

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

## **UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**  
**FILIERE DE GENIE MECANIQUE**

# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences & Technologie**

**Filière : Génie Mécanique**

**Parcours : Master**

**Spécialité : Maintenance industrielle**

## **THÈME**

**Evaluation de la FMD d'un Four à arc électrique  
au niveau l'entreprise d'ALFET -Tiaret**

***Préparé par: Mr Fouaguig Djilali et Dais Oussama***

### **Devant le Jury :**

| <b>Nom et prénoms</b> | <b>Grade</b> | <b>Lieu d'exercice</b> | <b>Qualité</b> |
|-----------------------|--------------|------------------------|----------------|
| Elhadi Machkour       | M.C.B        | UIK Tiaret             | Président      |
| Saad Mohamed          | M.A.A        | UIK Tiaret             | Examinateur    |
| Guemmour Mohamed B    | M.A.A        | UIK Tiaret             | Encadreur      |

**PROMOTION 2016 /2017**

## *Remerciements*

*Toute la Gratitude, tout d'abord à Dieu qui nous a donné la force Pour terminer ce modeste travail.*

*Toutes nos infinies gratitudes à notre encadreur, Monsieur Guemmour Mohamed Boutkhil pour son encadrement et ses aides précieuses.*

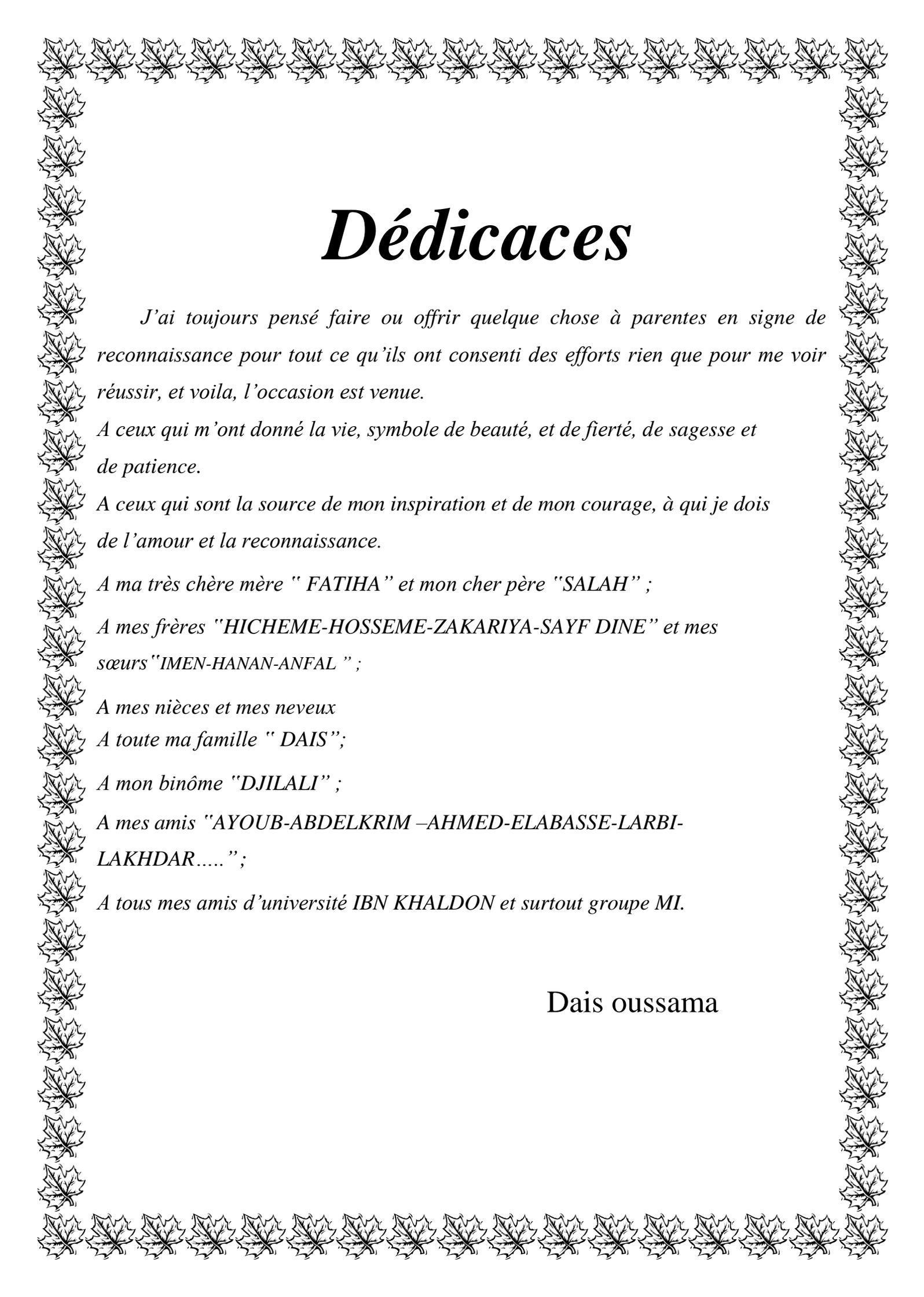
*Nous remercions aussi les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter le jugement de notre travail.*

*Notre sincère reconnaissance à nos enseignants du département: Génie mécanique.*

*Nos remerciements s'adressent aussi, à tous les travailleurs de la département de maintenance de la société d'ALFET.*

*Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail, trouvent ici l'expression de notre profondes gratitudes et respects.*

**FOUAGUIG & DAIS**



# *Dédicaces*

*J'ai toujours pensé faire ou offrir quelque chose à parentes en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti des efforts rien que pour me voir réussir, et voila, l'occasion est venue.*

*A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.*

*A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et la reconnaissance.*

*A ma très chère mère " FATIHA " et mon cher père " SALAH " ;*

*A mes frères " HICHEME-HOSSEME-ZAKARIYA-SAYF DINE " et mes sœurs " IMEN-HANAN-ANFAL " ;*

