0.0618159 |
| 15   | 25     | 2  | 24  | 0.1967            | 0.13758 | 0.86242 | 0.00628 | 0.00542 | 0.0591397 |
| 16   | 26     | 1  | 26  | 0.2131            | 0.14299 | 0.85701 | 0.00629 | 0.00539 | 0.0701277 |
| 17   | 27     | 1  | 27  | 0.2213            | 0.14837 | 0.85163 | 0.00631 | 0.00537 | 0.0729403 |
| 18   | 30     | 2  | 28  | 0.2295            | 0.16439 | 0.83561 | 0.00635 | 0.00531 | 0.0651173 |
| 19   | 31     | 1  | 30  | 0.2459            | 0.16969 | 0.83031 | 0.00636 | 0.00528 | 0.0762163 |
| 20   | 33     | 1  | 31  | 0.2541            | 0.1802  | 0.8198  | 0.00639 | 0.00524 | 0.0738942 |
| 21   | 34     | 1  | 32  | 0.2623            | 0.18543 | 0.81457 | 0.0064  | 0.00521 | 0.0768671 |
| 22   | 36     | 1  | 33  | 0.2705            | 0.1958  | 0.8042  | 0.00642 | 0.00516 | 0.0746884 |
| 23   | 38     | 1  | 34  | 0.2787            | 0.20608 | 0.79392 | 0.00644 | 0.00511 | 0.0726075 |
| 24   | 41     | 1  | 35  | 0.2869            | 0.22131 | 0.77869 | 0.00647 | 0.00504 | 0.065574  |
| 25   | 44     | 1  | 36  | 0.2951            | 0.23632 | 0.76368 | 0.0065  | 0.00496 | 0.0587667 |
| 26   | 45     | 1  | 37  | 0.3033            | 0.24127 | 0.75873 | 0.00651 | 0.00494 | 0.0620128 |
| 27   | 47     | 1  | 38  | 0.3115            | 0.25109 | 0.74891 | 0.00653 | 0.00489 | 0.0603847 |
| 28   | 49     | 1  | 39  | 0.3197            | 0.26081 | 0.73919 | 0.00654 | 0.00484 | 0.058859  |
| 29   | 50     | 1  | 40  | 0.3279            | 0.26564 | 0.73436 | 0.00655 | 0.00481 | 0.0622329 |
| 30   | 52     | 2  | 41  | 0.3361            | 0.2752  | 0.7248  | 0.00657 | 0.00476 | 0.060861  |
| 31   | 56     | 1  | 43  | 0.3525            | 0.29403 | 0.70597 | 0.0066  | 0.00466 | 0.0584256 |
| 32   | 58     | 1  | 44  | 0.3607            | 0.30329 | 0.69671 | 0.00661 | 0.0046  | 0.0573618 |
| 33   | 59     | 2  | 45  | 0.3689            | 0.30789 | 0.69211 | 0.00662 | 0.00458 | 0.0609667 |
| 34   | 64     | 1  | 47  | 0.3852            | 0.33046 | 0.66954 | 0.00665 | 0.00445 | 0.0547842 |
| 35   | 66     | 1  | 48  | 0.3934            | 0.33931 | 0.66069 | 0.00666 | 0.0044  | 0.0541284 |
| 36   | 67     | 1  | 49  | 0.4016            | 0.3437  | 0.6563  | 0.00667 | 0.00438 | 0.0579369 |
| 37   | 68     | 1  | 50  | 0.4098            | 0.34807 | 0.65193 | 0.00667 | 0.00435 | 0.0617705 |
| 38   | 69     | 1  | 51  | 0.4180            | 0.3524  | 0.6476  | 0.00668 | 0.00433 | 0.0656293 |
| 39   | 71     | 1  | 52  | 0.4262            | 0.361   | 0.639   | 0.00669 | 0.00428 | 0.0652253 |
| 40   | 72     | 2  | 53  | 0.4344            | 0.36527 | 0.63473 | 0.0067  | 0.00425 | 0.0691591 |

|    |     |   |     |        |         |         |         |         |           |
|----|-----|---|-----|--------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| 41 | 73  | 1 | 55  | 0.4508 | 0.36951 | 0.63049 | 0.0067  | 0.00423 | 0.0813145 |
| 42 | 77  | 1 | 56  | 0.4590 | 0.38621 | 0.61379 | 0.00672 | 0.00413 | 0.0728065 |
| 43 | 80  | 1 | 57  | 0.4672 | 0.39848 | 0.60152 | 0.00674 | 0.00405 | 0.0687322 |
| 44 | 84  | 1 | 58  | 0.4754 | 0.4145  | 0.5855  | 0.00676 | 0.00396 | 0.0609064 |
| 45 | 89  | 1 | 59  | 0.4836 | 0.43399 | 0.56601 | 0.00678 | 0.00384 | 0.0496119 |
| 46 | 92  | 1 | 60  | 0.4918 | 0.44541 | 0.55459 | 0.0068  | 0.00377 | 0.0463958 |
| 47 | 94  | 1 | 61  | 0.5000 | 0.4529  | 0.5471  | 0.00681 | 0.00372 | 0.0470997 |
| 48 | 98  | 1 | 62  | 0.5082 | 0.46761 | 0.53239 | 0.00682 | 0.00363 | 0.0405853 |
| 49 | 102 | 1 | 63  | 0.5164 | 0.48196 | 0.51804 | 0.00684 | 0.00354 | 0.0344314 |
| 50 | 103 | 1 | 64  | 0.5246 | 0.48549 | 0.51451 | 0.00684 | 0.00352 | 0.0390961 |
| 51 | 105 | 1 | 65  | 0.5328 | 0.49249 | 0.50751 | 0.00685 | 0.00348 | 0.0402946 |
| 52 | 110 | 1 | 66  | 0.5410 | 0.50961 | 0.49039 | 0.00687 | 0.00337 | 0.0313758 |
| 53 | 112 | 1 | 67  | 0.5492 | 0.5163  | 0.4837  | 0.00688 | 0.00333 | 0.032876  |
| 54 | 114 | 2 | 68  | 0.5574 | 0.52292 | 0.47708 | 0.00689 | 0.00329 | 0.0344606 |
| 55 | 116 | 1 | 70  | 0.5738 | 0.52945 | 0.47055 | 0.00689 | 0.00324 | 0.0443254 |
| 56 | 117 | 1 | 71  | 0.5820 | 0.53268 | 0.46732 | 0.0069  | 0.00322 | 0.0492889 |
| 57 | 119 | 3 | 72  | 0.5902 | 0.53908 | 0.46092 | 0.0069  | 0.00318 | 0.0510806 |
| 58 | 121 | 1 | 75  | 0.6148 | 0.54541 | 0.45459 | 0.00691 | 0.00314 | 0.0693472 |
| 59 | 123 | 1 | 76  | 0.6230 | 0.55165 | 0.44835 | 0.00692 | 0.0031  | 0.0713008 |
| 60 | 124 | 1 | 77  | 0.6311 | 0.55474 | 0.44526 | 0.00692 | 0.00308 | 0.076406  |
| 61 | 126 | 1 | 78  | 0.6393 | 0.56087 | 0.43913 | 0.00693 | 0.00304 | 0.0784789 |
| 62 | 127 | 2 | 79  | 0.6475 | 0.5639  | 0.4361  | 0.00693 | 0.00302 | 0.0836431 |
| 63 | 128 | 1 | 81  | 0.6639 | 0.56691 | 0.43309 | 0.00693 | 0.003   | 0.0970236 |
| 64 | 132 | 1 | 82  | 0.6721 | 0.57877 | 0.42123 | 0.00695 | 0.00293 | 0.0933616 |
| 65 | 138 | 1 | 83  | 0.6803 | 0.59599 | 0.40401 | 0.00697 | 0.00281 | 0.0843376 |
| 66 | 140 | 1 | 84  | 0.6885 | 0.60158 | 0.39842 | 0.00697 | 0.00278 | 0.0869421 |
| 67 | 142 | 2 | 85  | 0.6967 | 0.6071  | 0.3929  | 0.00698 | 0.00274 | 0.0896193 |
| 68 | 147 | 1 | 87  | 0.7131 | 0.62059 | 0.37941 | 0.00699 | 0.00265 | 0.0925265 |
| 69 | 151 | 1 | 88  | 0.7213 | 0.63106 | 0.36894 | 0.007   | 0.00258 | 0.090249  |
| 70 | 163 | 1 | 89  | 0.7295 | 0.66087 | 0.33913 | 0.00704 | 0.00239 | 0.0686361 |
| 71 | 176 | 1 | 90  | 0.7377 | 0.69059 | 0.30941 | 0.00707 | 0.00219 | 0.0471193 |
| 72 | 179 | 1 | 91  | 0.7459 | 0.69708 | 0.30292 | 0.00708 | 0.00214 | 0.0488194 |
| 73 | 180 | 1 | 92  | 0.7541 | 0.69922 | 0.30078 | 0.00708 | 0.00213 | 0.0548795 |
| 74 | 181 | 1 | 93  | 0.7623 | 0.70134 | 0.29866 | 0.00708 | 0.00212 | 0.0609541 |
| 75 | 185 | 1 | 94  | 0.7705 | 0.70969 | 0.29031 | 0.00709 | 0.00206 | 0.0608038 |
| 76 | 191 | 1 | 95  | 0.7787 | 0.72179 | 0.27821 | 0.0071  | 0.00198 | 0.0568961 |
| 77 | 197 | 1 | 96  | 0.7869 | 0.73341 | 0.26659 | 0.00712 | 0.0019  | 0.0534714 |
| 78 | 200 | 1 | 97  | 0.7951 | 0.73905 | 0.26095 | 0.00712 | 0.00186 | 0.056033  |
| 79 | 208 | 1 | 98  | 0.8033 | 0.75352 | 0.24648 | 0.00714 | 0.00176 | 0.049755  |
| 80 | 211 | 1 | 99  | 0.8115 | 0.75875 | 0.24125 | 0.00715 | 0.00172 | 0.0527248 |
| 81 | 216 | 1 | 100 | 0.8197 | 0.76723 | 0.23277 | 0.00716 | 0.00167 | 0.0524455 |
| 82 | 221 | 1 | 101 | 0.8279 | 0.77542 | 0.22458 | 0.00717 | 0.00161 | 0.0524528 |
| 83 | 227 | 1 | 102 | 0.8361 | 0.78488 | 0.21512 | 0.00718 | 0.00154 | 0.0511876 |
| 84 | 241 | 1 | 103 | 0.8443 | 0.80549 | 0.19451 | 0.00721 | 0.0014  | 0.0387761 |
| 85 | 243 | 1 | 104 | 0.8525 | 0.80827 | 0.19173 | 0.00721 | 0.00138 | 0.0441889 |
| 86 | 295 | 1 | 105 | 0.8607 | 0.86851 | 0.13149 | 0.00729 | 0.00096 | 0.0078578 |