*A mes nièces et mes neveux*

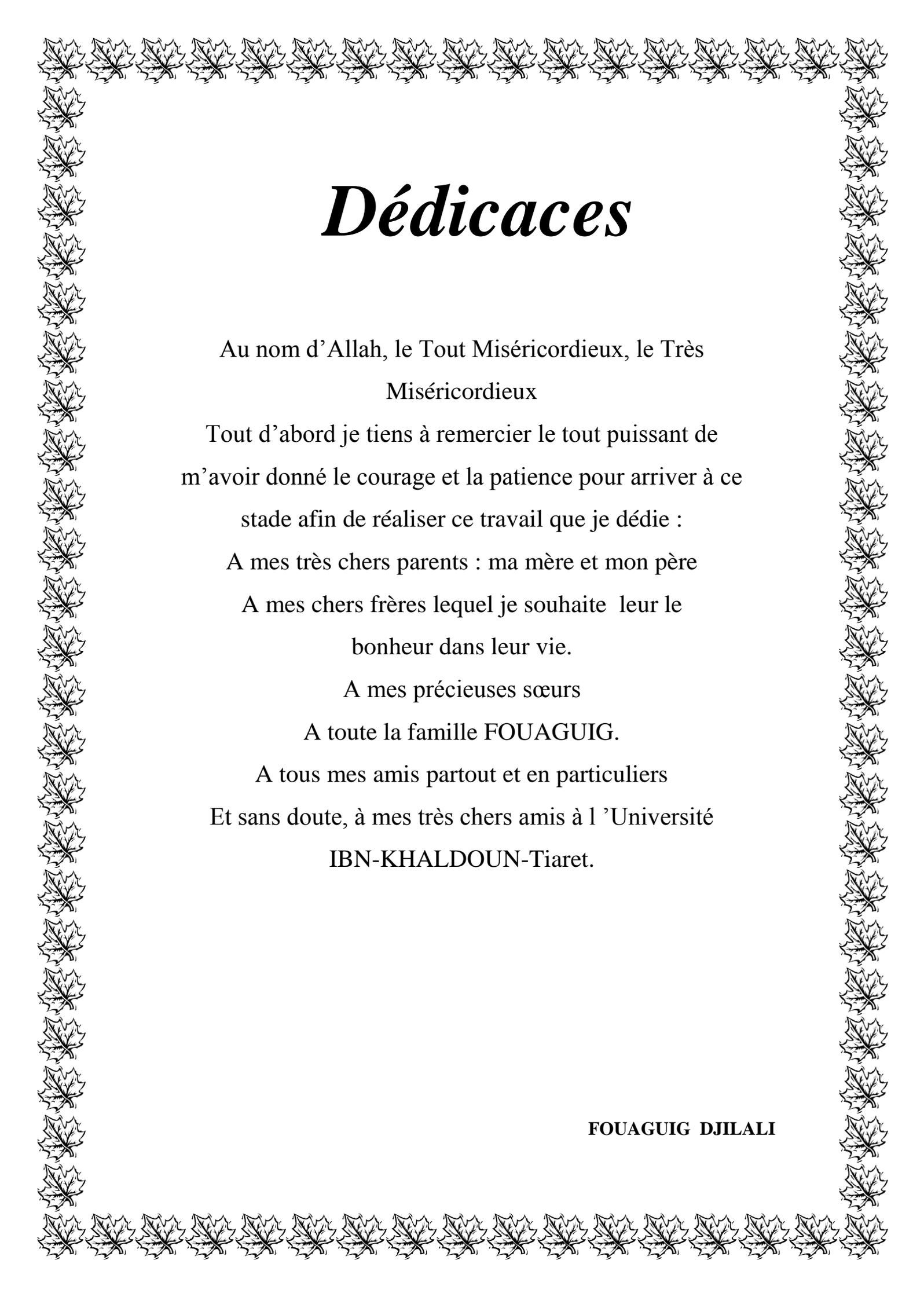
*A toute ma famille " DAIS " ;*

*A mon binôme " DJILALI " ;*

*A mes amis " AYOUB-ABDELKRIM – AHMED-ELABASSE-LARBI-LAKHDAR..... " ;*

*A tous mes amis d'université IBN KHALDON et surtout groupe MI.*

**Dais oussama**



# *Dédicaces*

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très  
Miséricordieux

Tout d'abord je tiens à remercier le tout puissant de  
m'avoir donné le courage et la patience pour arriver à ce

stade afin de réaliser ce travail que je dédie :

A mes très chers parents : ma mère et mon père

A mes chers frères lequel je souhaite leur le  
bonheur dans leur vie.

A mes précieuses sœurs

A toute la famille FOUAGUIG.

A tous mes amis partout et en particuliers

Et sans doute, à mes très chers amis à l'Université

IBN-KHALDOUN-Tiaret.

**FOUAGUIG DJILALI**

# SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

|   |    |
|---|----|
| <b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....  | 01 |
| <b>Chapitre 01 :</b>  |    |
| <b>1.1. INTRODUCTION</b> .....  | 02 |
| <b>1.2. DEFINITIONS</b> .....   | 02 |
| <b>1.2.1. Notion de fiabilité</b> .....                                       | 02 |
| 1.2.1.1. Définition de fiabilité .....  | 02 |
| 1.2.1.2.Fonction de fiabilité.....  | 03 |
| 1.2.1.3. Les types de fiabilité.....  | 04 |
| <b>1.2.2. Notion de défaillance</b> .....                                     | 05 |
| 1.2.2.1. Définition de la défaillance.....                                    | 05 |
| 1.2.2.2. Fonction de répartition en termes de défaillance .....               | 05 |
| 1.2.2.3 Fonction de densité $f(t)$ .....                                      | 05 |
| 1.2.2.4 Types de défaillances .....   | 06 |
| 1.2.2.5. Modes de défaillance .....   | 07 |
| 1.2.2.6. Modes de défaillance génériques.....                                 | 07 |
| <b>1.2.3. Taux de défaillance</b> .....                                       | 08 |
| <b>1.3. QUANTIFICATION DE LA FIABILITE</b> .....                              | 09 |
| <b>1.3.1. Indicateurs de fiabilité (<math>\lambda</math>) et (MTBF)</b> ..... | 09 |
| <b>1.3.2 Les lois de fiabilité</b> .....                                      | 11 |
| 1.3.2.1 Lois analytique discrètes.....  | 11 |
| 1.3.2.2. Lois analytique continues.....                                       | 13 |
| 1.3.2.3Lois approchées.....   | 16 |
| <b>1.4. EVOLUTION DES COUTS EN FONCTION DE LA FIABILITE</b> .....             | 16 |
| <b>1.5. LA RELATION ENTRE LA FIABILITE ET LA MAINTENANCE</b> .....            | 17 |
| <b>1.6. CONCEPT FMD D'UN SYSTEME</b> .....                                    | 18 |
| <b>1.6.1. Fiabilité d'un système</b> .....                                    | 18 |
| 1.6.1.1. Fiabilité de système constitué de plusieurs composants .....         | 18 |
| <b>1.6.2. La maintenabilité</b> .....   | 20 |
| 1.6.2.1. Définition .....   | 20 |
| 1.6.2.2 Quantification de la maintenabilité .....                             | 20 |