|      |     |   |     |        |         |         |         |         |           |
|------|-----|---|-----|--------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| 87   | 306 | 1 | 106 | 0.8689 | 0.87866 | 0.12134 | 0.00731 | 0.00089 | 0.0098108 |
| 88   | 339 | 1 | 107 | 0.8770 | 0.90475 | 0.09525 | 0.00736 | 0.0007  | 0.0276977 |
| 89   | 354 | 1 | 108 | 0.8852 | 0.91471 | 0.08529 | 0.00738 | 0.00063 | 0.0294656 |
| 90   | 388 | 1 | 109 | 0.8934 | 0.93368 | 0.06632 | 0.00742 | 0.00049 | 0.040234  |
| 91   | 407 | 1 | 110 | 0.9016 | 0.94241 | 0.05759 | 0.00744 | 0.00043 | 0.0407673 |
| 92   | 419 | 1 | 111 | 0.9098 | 0.94733 | 0.05267 | 0.00745 | 0.00039 | 0.0374931 |
| 93   | 432 | 1 | 112 | 0.9180 | 0.9522  | 0.0478  | 0.00747 | 0.00036 | 0.0341638 |
| 94   | 434 | 1 | 113 | 0.9262 | 0.95291 | 0.04709 | 0.00747 | 0.00035 | 0.0266757 |
| 95   | 460 | 1 | 114 | 0.9344 | 0.96123 | 0.03877 | 0.00749 | 0.00029 | 0.0268036 |
| 96   | 489 | 1 | 115 | 0.9426 | 0.96882 | 0.03118 | 0.00752 | 0.00023 | 0.026193  |
| 97   | 505 | 1 | 116 | 0.9508 | 0.97236 | 0.02764 | 0.00754 | 0.00021 | 0.0215356 |
| 98   | 551 | 1 | 117 | 0.9590 | 0.98047 | 0.01953 | 0.00758 | 0.00015 | 0.0214565 |
| 99   | 574 | 1 | 118 | 0.9672 | 0.9836  | 0.0164  | 0.0076  | 0.00012 | 0.0163863 |
| 100  | 658 | 1 | 119 | 0.9754 | 0.99136 | 0.00864 | 0.00766 | 6.6E-05 | 0.0159487 |
| 101  | 857 | 1 | 120 | 0.9836 | 0.99814 | 0.00186 | 0.00778 | 1.4E-05 | 0.0145352 |
| 102  | 878 | 1 | 121 | 0.9918 | 0.99842 | 0.00158 | 0.00779 | 1.2E-05 | 0.0066189 |
| MTBF | 151 |   |     |        |         |         |         |         |           |

Table de refroidissement :

Table IV.11 – le calcul de différents paramètres (R (ti), F (ti), F théorie (ti), f (ti)) pour E5.

| Rang | TBF(H) | ni | $\sum ni$ | F (ti) théorie | F (ti)  | R (ti)  | $\lambda$ (ti) | f (ti)  | Dni     |
|------|--------|----|-----------|----------------|---------|---------|----------------|---------|---------|
| 1    | 1      | 6  | 6         | 0.1579         | 0.04333 | 0.95667 | 0.04094        | 0.03916 | 0.1146  |
| 2    | 2      | 2  | 8         | 0.2105         | 0.08934 | 0.91066 | 0.0424         | 0.03862 | 0.1212  |
| 3    | 3      | 1  | 9         | 0.2368         | 0.11686 | 0.88314 | 0.04297        | 0.03795 | 0.1200  |
| 4    | 4      | 1  | 10        | 0.2632         | 0.13532 | 0.86468 | 0.04329        | 0.03743 | 0.1278  |
| 5    | 5      | 1  | 11        | 0.2895         | 0.17244 | 0.82756 | 0.04383        | 0.03628 | 0.1170  |
| 6    | 6      | 1  | 12        | 0.3158         | 0.23334 | 0.76666 | 0.04454        | 0.03415 | 0.0825  |
| 7    | 7      | 4  | 16        | 0.4211         | 0.26514 | 0.73486 | 0.04485        | 0.03296 | 0.1559  |
| 8    | 9      | 1  | 17        | 0.4474         | 0.33132 | 0.66868 | 0.04542        | 0.03037 | 0.1160  |
| 9    | 10     | 1  | 18        | 0.4737         | 0.35058 | 0.64942 | 0.04557        | 0.02959 | 0.1231  |
| 10   | 11     | 1  | 19        | 0.5000         | 0.38654 | 0.61346 | 0.04584        | 0.02812 | 0.1135  |
| 11   | 13     | 1  | 20        | 0.5263         | 0.44523 | 0.55477 | 0.04624        | 0.02565 | 0.0811  |
| 12   | 14     | 1  | 21        | 0.5526         | 0.46512 | 0.53488 | 0.04637        | 0.0248  | 0.0875  |
| 13   | 17     | 2  | 23        | 0.6053         | 0.52644 | 0.47356 | 0.04676        | 0.02214 | 0.0788  |
| 14   | 18     | 1  | 24        | 0.6316         | 0.55635 | 0.44365 | 0.04695        | 0.02083 | 0.0752  |
| 15   | 20     | 1  | 25        | 0.6579         | 0.59275 | 0.40725 | 0.04717        | 0.01921 | 0.0651  |
| 16   | 22     | 1  | 26        | 0.6842         | 0.63594 | 0.36406 | 0.04743        | 0.01727 | 0.0483  |
| 17   | 23     | 1  | 27        | 0.7105         | 0.64497 | 0.35503 | 0.04748        | 0.01686 | 0.0656  |
| 18   | 24     | 1  | 28        | 0.7368         | 0.66936 | 0.33064 | 0.04763        | 0.01575 | 0.0675  |
| 19   | 32     | 1  | 29        | 0.7632         | 0.77582 | 0.22418 | 0.04831        | 0.01083 | -0.0127 |
| 20   | 33     | 1  | 30        | 0.7895         | 0.78597 | 0.21403 | 0.04838        | 0.01036 | 0.0035  |
| 21   | 34     | 1  | 31        | 0.8158         | 0.79151 | 0.20849 | 0.04842        | 0.0101  | 0.0243  |
| 22   | 35     | 2  | 33        | 0.8684         | 0.79814 | 0.20186 | 0.04847        | 0.00978 | 0.0703  |
| 23   | 40     | 1  | 34        | 0.8947         | 0.84158 | 0.15842 | 0.04879        | 0.00773 | 0.0532  |
| 24   | 60     | 1  | 35        | 0.9211         | 0.94122 | 0.05878 | 0.04979        | 0.00293 | 0.0202  |
| 25   | 67     | 1  | 36        | 0.9474         | 0.95939 | 0.04061 | 0.05008        | 0.00203 | 0.0120  |
| 26   | 93     | 1  | 37        | 0.9737         | 0.98895 | 0.01105 | 0.05089        | 0.00056 | 0.0153  |
| MTBF | 23     |    |           |                |         |         |                |         |         |

Tracteur de filage :

Table IV.12 – le calcul de différents paramètres (R (ti), F (ti), F théorie (ti), f (ti)) pour E<sub>3</sub>.