|   |           |
|---|-----------|
| 1.6.2.3. Amélioration de la maintenabilité .....                    | 21        |
| 1.6.2.4. Taux de réparation .....                                   | 21        |
| <b>1.6.3. La disponibilité</b> .....                                | <b>22</b> |
| 1.6.3.1. Définition .....   | 22        |
| 1.6.3.2. Quantification de la disponibilité .....                   | 22        |
| 1.6.3.3. Amélioration de la disponibilité .....                     | 23        |
| 1.6.3.4. La relation entre les notions FMD .....                    | 23        |
| <b>CONCLUSION</b> .....   | <b>24</b> |
| <br><b>Chapitre 02 :</b>  |           |
| <b>2.1 INTRODUCTION</b> .....                                       | <b>25</b> |
| <b>2.2. FOUR ELECTRIQUE</b> .....                                   | <b>26</b> |
| <b>2.2.1. Différents types de fours électriques</b> .....           | <b>26</b> |
| 2.2.2.1. Fours électriques à résistance .....                       | 26        |
| 2.2.2.2. Four électrique à micro ondes .....                        | 27        |
| 2.2.2.3 Four électrique à induction .....                           | 28        |
| <b>2.3 FOUR A ARC</b> .....   | <b>30</b> |
| 2.3.1. Définition .....   | 3         |
| 2.3.2. Arc électrique .....   | 29        |
| 2.3.2.1. Définition .....   | 29        |
| 2.3.2.2. Propriétés .....   | 30        |
| 2.3.3. Principe du four à arc électrique .....                      | 31        |
| 2.3.4. Caractéristiques de fonctionnement du four .....             | 32        |
| 2.3.5. Les facteurs liés au fonctionnement des FAE .....            | 34        |
| <b>2.4. LES TYBE DES FOURS A ARC</b> .....                          | <b>35</b> |
| 2.4.1 Four à arc d'après leur nature d'arc .....                    | 35        |
| 2.4.2. Four à arc d'après leur nature d'alimentation .....          | 35        |
| 2.4.2.1. Four alimenté en courant continu .....                     | 35        |
| 2.4.2.2. Four à arc à courant alternatif .....                      | 37        |
| <b>2.5. DESCRIPTION DES EQUIPEMENTS EAF</b> .....                   | <b>38</b> |
| 2.5.1. Système de basculement du four .....                         | 39        |
| 2.5.2. Cuve et panneaux refroidis .....                             | 40        |
| 2.5.3. EBT (dispositif de coulée en poche à trou excentrique) ..... | 40        |
| 2.5.4. Lance d'ouverture EBT : (si prévu) .....                     | 41        |
| 2.5.5. Ensemble de levage et rotation de la voûte .....             | 41        |
| 2.5.6. Ensemble de levage des électrodes .....                      | 41        |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.5.7. Bras porte-électrodes conducteur .....              | 41        |
| 2.5.8. Circuit secondaire .....                            | 42        |
| 2.5.9. Electrode au graphite .....                         | 42        |
| 2.5.10. Installation d'aspiration de fumée .....           | 42        |
| 2.5.11. Système de graissage .....                         | 42        |
| 2.5.12. Système de refroidissement.....                    | 42        |
| 2.5.13. Système hydraulique .....                          | 43        |
| 2.5.14. Chariot poche .....                                | 43        |
| 2.5.15. Auxiliaire .....                                   | 43        |
| <b>2.6. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU FOUR A ARC .....</b> | <b>43</b> |
| <b>CONCLUSION.....</b>                                     | <b>44</b> |

## **Chapitre 03 :**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>3.1. INTRODUCTION.....</b>                                       | <b>45</b> |
| <b>3.2. FIABILITE OPERATIONNELLE.....</b>                           | <b>45</b> |
| 3.2.1 Exploitation de l'historique.....                             | 45        |
| 3.2.2. Calcul les indicateurs MTBF, MTTR, .....                     | 47        |
| 3.2.3. Analyse de courbe de taux de défaillance $\lambda(t)$ .....  | 48        |
| <b>3.3. FIABILITE PREVISIONNELLE.....</b>                           | <b>48</b> |
| 3.3.1. Calcul les paramètres de weibull.....                        | 48        |
| 3.3.2. Test (KOLMOGOROV SMIRNOV).....                               | 49        |
| 3.3.3. Exploitation les paramètres de weibull .....                 | 50        |
| 3.3.4. Etude de modèle de weibull.....                              | 52        |
| 3.3.4.1. La fonction de la densité de probabilité.....              | 52        |
| 3.3.4.2. Fonction de répartition F(t).....                          | 53        |
| 3.3.4.3. La fiabilité .....   | 54        |
| 3.3.4.4. Le taux de défaillance.....                                | 55        |
| <b>3.4. Calcul de maintenabilité et disponibilité du four .....</b> | <b>55</b> |
| 3.4.1. Calcul la maintenabilité de four.....                        | 55        |
| 3.4.2. Calcul la disponibilité du four .....                        | 56        |
| <b>CONCLUSION.....</b>  | <b>58</b> |
| <b>Conclusion générale.....</b>                                     | <b>59</b> |

## **Bibliographie**

## **Annexes**

## **Résumé**

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE 01

|  |    |
|--|----|
| Figure 1.1. Courbe densité de défaillance.....                             | 05 |
| Figure 1.2 Courbe de baignoire.....  | 08 |
| Figure 1.3 Diagramme des temps moyens.....                                 | 10 |
| Figure 1.4 Courbe de loi exponentielle.....                                | 14 |
| Figure 1.5. Courbes d'évolution des coûts en fonction de la fiabilité..... | 17 |
| Figure 1.6. Composants en série.....                                       | 19 |
| Figure 1.7. Composants en parallèle.....                                   | 19 |
| Figure 1.8. Probabilité de réparation au cours de temps.....               | 22 |
| Figure 1.9. Les facteur liés à la La disponibilité.....                    | 23 |
| Figure 1.10. la relation entre les notions FMD.....                        | 23 |

## CHAPITRE 02

|   |    |
|---|----|
| Figure 2.1. : Représentation schématique d'un four à résistance .....     | 26 |
| Figure 2.2: Principe de fonctionnement d'un four à micro onde.....        | 28 |
| Figure 2.3.: Chauffage d'un métal par induction .....                     | 29 |
| Figure 2.4. Four à arc.....   | 30 |
| Figure 2.5. La courbe« $u_a=f(1)$ ».....                                  | 31 |
| Figure 2.6. Schéma électrique du FAE.....                                 | 34 |
| Figure 2.7: Schéma électrique d'un four à arc à courant continu.....      | 36 |
| Figure 2.8. : Schéma électrique d'un four à arc à courant alternatif..... | 37 |
| Figure 2.9. Vue extérieure d'un four à arc à courant alternatif.....      | 38 |
| Figure 2.10. Les équipements d'un four à arc .....                        | 39 |

## CHAPITRE 03

|  |    |
|--|----|
| Figure 3.1: La Courbe de taux de défaillance $\lambda(t)$ .....  | 48 |
| Figure 3.2. Papier de WEIBULL.....                               | 49 |
| Figure 3.3: La Courbe de densité de probabilité.....             | 52 |
| Figure 3.4. La Courbe De Fonction Répartition.....               | 53 |
| Figure 3.5. La Courbe de la fonction de Fiabilité.....           | 54 |
| Figure 3.6. La Courbe de la fonction de taux de défaillance..... | 55 |
| Figure 3.7. La courbe de la maintenabilité.....                  | 56 |
| Figure 3.8. La courbe de disponibilité.....                      | 57 |