| Rang | TBF(H) | ni | $\Sigma ni$ | F (ti)<br>théorie | F (ti)  | R (ti)  | $\lambda$ (ti) | f (ti)  | Dni        |
|------|--------|----|-------------|-------------------|---------|---------|----------------|---------|------------|
| 1    | 2      | 1  | 1           | 0.0067            | 0.01847 | 0.98153 | 0.00892        | 0.00875 | 0.01175635 |
| 2    | 4      | 1  | 2           | 0.0134            | 0.03554 | 0.96446 | 0.00866        | 0.00835 | 0.02211538 |
| 3    | 7      | 1  | 3           | 0.0201            | 0.05994 | 0.94006 | 0.00845        | 0.00794 | 0.03981073 |
| 4    | 8      | 1  | 4           | 0.0268            | 0.06783 | 0.93217 | 0.0084         | 0.00783 | 0.04098706 |
| 5    | 9      | 1  | 5           | 0.0336            | 0.07561 | 0.92439 | 0.00836        | 0.00773 | 0.0420553  |
| 6    | 10     | 5  | 10          | 0.0671            | 0.08329 | 0.91671 | 0.00832        | 0.00763 | 0.01617624 |
| 7    | 11     | 4  | 14          | 0.0940            | 0.09087 | 0.90913 | 0.00829        | 0.00753 | 0.0030878  |
| 8    | 13     | 2  | 16          | 0.1074            | 0.10576 | 0.89424 | 0.00823        | 0.00736 | 0.00161961 |
| 9    | 14     | 3  | 19          | 0.1275            | 0.11308 | 0.88692 | 0.0082         | 0.00727 | 0.01443739 |
| 10   | 15     | 3  | 22          | 0.1477            | 0.12031 | 0.87969 | 0.00818        | 0.00719 | 0.02733723 |
| 11   | 16     | 2  | 24          | 0.1611            | 0.12747 | 0.87253 | 0.00816        | 0.00712 | 0.03360516 |
| 12   | 17     | 3  | 27          | 0.1812            | 0.13455 | 0.86545 | 0.00813        | 0.00704 | 0.04666169 |
| 13   | 18     | 3  | 30          | 0.2013            | 0.14155 | 0.85845 | 0.00811        | 0.00697 | 0.05979333 |
| 14   | 19     | 4  | 34          | 0.2282            | 0.14848 | 0.85152 | 0.0081         | 0.00689 | 0.07970957 |
| 15   | 20     | 1  | 35          | 0.2349            | 0.15534 | 0.84466 | 0.00808        | 0.00682 | 0.079563   |
| 16   | 21     | 4  | 39          | 0.2617            | 0.16212 | 0.83788 | 0.00806        | 0.00675 | 0.09962047 |
| 17   | 22     | 3  | 42          | 0.2819            | 0.16884 | 0.83116 | 0.00804        | 0.00669 | 0.11303482 |
| 18   | 23     | 4  | 46          | 0.3087            | 0.1755  | 0.8245  | 0.00803        | 0.00662 | 0.13322746 |
| 19   | 24     | 2  | 48          | 0.3221            | 0.18208 | 0.81792 | 0.00801        | 0.00656 | 0.14006282 |
| 20   | 25     | 3  | 51          | 0.3423            | 0.18861 | 0.81139 | 0.008          | 0.00649 | 0.15367389 |
| 21   | 26     | 1  | 52          | 0.3490            | 0.19507 | 0.80493 | 0.00799        | 0.00643 | 0.15392526 |
| 22   | 27     | 1  | 53          | 0.3557            | 0.20147 | 0.79853 | 0.00797        | 0.00637 | 0.15423862 |
| 23   | 28     | 4  | 57          | 0.3826            | 0.2078  | 0.7922  | 0.00796        | 0.00631 | 0.17474713 |
| 24   | 31     | 1  | 58          | 0.3893            | 0.22646 | 0.77354 | 0.00793        | 0.00613 | 0.16280279 |
| 25   | 32     | 2  | 60          | 0.4027            | 0.23256 | 0.76744 | 0.00792        | 0.00607 | 0.17012246 |
| 26   | 33     | 2  | 62          | 0.4161            | 0.23861 | 0.76139 | 0.00791        | 0.00602 | 0.1774984  |

|    |    |   |    |        |         |         |         |         |            |
|----|----|---|----|--------|---------|---------|---------|---------|------------|
| 27 | 34 | 3 | 65 | 0.4362 | 0.2446  | 0.7554  | 0.0079  | 0.00596 | 0.19164118 |
| 28 | 35 | 2 | 67 | 0.4497 | 0.25054 | 0.74946 | 0.00789 | 0.00591 | 0.19912719 |
| 29 | 36 | 2 | 69 | 0.4631 | 0.25642 | 0.74358 | 0.00788 | 0.00586 | 0.20666707 |
| 30 | 38 | 1 | 70 | 0.4698 | 0.26803 | 0.73197 | 0.00786 | 0.00575 | 0.20177125 |
| 31 | 39 | 1 | 71 | 0.4765 | 0.27375 | 0.72625 | 0.00785 | 0.0057  | 0.20275696 |
| 32 | 41 | 1 | 72 | 0.4832 | 0.28505 | 0.71495 | 0.00783 | 0.0056  | 0.1981694  |
| 33 | 44 | 2 | 74 | 0.4966 | 0.30163 | 0.69837 | 0.00781 | 0.00545 | 0.19501525 |
| 34 | 46 | 2 | 76 | 0.5101 | 0.31244 | 0.68756 | 0.00779 | 0.00536 | 0.19762731 |
| 35 | 49 | 1 | 77 | 0.5168 | 0.32831 | 0.67169 | 0.00777 | 0.00522 | 0.18847204 |
| 36 | 50 | 1 | 78 | 0.5235 | 0.3335  | 0.6665  | 0.00777 | 0.00518 | 0.18998558 |
| 37 | 51 | 1 | 79 | 0.5302 | 0.33866 | 0.66134 | 0.00776 | 0.00513 | 0.19154376 |
| 38 | 53 | 2 | 81 | 0.5436 | 0.34883 | 0.65117 | 0.00775 | 0.00504 | 0.19479206 |
| 39 | 56 | 1 | 82 | 0.5503 | 0.36377 | 0.63623 | 0.00773 | 0.00492 | 0.18656426 |
| 40 | 57 | 1 | 83 | 0.5570 | 0.36867 | 0.63133 | 0.00772 | 0.00487 | 0.18838008 |
| 41 | 60 | 1 | 84 | 0.5638 | 0.38311 | 0.61689 | 0.0077  | 0.00475 | 0.18065092 |
| 42 | 61 | 2 | 86 | 0.5772 | 0.38784 | 0.61216 | 0.0077  | 0.00471 | 0.18934084 |
| 43 | 62 | 1 | 87 | 0.5839 | 0.39253 | 0.60747 | 0.00769 | 0.00467 | 0.19135896 |
| 44 | 63 | 2 | 89 | 0.5973 | 0.39719 | 0.60281 | 0.00769 | 0.00463 | 0.20012769 |
| 45 | 65 | 1 | 90 | 0.6040 | 0.40638 | 0.59362 | 0.00768 | 0.00456 | 0.19764693 |
| 46 | 78 | 1 | 91 | 0.6107 | 0.46255 | 0.53745 | 0.00762 | 0.00409 | 0.14818412 |
| 47 | 80 | 1 | 92 | 0.6174 | 0.47068 | 0.52932 | 0.00761 | 0.00403 | 0.1467735  |
| 48 | 82 | 1 | 93 | 0.6242 | 0.47867 | 0.52133 | 0.0076  | 0.00396 | 0.14549416 |
| 49 | 84 | 1 | 94 | 0.6309 | 0.48653 | 0.51347 | 0.00759 | 0.0039  | 0.14434364 |
| 50 | 95 | 1 | 95 | 0.6376 | 0.52757 | 0.47243 | 0.00755 | 0.00357 | 0.11001327 |
| 51 | 96 | 1 | 96 | 0.6443 | 0.53112 | 0.46888 | 0.00755 | 0.00354 | 0.11317038 |

|    |     |   |     |        |         |         |         |         |            |
|----|-----|---|-----|--------|---------|---------|---------|---------|------------|
| 52 | 97  | 1 | 97  | 0.6510 | 0.53465 | 0.46535 | 0.00755 | 0.00351 | 0.1163558  |
| 53 | 100 | 2 | 99  | 0.6644 | 0.54506 | 0.45494 | 0.00754 | 0.00343 | 0.11936803 |
| 54 | 103 | 1 | 100 | 0.6711 | 0.55523 | 0.44477 | 0.00753 | 0.00335 | 0.11591474 |
| 55 | 105 | 1 | 101 | 0.6779 | 0.56187 | 0.43813 | 0.00752 | 0.0033  | 0.11598309 |
| 56 | 106 | 2 | 103 | 0.6913 | 0.56515 | 0.43485 | 0.00752 | 0.00327 | 0.12612369 |
| 57 | 111 | 1 | 104 | 0.6980 | 0.58118 | 0.41882 | 0.0075  | 0.00314 | 0.11680813 |
| 58 | 113 | 4 | 108 | 0.7248 | 0.58741 | 0.41259 | 0.0075  | 0.00309 | 0.13741809 |
| 59 | 115 | 1 | 109 | 0.7315 | 0.59355 | 0.40645 | 0.00749 | 0.00305 | 0.13799131 |
| 60 | 118 | 1 | 110 | 0.7383 | 0.60258 | 0.39742 | 0.00748 | 0.00297 | 0.13567457 |
| 61 | 120 | 1 | 111 | 0.7450 | 0.60848 | 0.39152 | 0.00748 | 0.00293 | 0.13648426 |
| 62 | 121 | 1 | 112 | 0.7517 | 0.6114  | 0.3886  | 0.00748 | 0.0029  | 0.14027932 |
| 63 | 122 | 2 | 114 | 0.7651 | 0.61429 | 0.38571 | 0.00747 | 0.00288 | 0.15080854 |
| 64 | 131 | 1 | 115 | 0.7718 | 0.63934 | 0.36066 | 0.00745 | 0.00269 | 0.13247    |
| 65 | 138 | 1 | 116 | 0.7785 | 0.65765 | 0.34235 | 0.00743 | 0.00254 | 0.1208756  |
| 66 | 139 | 2 | 118 | 0.7919 | 0.66018 | 0.33982 | 0.00743 | 0.00253 | 0.13176348 |
| 67 | 144 | 1 | 119 | 0.7987 | 0.67257 | 0.32743 | 0.00742 | 0.00243 | 0.12609015 |
| 68 | 147 | 1 | 120 | 0.8054 | 0.67977 | 0.32023 | 0.00741 | 0.00237 | 0.12559701 |
| 69 | 151 | 1 | 121 | 0.8121 | 0.68912 | 0.31088 | 0.0074  | 0.0023  | 0.12295776 |
| 70 | 154 | 1 | 122 | 0.8188 | 0.69595 | 0.30405 | 0.0074  | 0.00225 | 0.12284255 |
| 71 | 158 | 1 | 123 | 0.8255 | 0.70481 | 0.29519 | 0.00739 | 0.00218 | 0.12069295 |
| 72 | 159 | 1 | 124 | 0.8322 | 0.70698 | 0.29302 | 0.00739 | 0.00216 | 0.12523124 |
| 73 | 165 | 1 | 125 | 0.8389 | 0.71968 | 0.28032 | 0.00738 | 0.00207 | 0.11924743 |
| 74 | 167 | 1 | 126 | 0.8456 | 0.72378 | 0.27622 | 0.00737 | 0.00204 | 0.12185482 |
| 75 | 171 | 1 | 127 | 0.8523 | 0.73181 | 0.26819 | 0.00736 | 0.00198 | 0.12054365 |
| 76 | 179 | 1 | 128 | 0.8591 | 0.74714 | 0.25286 | 0.00735 | 0.00186 | 0.11192449 |
| 77 | 181 | 1 | 129 | 0.8658 | 0.75083 | 0.24917 | 0.00735 | 0.00183 | 0.11494665 |
| 78 | 185 | 1 | 130 | 0.8725 | 0.75804 | 0.24196 | 0.00734 | 0.00178 | 0.1144453  |
| 79 | 193 | 1 | 131 | 0.8792 | 0.77182 | 0.22818 | 0.00733 | 0.00167 | 0.10737006 |
| 80 | 253 | 1 | 132 | 0.8859 | 0.8526  | 0.1474  | 0.00724 | 0.00107 | 0.0333107  |
| 81 | 294 | 1 | 133 | 0.8926 | 0.89035 | 0.10965 | 0.0072  | 0.00079 | 0.0022627  |

|      |      |   |     |        |         |         |         |         |            |
|------|------|---|-----|--------|---------|---------|---------|---------|------------|
| 82   | 307  | 1 | 134 | 0.8993 | 0.90014 | 0.09986 | 0.00718 | 0.00072 | 0.00080794 |
| 83   | 318  | 1 | 135 | 0.9060 | 0.90772 | 0.09228 | 0.00717 | 0.00066 | 0.00167651 |
| 84   | 327  | 1 | 136 | 0.9128 | 0.91348 | 0.08652 | 0.00716 | 0.00062 | 0.00072936 |
| 85   | 378  | 1 | 137 | 0.9195 | 0.93989 | 0.06011 | 0.00712 | 0.00043 | 0.02042229 |
| 86   | 393  | 1 | 138 | 0.9262 | 0.94597 | 0.05403 | 0.00711 | 0.00038 | 0.01979345 |
| 87   | 399  | 1 | 139 | 0.9329 | 0.94822 | 0.05178 | 0.0071  | 0.00037 | 0.01533655 |
| 88   | 473  | 1 | 140 | 0.9396 | 0.96933 | 0.03067 | 0.00705 | 0.00022 | 0.02972782 |
| 89   | 495  | 2 | 142 | 0.9530 | 0.97373 | 0.02627 | 0.00704 | 0.00018 | 0.02070769 |
| 90   | 550  | 1 | 143 | 0.9597 | 0.98214 | 0.01786 | 0.007   | 0.00013 | 0.02241057 |
| 91   | 768  | 1 | 144 | 0.9664 | 0.99608 | 0.00392 | 0.0069  | 2.7E-05 | 0.02963289 |
| 92   | 810  | 1 | 145 | 0.9732 | 0.99706 | 0.00294 | 0.00689 | 2E-05   | 0.02390824 |
| 93   | 857  | 1 | 146 | 0.9799 | 0.99787 | 0.00213 | 0.00687 | 1.5E-05 | 0.01800835 |
| 94   | 1040 | 1 | 147 | 0.9866 | 0.99939 | 0.00061 | 0.00681 | 4.1E-06 | 0.012815   |
| 95   | 1065 | 1 | 148 | 0.9933 | 0.99949 | 0.00051 | 0.00681 | 3.5E-06 | 0.00619875 |
| MTBF | 153  |   |     |        |         |         |         |         |            |

Table de chargement :

Table IV.13 –  $\mu$  (t), M(t) et D(t) E4.

| N° | TTR<br>(min) | $\mu$  | M(t)  | D(t)  | N° | TTR<br>(min) | $\mu$  | M(t)  | D(t)  |
|----|--------------|--------|-------|-------|----|--------------|--------|-------|-------|
| 1  | 15           | 0.0192 | 0.251 | 0.999 | 25 | 40           | 0.0192 | 0.537 | 0.999 |
| 2  | 15           | 0.0192 | 0.251 | 0.999 | 26 | 40           | 0.0192 | 0.537 | 0.999 |
| 3  | 15           | 0.0192 | 0.251 | 0.999 | 27 | 40           | 0.0192 | 0.537 | 0.999 |
| 4  | 15           | 0.0192 | 0.251 | 0.999 | 28 | 40           | 0.0192 | 0.537 | 0.999 |
| 5  | 15           | 0.0192 | 0.251 | 0.999 | 29 | 55           | 0.0192 | 0.653 | 0.998 |
| 6  | 15           | 0.0192 | 0.251 | 0.999 | 30 | 60           | 0.0192 | 0.685 | 0.998 |
| 7  | 15           | 0.0192 | 0.251 | 0.999 | 31 | 60           | 0.0192 | 0.685 | 0.998 |
| 8  | 15           | 0.0192 | 0.251 | 0.999 | 32 | 60           | 0.0192 | 0.685 | 0.998 |
| 9  | 15           | 0.0192 | 0.251 | 0.999 | 33 | 60           | 0.0192 | 0.685 | 0.998 |
| 10 | 20           | 0.0192 | 0.319 | 0.999 | 34 | 60           | 0.0192 | 0.685 | 0.998 |
| 11 | 25           | 0.0192 | 0.382 | 0.999 | 35 | 70           | 0.0192 | 0.74  | 0.998 |
| 12 | 25           | 0.0192 | 0.382 | 0.999 | 36 | 80           | 0.0192 | 0.785 | 0.998 |
| 13 | 25           | 0.0192 | 0.382 | 0.999 | 37 | 85           | 0.0192 | 0.805 | 0.998 |
| 14 | 25           | 0.0192 | 0.382 | 0.999 | 38 | 90           | 0.0192 | 0.823 | 0.998 |
| 15 | 30           | 0.0192 | 0.438 | 0.999 | 39 | 95           | 0.0192 | 0.839 | 0.998 |
| 16 | 30           | 0.0192 | 0.438 | 0.999 | 40 | 95           | 0.0192 | 0.839 | 0.998 |
| 17 | 30           | 0.0192 | 0.438 | 0.999 | 41 | 105          | 0.0192 | 0.867 | 0.998 |
| 18 | 30           | 0.0192 | 0.438 | 0.999 | 42 | 105          | 0.0192 | 0.867 | 0.998 |
| 19 | 30           | 0.0192 | 0.438 | 0.999 | 43 | 115          | 0.0192 | 0.89  | 0.998 |
| 20 | 30           | 0.0192 | 0.438 | 0.999 | 44 | 120          | 0.0192 | 0.901 | 0.998 |
| 21 | 30           | 0.0192 | 0.438 | 0.999 | 45 | 130          | 0.0192 | 0.918 | 0.998 |
| 22 | 35           | 0.0192 | 0.49  | 0.999 | 46 | 135          | 0.0192 | 0.925 | 0.997 |
| 23 | 35           | 0.0192 | 0.49  | 0.999 | 47 | 150          | 0.0192 | 0.944 | 0.997 |
| 24 | 35           | 0.0192 | 0.49  | 0.999 |    |              |        |       |       |

Four à billettes :

Table IV.14 –  $\mu$  (t), M(t) et D(t) E<sub>2</sub>.