# LISTE DES TABLEAUX

## CHAPITRE 01

**Tableau 1.1** : Modes de défaillance génériques .....07

**Tableau 1.2** : Les facteurs liés à la maintenabilité ..... 21

## CHAPITRE 02

**Tableau 2.1** : Exemple de caractéristiques techniques .....34

## CHAPITRE 03

**Tableau 3.1**: l'historique des pannes (four à arc 5t) .....46

**Tableau 3.2** : les valeurs de  $F(t)$ ,  $R(t)$  et  $\lambda(t)$  ..... 47

**Tableau 3.3** : les valeurs de MTBF et MTTR .....47

**Tableau 3.4** : les valeurs de  $F(t)$  et  $R(t)$  en% .....48

**Tableau 3.5** : test de kolmogrov-smirnov ..... 50

**Tableau 3.6**: les valeurs de  $f(t)$  .....52

**Tableau 3.7**: les valeurs de  $F(t)$  ..... 53

**Tableau 3.8**:Calcul de la fiabilité .....54

**Tableau 3.9**: les valeurs de taux de défaillance  $\lambda(t)$  .....55

**Tableau 3.10**:les valeurs de la maintenabilité du four .....56

**Tableau 3.11**:les valeurs de la disponibilité instantané .....57

## LISTE DES SYMBOLES

**FAE** : Four à arc électrique.

**TTR**: temps de réparation.

**TBF** : temps de bon fonctionnement.

**UT** : temps entre défaillances.

**MUT** : moyenne temps entre défaillances.

**MDT** : durée moyenne d'indisponibilité (mean down time).

**MTTR**: Moyenne de temps de réparation.

**MTBF** : moyenne de temps de bon fonctionnement.

**D** : disponibilité.

**M** : maintenabilité.

**R (t)** : fonction de fiabilité.

**F(t)** : fonction de défaillance.

**f (t)** : fonction de densité de probabilité.

**$\lambda(t)$**  : Taux de défaillance.

**$\mu$**  : Taux de réparation.

**$\gamma$**  : Paramètre de position de loi de WEIBULL.

**$\eta$** : Paramètre d'échelle de loi de WEIBULL.

**$\beta$** : Paramètre de forme de loi de WEIBULL.

## **INTRODUCTION GENERALE**

Le thème s'inscrit dans un contexte technologique en relation avec le secteur industriel et particulièrement celui de l'industrie de fonderie. Dans ce type d'industrie, le processus de production s'appuie fortement sur l'exploitation des fours. Les entreprises qui activent dans ce domaine sont de plus en plus sensibilisées à l'importance des coûts induits par les défaillances accidentelles des systèmes de production telle que les fours à arc électrique.

Notre mémoire entre dans le cadre de la préparation du projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de master spécialité maintenance industrielle.

L'application des méthodes prévisionnelles de maintenance à des équipements de production est moins coûteuse que la perte de production due à un arrêt de l'équipement. L'arrêt d'une seule machine peut entraîner l'arrêt de toute la ligne de production.

Notre séjour au niveau de la société ALFET, nous a permis de consulter les fiches historique du four à arc électrique pour collecter les informations relatives à ses défaillances. Comme objectif d'amélioration de sa disponibilité, on se propose dans ce travail d'appliquer les concepts de fiabilité. Notre but était de mettre en œuvre le concept de la FMD pour améliorer la disponibilité d'un four à arc électrique.

Pour ce faire, notre manuscrit a été organisé en trois chapitres. Le premier chapitre présente " les concepts de La Fiabilité, la Maintenabilité et La Disponibilité". Le deuxième chapitre est consacré à l'étude bibliographique sur les fours à arc électrique. Le troisième chapitre expose l'application pratique de ces concepts sur l'équipement de Production étudiée (four à arc) sous " concept FMD d'un four à arc électrique. En Fin une conclusion a été présentée.

# CHAPITRE 01

*FMD des systèmes mécaniques*

## 1.1. INTRODUCTION

- A l'origine, la fiabilité concernait les systèmes à haute technologie (centrales nucléaires, station aérospatiales, plateforme off-shore, etc... ).
- Aujourd'hui, la fiabilité est devenue un paramètre clé de la qualité et d'aide à la décision, dans l'étude de la plupart des composants, produits et processus de masse, tel que : transport, énergie, bâtiments, composants électroniques, composants mécaniques, etc...
- La fiabilité est l'une des composantes essentielles de la qualité d'un produit et elle est retenue en tant que critère fondamental pour son l'élaboration.
- Elle est prise en considération dès le stade de la conception.
- De nombreux industriels œuvrent à l'évaluation et l'amélioration de la fiabilité de leurs produits au cours de leur cycle de développement, de la conception à la mise en service (conception, fabrication et exploitation) afin de développer leurs connaissances sur le rapport Coût / Fiabilité et maîtriser les sources de défaillance.
- L'analyse de la fiabilité constitue une phase indispensable dans toute étude de sûreté de fonctionnement.

## 1.2. DEFINITIONS

### 1.2.1. Notion de fiabilité

#### 1.2.1.1. Définition de fiabilité

La fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions et pour une durée donnée. Cette définition peut être formulée différemment : la fiabilité d'une entité est la probabilité moyenne de non défaillance de cette entité sur un intervalle de temps donné [1]

Les paramètres importants de la fiabilité sont donc les conditions d'utilisation du système, le temps ou le nombre de cycles.

La fiabilité d'un dispositif dépend aussi de la fonction remplie par ce dispositif.

- La fiabilité était devenue dans les années 1960 la science des défaillances.
- C'est le 9 avril 1962 que le mot même de « fiabilité », néologisme créé sur le vieux mot français « fiable » pour traduire l'anglais « reliability », a été admis par l'académie des sciences, la définition qui a été alors donnée par cette académie est la suivante : « Grandeur caractérisant la sûreté de fonctionnement, ou mesure de la probabilité de fonctionnement d'un appareillage selon des normes prescrites » [2].

Dans la pratique, On constate l'existence de plusieurs définitions.

Au sens commun, la notion de fiabilité correspond à la confiance de l'utilisateur dans le matériel qu'il utilise.

Au sens large, cette discipline (science des défaillances) peut couvrir les domaines d'activités suivants :

- L'analyse de défaillance des systèmes.
- La faisabilité opérationnelle.
- Les banques de données de fiabilité.
- Les essais de fiabilité.
- La fiabilité prévisionnelle.
- Les méthodes prévisionnelles de fiabilité et de sécurité.
- L'assurance de la fiabilité et de la qualité..

Et selon [AFNOR-2] elle est la caractéristique d'un dispositif exprimée par la probabilité par que ce dispositif accomplisse une fonction requise dans des conditions d'utilisation et pour une période de temps déterminée [3].

On désigne par  $T$  la variable aléatoire qui, à tout dispositif choisi au hasard, associe son temps de bon fonctionnement ou sa durée de vie avant une défaillance. Pour simplifier, on choisit  $t = 0$  comme origine des temps lorsque le dispositif est mis en marche pour la première fois. La variable  $T$  est donc une variable aléatoire continue à valeurs dans  $[0 ; +\infty [$ . On note  $f(t)$  la densité de probabilité de la variable  $T$ .