| N° | TTR (min) | $\mu$    | M(t)  | D(t)  | N° | TTR (min) | $\mu$    | M(t)  | D(t)  |
|----|-----------|----------|-------|-------|----|-----------|----------|-------|-------|
| 1  | 10        | 0.010526 | 0.1   | 0.999 | 42 | 30        | 0.010526 | 0.271 | 0.997 |
| 2  | 10        | 0.010526 | 0.1   | 0.999 | 43 | 35        | 0.010526 | 0.308 | 0.997 |
| 3  | 10        | 0.010526 | 0.1   | 0.999 | 44 | 35        | 0.010526 | 0.308 | 0.997 |
| 4  | 10        | 0.010526 | 0.1   | 0.999 | 45 | 35        | 0.010526 | 0.308 | 0.997 |
| 5  | 10        | 0.010526 | 0.1   | 0.999 | 46 | 35        | 0.010526 | 0.308 | 0.997 |
| 6  | 10        | 0.010526 | 0.1   | 0.999 | 47 | 35        | 0.010526 | 0.308 | 0.997 |
| 7  | 10        | 0.010526 | 0.1   | 0.999 | 48 | 35        | 0.010526 | 0.308 | 0.997 |
| 8  | 15        | 0.010526 | 0.146 | 0.998 | 49 | 35        | 0.010526 | 0.308 | 0.997 |
| 9  | 15        | 0.010526 | 0.146 | 0.998 | 50 | 35        | 0.010526 | 0.308 | 0.997 |
| 10 | 15        | 0.010526 | 0.146 | 0.998 | 51 | 35        | 0.010526 | 0.308 | 0.997 |
| 11 | 15        | 0.010526 | 0.146 | 0.998 | 52 | 35        | 0.010526 | 0.308 | 0.997 |
| 12 | 15        | 0.010526 | 0.146 | 0.998 | 53 | 35        | 0.010526 | 0.308 | 0.997 |
| 13 | 15        | 0.010526 | 0.146 | 0.998 | 54 | 40        | 0.010526 | 0.344 | 0.996 |
| 14 | 15        | 0.010526 | 0.146 | 0.998 | 55 | 40        | 0.010526 | 0.344 | 0.996 |
| 15 | 15        | 0.010526 | 0.146 | 0.998 | 56 | 40        | 0.010526 | 0.344 | 0.996 |
| 16 | 15        | 0.010526 | 0.146 | 0.998 | 57 | 40        | 0.010526 | 0.344 | 0.996 |
| 17 | 20        | 0.010526 | 0.19  | 0.998 | 58 | 40        | 0.010526 | 0.344 | 0.996 |
| 18 | 20        | 0.010526 | 0.19  | 0.998 | 59 | 40        | 0.010526 | 0.344 | 0.996 |
| 19 | 20        | 0.010526 | 0.19  | 0.998 | 60 | 45        | 0.010526 | 0.377 | 0.996 |
| 20 | 20        | 0.010526 | 0.19  | 0.998 | 61 | 45        | 0.010526 | 0.377 | 0.996 |
| 21 | 20        | 0.010526 | 0.19  | 0.998 | 62 | 45        | 0.010526 | 0.377 | 0.996 |
| 22 | 20        | 0.010526 | 0.19  | 0.998 | 63 | 45        | 0.010526 | 0.377 | 0.996 |
| 23 | 20        | 0.010526 | 0.19  | 0.998 | 64 | 45        | 0.010526 | 0.377 | 0.996 |
| 24 | 20        | 0.010526 | 0.19  | 0.998 | 65 | 50        | 0.010526 | 0.409 | 0.996 |
| 25 | 20        | 0.010526 | 0.19  | 0.998 | 66 | 50        | 0.010526 | 0.409 | 0.996 |
| 26 | 20        | 0.010526 | 0.19  | 0.998 | 67 | 50        | 0.010526 | 0.409 | 0.996 |
| 27 | 20        | 0.010526 | 0.19  | 0.998 | 68 | 50        | 0.010526 | 0.409 | 0.996 |
| 28 | 25        | 0.010526 | 0.231 | 0.998 | 69 | 50        | 0.010526 | 0.409 | 0.996 |
| 29 | 25        | 0.010526 | 0.231 | 0.998 | 70 | 55        | 0.010526 | 0.44  | 0.995 |
| 30 | 25        | 0.010526 | 0.231 | 0.998 | 71 | 55        | 0.010526 | 0.44  | 0.995 |
| 31 | 25        | 0.010526 | 0.231 | 0.998 | 72 | 55        | 0.010526 | 0.44  | 0.995 |
| 32 | 25        | 0.010526 | 0.231 | 0.998 | 73 | 55        | 0.010526 | 0.44  | 0.995 |
| 33 | 25        | 0.010526 | 0.231 | 0.998 | 74 | 55        | 0.010526 | 0.44  | 0.995 |
| 34 | 25        | 0.010526 | 0.231 | 0.998 | 75 | 55        | 0.010526 | 0.44  | 0.995 |
| 35 | 25        | 0.010526 | 0.231 | 0.998 | 76 | 60        | 0.010526 | 0.468 | 0.995 |
| 36 | 30        | 0.010526 | 0.271 | 0.997 | 77 | 60        | 0.010526 | 0.468 | 0.995 |
| 37 | 30        | 0.010526 | 0.271 | 0.997 | 78 | 60        | 0.010526 | 0.468 | 0.995 |
| 38 | 30        | 0.010526 | 0.271 | 0.997 | 79 | 60        | 0.010526 | 0.468 | 0.995 |
| 39 | 30        | 0.010526 | 0.271 | 0.997 | 80 | 70        | 0.010526 | 0.521 | 0.995 |
| 40 | 30        | 0.010526 | 0.271 | 0.997 | 81 | 70        | 0.010526 | 0.521 | 0.995 |

|     |            |          |       |       |     |            |          |       |       |
|-----|------------|----------|-------|-------|-----|------------|----------|-------|-------|
| 41  | <b>30</b>  | 0.010526 | 0.271 | 0.997 | 82  | <b>75</b>  | 0.010526 | 0.546 | 0.994 |
| 83  | <b>75</b>  | 0.010526 | 0.546 | 0.994 | 104 | <b>180</b> | 0.010526 | 0.85  | 0.991 |
| 84  | <b>75</b>  | 0.010526 | 0.546 | 0.994 | 105 | <b>220</b> | 0.010526 | 0.901 | 0.991 |
| 85  | <b>80</b>  | 0.010526 | 0.569 | 0.994 | 106 | <b>220</b> | 0.010526 | 0.901 | 0.991 |
| 86  | <b>80</b>  | 0.010526 | 0.569 | 0.994 | 107 | <b>230</b> | 0.010526 | 0.911 | 0.991 |
| 87  | <b>85</b>  | 0.010526 | 0.591 | 0.994 | 108 | <b>240</b> | 0.010526 | 0.92  | 0.990 |
| 88  | <b>85</b>  | 0.010526 | 0.591 | 0.994 | 109 | <b>270</b> | 0.010526 | 0.942 | 0.990 |
| 89  | <b>90</b>  | 0.010526 | 0.612 | 0.994 | 110 | <b>295</b> | 0.010526 | 0.955 | 0.990 |
| 90  | <b>90</b>  | 0.010526 | 0.612 | 0.994 | 111 | <b>295</b> | 0.010526 | 0.955 | 0.990 |
| 91  | <b>90</b>  | 0.010526 | 0.612 | 0.994 | 112 | <b>310</b> | 0.010526 | 0.962 | 0.990 |
| 92  | <b>95</b>  | 0.010526 | 0.632 | 0.993 | 113 | <b>315</b> | 0.010526 | 0.964 | 0.990 |
| 93  | <b>100</b> | 0.010526 | 0.651 | 0.993 | 114 | <b>325</b> | 0.010526 | 0.967 | 0.990 |
| 94  | <b>100</b> | 0.010526 | 0.651 | 0.993 | 115 | <b>345</b> | 0.010526 | 0.974 | 0.990 |
| 95  | <b>110</b> | 0.010526 | 0.686 | 0.993 | 116 | <b>350</b> | 0.010526 | 0.975 | 0.990 |
| 96  | <b>110</b> | 0.010526 | 0.686 | 0.993 | 117 | <b>355</b> | 0.010526 | 0.976 | 0.990 |
| 97  | <b>110</b> | 0.010526 | 0.686 | 0.993 | 118 | <b>420</b> | 0.010526 | 0.988 | 0.990 |
| 98  | <b>130</b> | 0.010526 | 0.745 | 0.992 | 119 | <b>420</b> | 0.010526 | 0.988 | 0.990 |
| 99  | <b>135</b> | 0.010526 | 0.759 | 0.992 | 120 | <b>470</b> | 0.010526 | 0.993 | 0.990 |
| 100 | <b>160</b> | 0.010526 | 0.814 | 0.992 | 121 | <b>575</b> | 0.010526 | 0.998 | 0.990 |
| 101 | <b>160</b> | 0.010526 | 0.814 | 0.992 | 122 | <b>680</b> | 0.010526 | 0.999 | 0.990 |
| 102 | <b>170</b> | 0.010526 | 0.833 | 0.991 |     |            |          |       |       |
| 103 | <b>170</b> | 0.010526 | 0.833 | 0.991 |     |            |          |       |       |

Table de refroidissement :