### 1.2.1.2 Fonction de fiabilité

- *Notion de durée de vie*

La durée de vie représente le temps de bon fonctionnement **TBF** pendant lequel un bien a accompli ou accomplira la fonction qui lui a été assignée. La durée de vie d'un bien s'exprime en unité de temps (années, heures, cycle, ...)

- *Fonction de répartition*

On s'intéresse à un produit choisi au hasard dans une population constituée des produits du même type.

Soit  $T$  une variable aléatoire qui fait associer, à tout produit choisi au hasard dans la population, son **TBF** (Temps de Bon Fonctionnement) ou sa durée de vie avant une défaillance. Tel que :

- $T$  : Mesure l'instant où apparaît une défaillance à partir de l'instant  $t_0 = 0$
- $T$  : Variable aléatoire continue qui prend les valeurs  $[0, +\infty [$  ;
- $T$  : Possède une densité de probabilité

Hypothèses:

Soit  $t_0 = 0$  : L'instant où le produit choisi est mis en marche, soit pour la 1<sup>ère</sup> fois (mise en service), soit après une réparation (remise en état).

- **En termes de fiabilité**

" En terme de fiabilité, la fonction de répartition de la variable  $T$ , est la probabilité qu'un produit prélevé au hasard dans la population considérée n'ait pas de défaillance avant l'instant  $t$  ".

On définit mathématiquement la fonction de fiabilité par le nombre  $R(t)$  associée à celle de la défaillance, tel que pour tout  $t \geq 0$ :

$$R(t) = P(T \geq t) \quad (1.1)$$

- Sachant que  $T \geq t$  est l'événement contraire de  $T \leq t$ , on peut écrire:

$$P(T \geq t) = 1 - P(T \leq t) \quad (1.2)$$

- Puisque 
$$P(T \leq t) = F(t) \quad (1.3)$$

- et  $P(T \geq t) = R(t)$ ,

- alors on a:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (1.4)$$

### 1.2.1.3. Les types de fiabilité

1. **La fiabilité intrinsèque** : qui est propre à un matériel, selon un environnement donné, et ne dépend que de qualité de ce matériel.[4]
2. **La fiabilité extrinsèque** : qui dépend des conditions d'exploitation et de la qualité de la maintenance ainsi que la fiabilité extrinsèque relative à l'intervention de l'humain. [4]
3. **La fiabilité opérationnelle** : (ou la fiabilité observée ou estimée), qui résulte de l'observation et de l'analyse des comportements d'entité identique dans des conditions opérationnelles [4].
4. **La fiabilité prévisionnelle** : (ou fiabilité prédite), qui estime la fiabilité future à partir de considération sur la conception des systèmes et la fiabilité de ses composants [4].
5. **La fiabilité extrapolée** : qui résulte d'une extension ; par extrapolation définie ou par interpolation ; de la fiabilité opérationnelle, à des durées ou des conditions de contraintes différentes [4].
6. **La fiabilité humaine** : Aptitude d'un opérateur humain à accomplir une mission requise dans des conditions données, pendant une durée donnée.

## 1.2.2. Notion de défaillance

### 1.2.2.1. Définition de la défaillance

C'est la cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise (Norme CEI-271-1974) [4].

Cette cessation peut être complète (l'entité ne remplit plus sa fonction) ou partielle (la fonction est assurée dans certaines limites, on parle alors de mode dégradé).

Les défaillances peuvent être momentanées (indisponible du composant à remplir sa fonction pendant un temps donné).

Le composant redevient disponible sans répartition) ou permanentes (la défaillance du composant est irréversible, une maintenance est nécessaire pour remettre le composant en service).

### 1.2.2.2. Fonction de répartition en termes de défaillance :

" En terme de défaillance, la fonction de répartition de la variable  $T$ , est la probabilité qu'un produit prélevé au hasard dans la population considérée ait une défaillance avant l'instant  $t$ ".

On définit mathématiquement la fonction de défaillance par le nombre  $F(t)$ , tel que pour  $t \geq 0$

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1.5)$$

$$F'(t) = f(t) \quad 0 \leq F(t) \leq 1 \quad (1.6)$$

- $F(t)$  : Fonction de défaillance du système
- $f(t)$  : la densité de défaillance. Ou bien la densité de probabilité de la variable  $T$

### 1.2.2.3. Fonction de densité $f(t)$

- Soit  $f(t)$  fonction de densité de la variable  $t$ .
- Cette fonction peut être obtenue à partir de données de durées de vie du système observées depuis le début de son exploitation.[5]

$$f(t) > 0 \quad (1.7)$$

$$\int_0^{\infty} f(t) \cdot dt = 1 \quad (1.8)$$

$f(t) \cdot dt$  Exprime la probabilité que le système tombe on panne entre  $t$  et  $t+dt$

$$f(t) \cdot dt = \text{Prob}\{t < \text{durée de vie} < t + dt\} \quad (1.9)$$

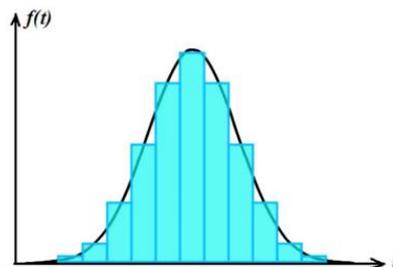


Figure 1.1 Courbe densité de défaillance.

#### 1.2.2.4 Types de défaillances

##### 1) *Défaillance à taux constant*

Défaillance qui apparaît avec un taux sensiblement constant pendant la durée de vie utile de l'entité. , cette défaillance est généralement catalectique.

Elle est encore appelée « défaillance aléatoire ».

##### 2) *Défaillance complète*

Défaillance résultant de déviation d'une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiées, telle qu'elle entraîne une disparition complète de la fonction requise (Norme CEI-271-1974).

##### 3) *Défaillance de commande*

Défaillance d'une entité dont la cause directe ou indirecte est la défaillance d'une autre entité et pour la quelle cette entité a été qualifiée et dimensionnée.

##### 4) *Défaillance d'usure*

Défaillance qui apparaît avec un taux rapidement croissant par suite de processus inhérents à l'entité.

##### 5) *Défaillance non pertinente*

Défaillance à exclure pour l'interprétation ou l'évaluation d'une mesure de la sûreté de fonctionnement. On parle aussi de "défaillance à ne pas prendre en compte" (Norme CEI-271A-1978). [7]

##### 6) *Défaillance par dégradation*

Défaillance qui est à la fois progressive et partielle (Norme CEI-271-1974). A la longue, une telle défaillance peut devenir une défaillance complète (Norme CEI-271-1974).

##### 7) *Défaillance partielle*

Défaillance résultante de déviation d'une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiées, mais telle qu'elle n'entraîne pas une disparition complète de la fonction requise (Norme CEI-271-1974). Les limites sont des limites spéciales spécifiées à cette fin (CEI-271-1974).