**Table IV.15 –  $\mu$  (t), M(t) et D(t) E<sub>5</sub>.**

| N° | TTR (min) | $\mu$   | M(t)  | D(t)  |
|----|-----------|---------|-------|-------|
| 1  | 10        | 0.01181 | 0.111 | 0.948 |
| 2  | 10        | 0.01181 | 0.111 | 0.948 |
| 3  | 15        | 0.01181 | 0.162 | 0.948 |
| 4  | 15        | 0.01181 | 0.162 | 0.948 |
| 5  | 20        | 0.01181 | 0.211 | 0.947 |
| 6  | 20        | 0.01181 | 0.211 | 0.947 |
| 7  | 25        | 0.01181 | 0.256 | 0.947 |
| 8  | 25        | 0.01181 | 0.256 | 0.947 |
| 9  | 30        | 0.01181 | 0.299 | 0.947 |
| 10 | 30        | 0.01181 | 0.299 | 0.947 |
| 11 | 35        | 0.01181 | 0.339 | 0.947 |
| 12 | 40        | 0.01181 | 0.377 | 0.947 |
| 13 | 40        | 0.01181 | 0.377 | 0.947 |
| 14 | 50        | 0.01181 | 0.446 | 0.947 |
| 15 | 50        | 0.01181 | 0.446 | 0.947 |
| 16 | 55        | 0.01181 | 0.478 | 0.946 |
| 17 | 55        | 0.01181 | 0.478 | 0.946 |
| 18 | 55        | 0.01181 | 0.478 | 0.946 |
| 19 | 60        | 0.01181 | 0.508 | 0.946 |
| 20 | 60        | 0.01181 | 0.508 | 0.946 |
| 21 | 60        | 0.01181 | 0.508 | 0.946 |
| 22 | 60        | 0.01181 | 0.508 | 0.946 |
| 23 | 60        | 0.01181 | 0.508 | 0.946 |
| 24 | 70        | 0.01181 | 0.563 | 0.946 |
| 25 | 80        | 0.01181 | 0.612 | 0.946 |
| 26 | 80        | 0.01181 | 0.612 | 0.946 |
| 27 | 85        | 0.01181 | 0.634 | 0.946 |
| 28 | 95        | 0.01181 | 0.675 | 0.946 |
| 29 | 95        | 0.01181 | 0.675 | 0.946 |
| 30 | 95        | 0.01181 | 0.675 | 0.946 |
| 31 | 105       | 0.01181 | 0.711 | 0.946 |
| 32 | 110       | 0.01181 | 0.728 | 0.946 |
| 33 | 110       | 0.01181 | 0.728 | 0.946 |
| 34 | 170       | 0.01181 | 0.866 | 0.946 |
| 35 | 175       | 0.01181 | 0.874 | 0.946 |
| 36 | 230       | 0.01181 | 0.934 | 0.946 |
| 37 | 325       | 0.01181 | 0.979 | 0.946 |
| 38 | 510       | 0.01181 | 0.998 | 0.946 |

Tracteur de filage :

Table IV.16 –  $\mu$  (t), M(t) et D(t) E<sub>3</sub>.

| N° | TTR (min) | $\mu$    | M(t)  | D(t)  | N° | TTR (min)  | $\mu$    | M(t)  | D(t)  |
|----|-----------|----------|-------|-------|----|------------|----------|-------|-------|
| 1  | <b>10</b> | 0.005432 | 0.053 | 0.999 | 44 | <b>50</b>  | 0.005432 | 0.238 | 0.995 |
| 2  | <b>10</b> | 0.005432 | 0.053 | 0.999 | 45 | <b>50</b>  | 0.005432 | 0.238 | 0.995 |
| 3  | <b>15</b> | 0.005432 | 0.078 | 0.998 | 46 | <b>50</b>  | 0.005432 | 0.238 | 0.995 |
| 4  | <b>15</b> | 0.005432 | 0.078 | 0.998 | 47 | <b>55</b>  | 0.005432 | 0.258 | 0.995 |
| 5  | <b>15</b> | 0.005432 | 0.078 | 0.998 | 48 | <b>55</b>  | 0.005432 | 0.258 | 0.995 |
| 6  | <b>15</b> | 0.005432 | 0.078 | 0.998 | 49 | <b>60</b>  | 0.005432 | 0.278 | 0.994 |
| 7  | <b>15</b> | 0.005432 | 0.078 | 0.998 | 50 | <b>60</b>  | 0.005432 | 0.278 | 0.994 |
| 8  | <b>20</b> | 0.005432 | 0.103 | 0.998 | 51 | <b>60</b>  | 0.005432 | 0.278 | 0.994 |
| 9  | <b>20</b> | 0.005432 | 0.103 | 0.998 | 52 | <b>70</b>  | 0.005432 | 0.316 | 0.994 |
| 10 | <b>20</b> | 0.005432 | 0.103 | 0.998 | 53 | <b>75</b>  | 0.005432 | 0.335 | 0.993 |
| 11 | <b>20</b> | 0.005432 | 0.103 | 0.998 | 54 | <b>75</b>  | 0.005432 | 0.335 | 0.993 |
| 12 | <b>20</b> | 0.005432 | 0.103 | 0.998 | 55 | <b>75</b>  | 0.005432 | 0.335 | 0.993 |
| 13 | <b>20</b> | 0.005432 | 0.103 | 0.998 | 56 | <b>80</b>  | 0.005432 | 0.352 | 0.993 |
| 14 | <b>25</b> | 0.005432 | 0.127 | 0.997 | 57 | <b>80</b>  | 0.005432 | 0.352 | 0.993 |
| 15 | <b>25</b> | 0.005432 | 0.127 | 0.997 | 58 | <b>85</b>  | 0.005432 | 0.37  | 0.993 |
| 16 | <b>25</b> | 0.005432 | 0.127 | 0.997 | 59 | <b>90</b>  | 0.005432 | 0.387 | 0.992 |
| 17 | <b>25</b> | 0.005432 | 0.127 | 0.997 | 60 | <b>95</b>  | 0.005432 | 0.403 | 0.992 |
| 18 | <b>25</b> | 0.005432 | 0.127 | 0.997 | 61 | <b>95</b>  | 0.005432 | 0.403 | 0.992 |
| 19 | <b>25</b> | 0.005432 | 0.127 | 0.997 | 62 | <b>95</b>  | 0.005432 | 0.403 | 0.992 |
| 20 | <b>30</b> | 0.005432 | 0.15  | 0.997 | 63 | <b>100</b> | 0.005432 | 0.419 | 0.992 |
| 21 | <b>30</b> | 0.005432 | 0.15  | 0.997 | 64 | <b>100</b> | 0.005432 | 0.419 | 0.992 |
| 22 | <b>30</b> | 0.005432 | 0.15  | 0.997 | 65 | <b>110</b> | 0.005432 | 0.45  | 0.991 |
| 23 | <b>35</b> | 0.005432 | 0.173 | 0.997 | 66 | <b>110</b> | 0.005432 | 0.45  | 0.991 |
| 24 | <b>35</b> | 0.005432 | 0.173 | 0.997 | 67 | <b>110</b> | 0.005432 | 0.45  | 0.991 |
| 25 | <b>35</b> | 0.005432 | 0.173 | 0.997 | 68 | <b>110</b> | 0.005432 | 0.45  | 0.991 |
| 26 | <b>35</b> | 0.005432 | 0.173 | 0.997 | 69 | <b>110</b> | 0.005432 | 0.45  | 0.991 |
| 27 | <b>35</b> | 0.005432 | 0.173 | 0.997 | 70 | <b>110</b> | 0.005432 | 0.45  | 0.991 |
| 28 | <b>35</b> | 0.005432 | 0.173 | 0.997 | 71 | <b>110</b> | 0.005432 | 0.45  | 0.991 |
| 29 | <b>35</b> | 0.005432 | 0.173 | 0.997 | 72 | <b>110</b> | 0.005432 | 0.45  | 0.991 |
| 30 | <b>35</b> | 0.005432 | 0.173 | 0.997 | 73 | <b>110</b> | 0.005432 | 0.45  | 0.991 |
| 31 | <b>40</b> | 0.005432 | 0.195 | 0.996 | 74 | <b>110</b> | 0.005432 | 0.45  | 0.991 |
| 32 | <b>40</b> | 0.005432 | 0.195 | 0.996 | 75 | <b>115</b> | 0.005432 | 0.465 | 0.991 |
| 33 | <b>40</b> | 0.005432 | 0.195 | 0.996 | 76 | <b>115</b> | 0.005432 | 0.465 | 0.991 |
| 34 | <b>40</b> | 0.005432 | 0.195 | 0.996 | 77 | <b>115</b> | 0.005432 | 0.465 | 0.991 |
| 35 | <b>40</b> | 0.005432 | 0.195 | 0.996 | 78 | <b>115</b> | 0.005432 | 0.465 | 0.991 |
| 36 | <b>45</b> | 0.005432 | 0.217 | 0.996 | 79 | <b>115</b> | 0.005432 | 0.465 | 0.991 |
| 37 | <b>45</b> | 0.005432 | 0.217 | 0.996 | 80 | <b>115</b> | 0.005432 | 0.465 | 0.991 |
| 38 | <b>45</b> | 0.005432 | 0.217 | 0.996 | 81 | <b>120</b> | 0.005432 | 0.479 | 0.990 |
| 39 | <b>45</b> | 0.005432 | 0.217 | 0.996 | 82 | <b>130</b> | 0.005432 | 0.506 | 0.990 |
| 40 | <b>45</b> | 0.005432 | 0.217 | 0.996 | 83 | <b>135</b> | 0.005432 | 0.52  | 0.990 |

|    |            |          |       |       |     |            |          |       |       |
|----|------------|----------|-------|-------|-----|------------|----------|-------|-------|
| 41 | <b>45</b>  | 0.005432 | 0.217 | 0.996 | 84  | <b>135</b> | 0.005432 | 0.52  | 0.990 |
| 42 | <b>50</b>  | 0.005432 | 0.238 | 0.995 | 85  | <b>140</b> | 0.005432 | 0.533 | 0.989 |
| 43 | <b>50</b>  | 0.005432 | 0.238 | 0.995 | 86  | <b>140</b> | 0.005432 | 0.533 | 0.989 |
| 87 | <b>145</b> | 0.005432 | 0.545 | 0.989 | 102 | <b>190</b> | 0.005432 | 0.644 | 0.987 |
| 88 | <b>145</b> | 0.005432 | 0.545 | 0.989 | 103 | <b>195</b> | 0.005432 | 0.653 | 0.987 |
| 89 | <b>145</b> | 0.005432 | 0.545 | 0.989 | 104 | <b>205</b> | 0.005432 | 0.672 | 0.987 |
| 90 | <b>145</b> | 0.005432 | 0.545 | 0.989 | 105 | <b>205</b> | 0.005432 | 0.672 | 0.987 |
| 91 | <b>155</b> | 0.005432 | 0.569 | 0.989 | 106 | <b>210</b> | 0.005432 | 0.68  | 0.986 |
| 92 | <b>165</b> | 0.005432 | 0.592 | 0.988 | 107 | <b>215</b> | 0.005432 | 0.689 | 0.986 |
| 93 | <b>165</b> | 0.005432 | 0.592 | 0.988 | 108 | <b>215</b> | 0.005432 | 0.689 | 0.986 |
| 94 | <b>170</b> | 0.005432 | 0.603 | 0.988 | 109 | <b>220</b> | 0.005432 | 0.697 | 0.986 |
| 95 | <b>170</b> | 0.005432 | 0.603 | 0.988 | 110 | <b>225</b> | 0.005432 | 0.705 | 0.986 |
| 96 | <b>170</b> | 0.005432 | 0.603 | 0.988 | 111 | <b>230</b> | 0.005432 | 0.713 | 0.986 |
| 97 | <b>170</b> | 0.005432 | 0.603 | 0.988 | 112 | <b>230</b> | 0.005432 | 0.713 | 0.986 |
| 87 | <b>145</b> | 0.005432 | 0.545 | 0.989 | 113 | <b>230</b> | 0.005432 | 0.713 | 0.986 |
| 88 | <b>145</b> | 0.005432 | 0.545 | 0.989 | 114 | <b>230</b> | 0.005432 | 0.713 | 0.986 |
| 89 | <b>145</b> | 0.005432 | 0.545 | 0.989 | 115 | <b>235</b> | 0.005432 | 0.721 | 0.986 |
| 90 | <b>145</b> | 0.005432 | 0.545 | 0.989 | 116 | <b>255</b> | 0.005432 | 0.75  | 0.985 |
| 91 | <b>155</b> | 0.005432 | 0.569 | 0.989 | 117 | <b>260</b> | 0.005432 | 0.756 | 0.985 |
| 92 | <b>165</b> | 0.005432 | 0.592 | 0.988 | 118 | <b>270</b> | 0.005432 | 0.769 | 0.985 |
| 93 | <b>165</b> | 0.005432 | 0.592 | 0.988 | 119 | <b>275</b> | 0.005432 | 0.775 | 0.985 |
| 94 | <b>170</b> | 0.005432 | 0.603 | 0.988 | 120 | <b>280</b> | 0.005432 | 0.781 | 0.985 |
| 95 | <b>170</b> | 0.005432 | 0.603 | 0.988 | 121 | <b>285</b> | 0.005432 | 0.787 | 0.984 |
| 96 | <b>170</b> | 0.005432 | 0.603 | 0.988 | 122 | <b>290</b> | 0.005432 | 0.793 | 0.984 |
| 97 | <b>170</b> | 0.005432 | 0.603 | 0.988 | 123 | 290        | 0.005432 | 0.793 | 0.984 |
| 87 | <b>145</b> | 0.005432 | 0.545 | 0.989 | 124 | 295        | 0.005432 | 0.799 | 0.984 |
| 88 | <b>145</b> | 0.005432 | 0.545 | 0.989 | 125 | 300        | 0.005432 | 0.804 | 0.984 |
| 89 | <b>145</b> | 0.005432 | 0.545 | 0.989 | 126 | 300        | 0.005432 | 0.804 | 0.984 |
| 90 | <b>145</b> | 0.005432 | 0.545 | 0.989 | 127 | 325        | 0.005432 | 0.829 | 0.984 |
| 91 | <b>155</b> | 0.005432 | 0.569 | 0.989 | 128 | 330        | 0.005432 | 0.833 | 0.983 |
| 92 | <b>165</b> | 0.005432 | 0.592 | 0.988 | 129 | 390        | 0.005432 | 0.88  | 0.983 |
| 93 | <b>165</b> | 0.005432 | 0.592 | 0.988 | 130 | 410        | 0.005432 | 0.892 | 0.982 |
| 94 | <b>170</b> | 0.005432 | 0.603 | 0.988 | 131 | 415        | 0.005432 | 0.895 | 0.982 |
| 95 | <b>170</b> | 0.005432 | 0.603 | 0.988 | 132 | 440        | 0.005432 | 0.908 | 0.982 |
| 96 | <b>170</b> | 0.005432 | 0.603 | 0.988 | 133 | 465        | 0.005432 | 0.92  | 0.982 |
| 97 | <b>170</b> | 0.005432 | 0.603 | 0.988 | 134 | 470        | 0.005432 | 0.922 | 0.982 |
| 87 | <b>145</b> | 0.005432 | 0.545 | 0.989 | 135 | 480        | 0.005432 | 0.926 | 0.982 |
| 88 | <b>145</b> | 0.005432 | 0.545 | 0.989 | 136 | 495        | 0.005432 | 0.932 | 0.982 |
| 89 | <b>145</b> | 0.005432 | 0.545 | 0.989 | 137 | 515        | 0.005432 | 0.939 | 0.981 |
| 90 | <b>145</b> | 0.005432 | 0.545 | 0.989 | 138 | 555        | 0.005432 | 0.951 | 0.981 |
| 91 | <b>155</b> | 0.005432 | 0.569 | 0.989 | 139 | 580        | 0.005432 | 0.957 | 0.981 |
| 92 | <b>165</b> | 0.005432 | 0.592 | 0.988 | 140 | 585        | 0.005432 | 0.958 | 0.981 |
| 93 | <b>165</b> | 0.005432 | 0.592 | 0.988 | 141 | 590        | 0.005432 | 0.959 | 0.981 |
| 94 | <b>170</b> | 0.005432 | 0.603 | 0.988 | 142 | 655        | 0.005432 | 0.972 | 0.981 |
| 95 | <b>170</b> | 0.005432 | 0.603 | 0.988 | 143 | 670        | 0.005432 | 0.974 | 0.981 |

|     |            |          |       |       |     |     |          |       |       |
|-----|------------|----------|-------|-------|-----|-----|----------|-------|-------|
| 96  | <b>170</b> | 0.005432 | 0.603 | 0.988 | 144 | 675 | 0.005432 | 0.974 | 0.981 |
| 97  | <b>170</b> | 0.005432 | 0.603 | 0.988 | 145 | 770 | 0.005432 | 0.985 | 0.981 |
| 98  | <b>170</b> | 0.005432 | 0.603 | 0.988 | 146 | 795 | 0.005432 | 0.987 | 0.981 |
| 99  | <b>170</b> | 0.005432 | 0.603 | 0.988 | 147 | 875 | 0.005432 | 0.991 | 0.980 |
| 100 | <b>175</b> | 0.005432 | 0.613 | 0.988 | 148 | 960 | 0.005432 | 0.995 | 0.980 |
| 101 | <b>180</b> | 0.005432 | 0.624 | 0.988 | 149 | 960 | 0.005432 | 0.995 | 0.980 |



## Annexe B

### B.1 Table d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov

| $\alpha$ |                  |                  |                  |                  |                  |
|----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| N        | 0.20             | 0.15             | 0.10             | 0.05             | 0.01             |
| 1        | 0.900            | 0.925            | 0.950            | 0.975            | 0.995            |
| 2        | 0.684            | 0.726            | 0.776            | 0.842            | 0.929            |
| 3        | 0.565            | 0.597            | 0.642            | 0.708            | 0.828            |
| 4        | 0.494            | 0.525            | 0.564            | 0.624            | 0.733            |
| 5        | 0.446            | 0.474            | 0.510            | 0.565            | 0.669            |
| 6        | 0.410            | 0.436            | 0.470            | 0.621            | 0.610            |
| 7        | 0.381            | 0.405            | 0.438            | 0.486            | 0.577            |
| 8        | 0.358            | 0.381            | 0.411            | 0.457            | 0.543            |
| 9        | 0.339            | 0.360            | 0.388            | 0.432            | 0.514            |
| 10       | 0.322            | 0.342            | 0.368            | 0.410            | 0.490            |
| 11       | 0.307            | 0.326            | 0.352            | 0.391            | 0.468            |
| 12       | 0.295            | 0.313            | 0.338            | 0.375            | 0.450            |
| 13       | 0.284            | 0.302            | 0.325            | 0.361            | 0.433            |
| 14       | 0.274            | 0.292            | 0.314            | 0.349            | 0.418            |
| 15       | 0.266            | 0.283            | 0.304            | 0.338            | 0.404            |
| 16       | 0.258            | 0.274            | 0.295            | 0.328            | 0.392            |
| 17       | 0.250            | 0.266            | 0.286            | 0.318            | 0.381            |
| 18       | 0.244            | 0.259            | 0.278            | 0.309            | 0.371            |
| 19       | 0.237            | 0.252            | 0.272            | 0.301            | 0.363            |
| 20       | 0.231            | 0.246            | 0.264            | 0.294            | 0.356            |
| 25       | 0.21             | 0.22             | 0.24             | 0.27             | 0.32             |
| 30       | 0.19             | 0.20             | 0.22             | 0.24             | 0.29             |
| 35       | 1.18             | 0.19             | 0.21             | 0.23             | 0.27             |
| > 35     | 1.07/ $\sqrt{N}$ | 1.14/ $\sqrt{N}$ | 1.22/ $\sqrt{N}$ | 1.36/ $\sqrt{N}$ | 1.63/ $\sqrt{N}$ |

Table d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov B.1

Table B.2– Valeurs critiques de  $d(n\alpha)$ , pour une taille  $n$  de l'échantillon et des niveaux de signification  $\alpha$ .