##### 8) *Défaillance pertinente*

Défaillance à prendre en compte pour interpréter ou évaluer une mesure de la sûreté de fonctionnement. On parle aussi de "défaillance à prendre en compte" (CEI-271A-1978).

##### 9) *Défaillance progressive*

Défaillance due à une évolution dans le temps des caractéristiques d'une entité. En général, une défaillance progressive peut être prévue par un examen ou une surveillance antérieure.

##### 10) *Défaillance de cause commune*

Défaillances dépendantes ayant pour origine la même cause directe.

#### 1.2.2.4. Modes de défaillance

C'est la manière dont un système vient à ne pas fonctionner. Ils sont relatifs à la fonction de chaque élément. Une fonction a 4 façons de ne pas être correctement effectuée :[8]

- **Plus de fonction :**

La fonction cesse de se réaliser, → « ne marche plus »

- **Pas de fonction :**

La fonction ne se réalise pas lorsqu'on la sollicite, → « ne marche pas »

- **Fonction dégradée :**

La fonction ne se réalise pas parfaitement, altération de performance, → « marche de moins en moins bien »

- **Fonction intempestive :**

La fonction se réalise lorsqu'elle n'est pas sollicitée, → « marche de temps en temps »

#### 1.2.2.5. Modes de défaillance génériques

Dans, la phase de fonctionnement retenue, on peut identifier les modes de défaillance de l'élément en relation avec les fonctions à assurer. Ci-dessous la liste générique des modes de défaillance. [8]

**Tableau 1.1 : Modes de défaillance génériques**

|           |  |           |                                     |
|-----------|--|-----------|-------------------------------------|
| <b>1</b>  | Fonctionnement (ou démarrage) prématuré        | <b>19</b> | Fonctionnement irrégulier           |
| <b>2</b>  | Ne fonctionne (ne démarre) pas au moment prévu | <b>20</b> | Indication erronée                  |
| <b>3</b>  | Ne s'arrête pas au moment prévu                | <b>21</b> | Ecoulement réduit                   |
| <b>4</b>  | Défaillance au cours du fonctionnement         | <b>22</b> | Mise en marche erronée              |
| <b>5</b>  | Défaillance structurelle (rupture)             | <b>23</b> | Ne s'arrête pas                     |
| <b>6</b>  | Blocage physique ou coincement                 | <b>24</b> | Ne démarre pas                      |
| <b>7</b>  | Vibrations                                     | <b>25</b> | Ne commute pas                      |
| <b>8</b>  | Ne reste pas en position                       | <b>26</b> | Fonctionnement après le délai prévu |
| <b>9</b>  | Ne s'ouvre pas                                 | <b>27</b> | Entrée erronée (Augmentation)       |
| <b>10</b> | Ne se ferme pas                                | <b>28</b> | Entrée erronée (Diminution)         |
| <b>11</b> | Défaillance en position ouverte                | <b>29</b> | Sortie erronée (Augmentation)       |
| <b>12</b> | Défaillance en position fermée                 | <b>30</b> | Sortie erronée (Diminution)         |

|    |   |    |   |
|----|---|----|---|
| 13 | Fuite interne                                     | 31 | Perte de l'entrée   |
| 14 | Fuite externe                                     | 32 | Perte de la sortie  |
| 15 | Valeur au-dessus d'une limite supérieure tolérée  | 33 | Court-circuit électrique  |
| 16 | Valeur au-dessous d'une limite inférieure tolérée | 34 | Circuit électrique ouvert   |
| 17 | Fonctionnement intempestif                        | 35 | Fuite électrique  |
| 18 | Fonctionnement intermittent                       | 36 | Autres conditions de défaillance exceptionnelle suivant : <ul style="list-style-type: none"> <li>• les caractéristiques du système,</li> <li>• les conditions de fonctionnement,</li> <li>• les contraintes opérationnelles d'exploitation</li> </ul> |

1.2.3. Taux de défaillance  $\lambda(t)$

On appelle taux de défaillance, la quantité  $\lambda(t)$  définie par

$$\lambda(t) = \frac{F'(t)}{R(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)} \tag{1.10}$$

On peut trouver  $\lambda(t)$  si l'on connaît  $F(t)$  ou  $R(t)$ . Inversement, si l'on connaît  $\lambda(t)$ , on peut obtenir  $R(t)$  et respectivement  $F(t)$  comme solution de l'équation différentielle du premier ordre :

On obtient: 
$$\frac{R'(t)}{R(t)} = -\lambda(t) \tag{1.11}$$

$$R(t) = EXP[-\int_0^t \lambda(t) dt] \tag{1.12}$$

$$\text{et } F(t) = 1 - EXP[-\int_0^t \lambda(t) dt] \tag{1.13}$$

$\lambda(t)$  est une probabilité de défaillance dont l'allure graphique est donnée par la courbe suivante:

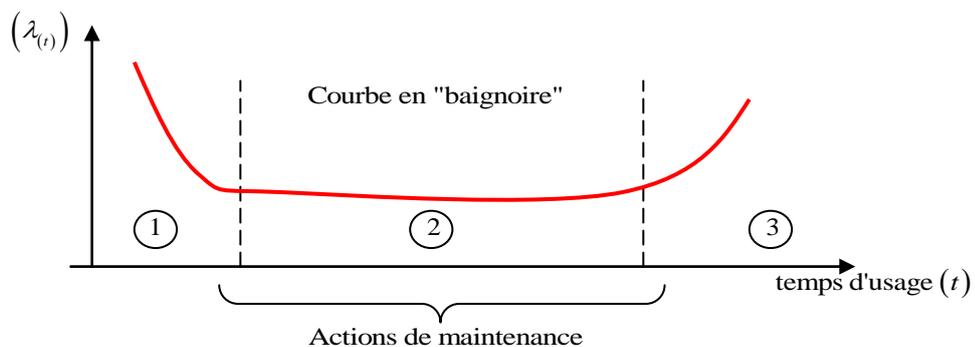


Figure 1.2 courbe de baignoire.

Expérimentalement, pour la plupart des produits, la courbe représentative du taux de défaillance quand  $t \rightarrow \lambda(t)$ , possède la forme donnée par la figure ci-dessus. Elle est appelée courbe en baignoire et comporte 3 parties distinctes :

- **Zone 1** → *Période de défaillance précoce ou période de jeunesse.*
  - Cette zone représente la période de début de fonctionnement,
  - le taux de défaillance décroît avec le temps, car les pannes précoces dues à des défauts de fabrication ou de conception sont de moins en moins ombreuses.
- **Zone 2** → *Période de défaillance à taux constant ou zone de maturité*
  - Cette zone représente la période de maturité, ou vie utile
  - le taux de défaillance reste à peu près constant ; pendant cette période, les pannes qui paraissent sont dues au hasard.
- **Zone 3** → *Période de défaillance par vieillissement ou période de fin de vie ou zone d'usure*
  - Cette zone représente la période d'usure
  - le taux de défaillance augmente avec le temps, car les pannes sont dues à l'usure croissante du produit [6].

### 1.3. QUANTIFICATION DE LA FIABILITE

#### 1.3.1. Indicateurs de fiabilité ( $\lambda$ ) et (MTBF)

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

- **1. Temps moyen de bon fonctionnement :**

Le MTBF (Mean Time Between Failure) est souvent traduit comme étant la moyenne des temps de bon fonctionnement mais représente la moyenne des temps entre deux défaillances.

En d'autres termes, Il correspond à l'espérance de la durée de vie  $t$ .

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) \tag{1.15}$$

Physiquement le MTBF peut être exprimé par le rapport des temps

$$MTBF = \frac{\text{somme des temps de bon fonctionnement entre les (n)défaillances}}{\text{nombre d'intervention de maintenance avec immobilisation}} \tag{1.16}$$

Si  $\lambda$  est constant:  $MTBF = \frac{1}{\lambda}$  (1.17)

• 2. Les paramètres temporels moyens :

MTTF : Durée moyenne de fonctionnement d'une entité avant la première défaillance (mean time to failure).

MTTR : Durée moyenne de répartition (mean time to repaire).

MUT : Durée moyenne de fonctionnement après réparation (mean up time).

MDT : durée moyenne d'indisponibilité (mean down time).

Cette durée correspond aux phases suivantes :

- Détection de la panne.
- Réparation de la panne
- Remis en service.

Le MDT traduit en fait les moyennes des durées des indisponibilités Consécutives à des défaillances.

MTBF : durée moyenne entre deux défaillances consécutives d'une entité réparée (Mean time between Failures).

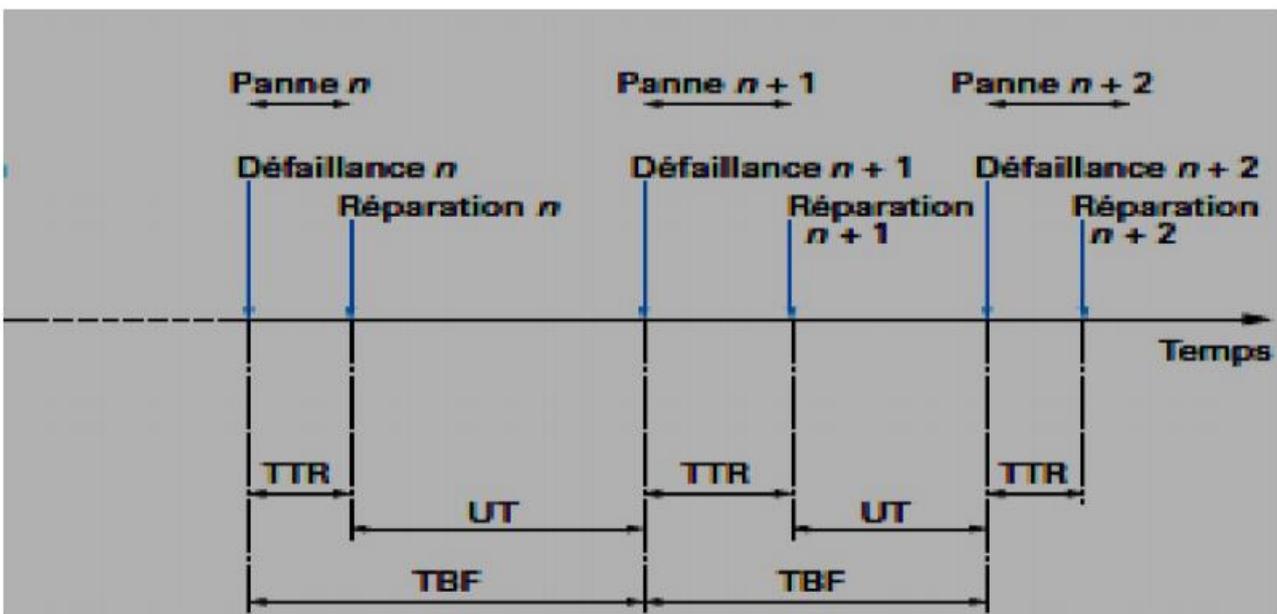


Figure 1.3 Diagramme des temps moyens.

- **Quelques commentaires :**

Le MUT est différent de MTTF lorsque le système est remis en service après réparation, tous les composants défectueux n'ont pas été nécessairement réparés et le MUT caractérise cette durée moyenne de fonctionnement jusqu'à la prochaine défaillance. Le MTTF caractérise la durée moyenne de fonctionnement d'un système qui aurait été complètement réparé avant la remise en service.

On a la relation : 
$$\text{MTBF} = \text{MUT} + \text{MDT} \quad (1.18)$$

Une autre signification est parfois donnée à MTBF : moyen des temps de bon fonctionnement.

Cette définition est celle que nous donne au MTTF ou au MUT, pour de nombreux systèmes, MDT est faible devant MUT : la différence entre MTTF et MTBF est donc également faible .

### 1.3.2 Les lois de fiabilité

On distingue deux types:

- ✓ Lois analytiques discrètes
- ✓ Lois analytiques continues

#### 1.3.2.1 Lois analytiques discrètes

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

Parmi les lois discrètes on peut citer :

1. Loi Uniforme
2. Loi de Bernoulli
3. Loi Binomiale
4. Loi Binomiale négative
5. Loi de Poisson

#### 1° Loi uniforme

Une distribution de probabilité suit une loi uniforme lorsque toutes les valeurs prises par la variable aléatoire sont équiprobables. Si  $n$  est le nombre de valeurs différentes prises par la variable aléatoire. La fonction de fiabilité est définie par l'expression suivante :

$$p(X = x_i) = \frac{1}{n} \quad (1.19)$$

Avec les paramètres de signification :

$n$  : est le nombre de valeurs différentes prises par la variable aléatoire.[9]

**2° Loi de Bernoulli**

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

Si (S) est réalisé,  $X = 1$

Si (E) est réalisé,  $X = 0$

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

$$P(X = 0) = q \quad (1.20)$$

$$P(X = 1) = p \quad (1.21)$$

$$(p + q = 1) \quad (1.22)$$

**3° Loi binomiale**

Décrite pour la première fois par Isaac Newton en 1676 et démontrée pour la première fois par le mathématicien suisse Jacob Bernoulli en 1713, la loi binomiale est l'une des distributions de probabilité les plus fréquemment rencontrées en statistique appliquée.

En mathématiques, une loi binomiale de paramètres  $n$  et  $p$  est une loi de probabilité qui correspond à une expérience aléatoire à deux issues possibles, généralement dénommées respectivement « succès » et « échec », la probabilité d'un succès étant  $p$ . [9]

Sa fonction de probabilité est :

$$p(X = k) = C_n^k p^k q^{n-k} \quad (1.23)$$

$$C_n^k = \frac{n!}{k! (n - k)!} \quad (1.24)$$

Avec les paramètres de signification :

$(n \geq 0)$  : Nombre d'épreuves

$(0 \leq p \leq 1)$  : probabilité de succès

$$\text{et } q = 1 - p \quad (1.25)$$

**4° La loi binomiale négative**

La loi binomiale négative est la loi de probabilité de la variable aléatoire  $X$  qui comptabilise le nombre d'échecs nécessaires avant obtention de  $n$  succès, sachant que la probabilité d'un succès est  $p$ .