## B.2 Introduction to EasyFit 5.6

EasyFit : Logiciel d'ajustage de distributions

EasyFit permet d'ajuster automatiquement les distributions aux données échantillon et de sélectionner le meilleur modèle en secondes. Il est conçu de façon à rendre l'analyse des données aussi facile que possible, laissant en coulisse les détails techniques compliqués et vous permettant ainsi de vous concentrer sur les objectifs de vos affaires.

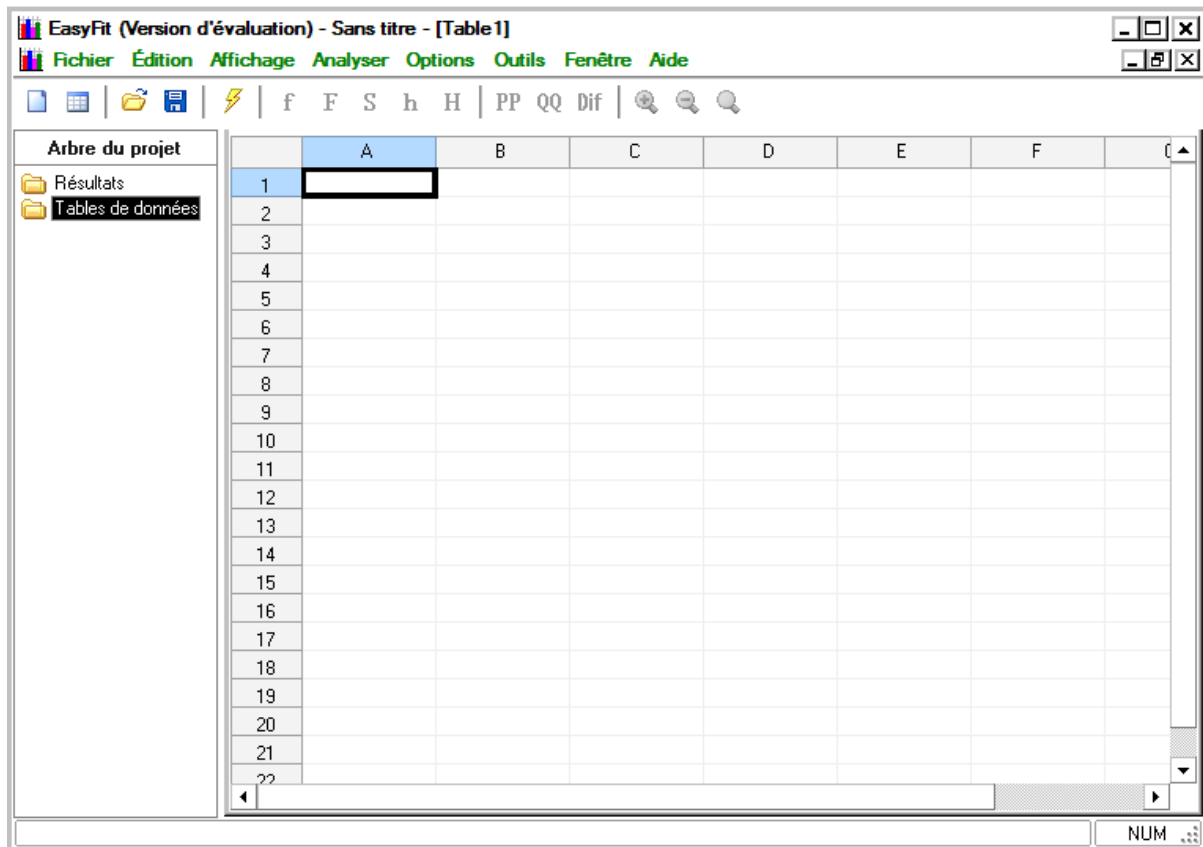


Figure IV.37–Interface de logiciel EasyFit

### Avantages d'EasyFit :

- fait gagné du temps : réduit votre temps d'analyses de 70-95% par rapport aux méthodes manuelles
  - fait gagner de l'argent : empêche les erreurs d'analyses et vous aide à prendre de meilleures décisions
  - assure la haute qualité de vos projets
  - facile à apprendre et utiliser : ne demande que les connaissances de base de la statistique
- EasyFit : Fonctionnalités

EasyFit permet de sélectionner facilement et rapidement la distribution de probabilités la mieux adaptée aux données. Ses fonctions clés comprennent :

- prise en charge de plus de 55 distributions
- mode d'ajustage de données puissant et automatisé
- possibilité d'ajustage manuel de distributions
- graphiques interactifs
- tests de qualité d'ajustage

L'environnement intégré fourni par EasyFit comprend gestion de données, analyse et possibilités d'afficher des rapports qui vous permettent d'organiser votre travail et le rendre plus productif.

Ses nombreuses fonctions uniques font de cet outil puissant d'analyse de données une solution très flexible. Avec EasyFit vous pouvez :

Analyser vos groupes de données même s'ils sont très grands développer de meilleurs modèles en appliquant des distributions avancées prendre de bonnes et rapides décisions avec des rapports hypertextes

De plus, EasyFit permet de visualiser des graphiques de distributions et d'explorer leurs propriétés sans entrer les données, de générer des nombres aléatoires, de calculer les statistiques descriptives etc.

The latest version of EasyFit can be downloaded from  
<http://www.mathwave.com/downloads.html>

## Annexe C

### C.1 Le tableau suivant représente les valeurs de A et B en fonction de $\beta$

| $\beta$ | A      | B     | $\beta$ | A      | B     | $\beta$ | A      | B     |
|---------|--------|-------|---------|--------|-------|---------|--------|-------|
| 0.50    | 2.0000 | 4.470 | 1.50    | 0.9027 | 0.613 | 3.00    | 0.8930 | 0.325 |
| 0.55    | 1.7024 | 3.350 | 1.55    | 0.8994 | 0.593 | 3.10    | 0.8943 | 0.316 |
| 0.60    | 1.5046 | 2.650 | 1.60    | 0.8966 | 0.574 | 3.20    | 0.8957 | 0.307 |
| 0.65    | 1.3663 | 2.180 | 1.65    | 0.8942 | 0.556 | 3.30    | 0.8970 | 0.299 |
| 0.70    | 1.2638 | 1.850 | 1.70    | 0.8922 | 0.540 | 3.40    | 0.8984 | 0.292 |
| 0.75    | 1.1906 | 1.610 | 1.75    | 0.8906 | 0.525 | 3.50    | 0.8997 | 0.285 |
| 0.80    | 1.1330 | 1.430 | 1.80    | 0.8893 | 0.511 | 3.60    | 0.9011 | 0.278 |
| 0.85    | 1.0880 | 1.290 | 1.85    | 0.8882 | 0.498 | 3.70    | 0.9025 | 0.272 |
| 0.90    | 1.0522 | 1.770 | 1.90    | 0.8874 | 0.486 | 3.80    | 0.9038 | 0.266 |
| 0.95    | 1.0234 | 1.080 | 1.95    | 0.8867 | 0.474 | 3.90    | 0.9051 | 0.260 |
| 1.00    | 1.0000 | 1.000 | 2.00    | 0.8862 | 0.463 | 4.00    | 0.9064 | 0.254 |
| 1.05    | 0.9803 | 0.934 | 2.10    | 0.8857 | 0.443 | 4.10    | 0.9077 | 0.249 |
| 1.10    | 0.9649 | 0.878 | 2.20    | 0.8856 | 0.425 | 4.20    | 0.9089 | 0.244 |
| 1.15    | 0.9517 | 0.830 | 2.30    | 0.8859 | 0.409 | 4.30    | 0.9102 | 0.239 |
| 1.20    | 0.9407 | 0.787 | 2.40    | 0.8865 | 0.393 | 4.40    | 0.9114 | 0.235 |
| 1.25    | 0.9314 | 0.750 | 2.50    | 0.8873 | 0.380 | 4.50    | 0.9126 | 0.230 |
| 1.30    | 0.9236 | 0.716 | 2.60    | 0.8882 | 0.367 | 4.60    | 0.9137 | 0.226 |
| 1.35    | 0.9170 | 0.687 | 2.70    | 0.8893 | 0.355 | 4.70    | 0.9147 | 0.222 |
| 1.40    | 0.9114 | 0.660 | 2.80    | 0.8905 | 0.344 | 4.80    | 0.9160 | 0.218 |
| 1.45    | 0.9067 | 0.635 | 2.90    | 0.8917 | 0.334 | 4.90    | 0.9171 | 0.214 |

Table de valeurs de A et B en fonction de  $\beta$  C.1