Sa fonction de probabilité est :

$$p(X = k) = f(k, n, p) = C_k^{k+n} p^n q^k \quad (1.26)$$

La loi binomiale négative peut aussi s'écrire sous la forme

$$f(k, n, p) = C_k^{-n} p^n (-q)^k \quad (1.27)$$

Où  $C_k^{-n}$  est un coefficient binomial appliqué à un entier négatif et est défini par :

$$C_k^{-n} = \frac{(-n)(-n-1)\dots(-n-k+1)}{k!} \quad (1.28)$$

Cette expression justifie le nom de loi binomiale négative donnée à cette loi de probabilité.[8]

### 5° Loi de Poisson

Une variable aléatoire  $x$  suit une loi de « Poisson » si elle peut prendre les valeurs entières 0, 1, 2, 3.....n. La probabilité pour que  $x$  soit égal à  $k$  est :

$$P(x = n) = e^{-\lambda} \cdot \frac{\lambda^n}{n!} \quad (1.29)$$

$\lambda$  : paramètre de la loi (constante positive).

#### • Relation de Poisson

La probabilité pour qu'un événement se produise est d'autant plus vraie que la population concernée est grande et le nombre d'évènement petit. Par conséquence la loi de Poisson servira à étudier les phénomènes rares, tels que les accidents, pannes, défauts de fabrication où la probabilité  $p$  est très faible ( $p < 0.05$ ). Elle peut également dans certaines conditions être définie comme limite d'une loi binomiale.[9]

La probabilité de constater un certain nombre de pannes ( $n$ ) dans le temps ( $t$ ) et seulement ( $n$ ) pannes est :

$$P(x = n) = e^{-\lambda t} \cdot \frac{(\lambda t)^n}{n!} \quad (1.30)$$

L'espérance mathématique est=  $\lambda t$

$$\text{L'écart type} \quad \sigma = \sqrt{\lambda} \quad (1.31)$$

### 1.3.2.2. Loix analytique continues

#### I°Loi exponentielle

- lorsque le **taux de défaillance est constant**, (c'est-à-dire pour tout  $t \geq 0$  on a  $\lambda(t) = \lambda$  (1.32) constante strictement positive) , alors la loi suivie par la variable aléatoire  $T$  est une loi exponentielle.
- S'il s'agit d'une loi exponentielle, alors on définit:
  - La fonction de fiabilité:  $R(t) = e^{-\lambda t}$  (1.33)
  - La fonction de défaillance:  $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$  (1.34)
  - La densité de probabilité:  $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$  (1.35)
  - La **Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement** :  $MTBF = \frac{1}{\lambda}$  (1.36)
  - L'écart-type:  $\sigma = \frac{1}{\lambda}$  (1.37)

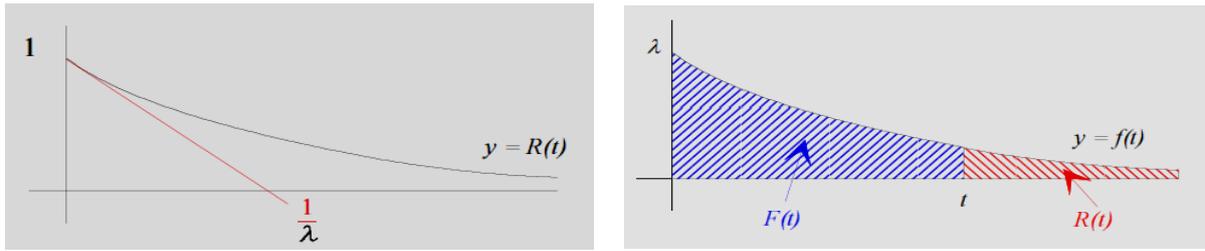


Figure 1.4 Courbe de loi exponentielle

- L'utilisation de papier semi-logarithmique pour représenter  $R(t)$  permet de déceler une loi exponentielle.[10]

2°. Loi de puissance (loi de WEIBULL (mathématicien Suédois))

- WEIBULL a choisi pour le taux de défaillance une loi sous forme de puissance (calcul facile d'intégrales) avec 3 paramètres  $(\beta, \gamma, \eta)$  qui permettent d'obtenir les diverses situations de  $\lambda(t)$  : décroissante  $\uparrow$ , constante  $\leftrightarrow$  et croissante  $\downarrow$ .

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}, \text{ pour } t > \gamma \tag{1.38}$$

$\beta, \gamma, \eta$  Sont des constantes avec  $\beta > 0$  et  $\eta > 0$ . Pour tout  $t \geq 0$

- S'il s'agit d'une loi exponentielle, alors on définit:
  - Fonction de fiabilité:  $R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right]$  (1.39)
  - Fonction de défaillance:  $F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right]$  (1.40)
  - Densité de probabilité:  $f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[ - \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right]$  (1.41)
  - La Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement :  $MTBF = \eta A + \gamma$  (1.42)
  - Ecart-type:  $\sigma = \eta \beta$  (1.43)
- Si lors de la représentation de les fonctions  $F(t)$  ou  $R(t)$  sur le papier de WEIBULL, les points de coordonnées  $(t_i, F(t_i))$  ou  $(t_i, R(t_i))$  sont alignés (c'est-à dire forme une droite), alors  $\gamma = 0$ . on retrouve alors graphiquement les valeurs de  $\beta$  et de  $\eta$
- Le paramètre  $\eta$  se lit directement à l'intersection de la droite précédente avec l'axe des abscisses puisque celui-ci est gradué en échelle logarithmique.
- Le paramètre  $\beta$  est le coefficient directeur de la droite précédente, il suffit de tracer une droite parallèle à la précédente et de lire directement le coefficient directeur de cette droite sur l'axe d'équation [11]  $X = -1$  (1.44)

### 3° La loi normale

- Cette loi est aussi appelée loi de Gauss, en l'honneur du grand mathématicien allemand Karl Friedrich Gauss (1777-1855).
- La loi normale est la loi statistique la plus répandue et la plus utile, elle est utilisée afin
- d'approcher des probabilités associées à des variables aléatoires binomiales possédant un paramètre 'n' très grand. Elle représente beaucoup de phénomènes aléatoires. De plus, de
- nombreuses autres lois statistiques peuvent être approchées par la loi normale, tout spécialement dans le cas des grands échantillons.
- Sa fonction de fiabilité est :

$$n(t) = \frac{n}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (1.45)$$

- Avec les paramètres de signification :
- $\mu$  : est la moyenne
- $\sigma$  : l'écart type
- $n$  : le nombre total d'individus dans l'échantillon
- $n(x)$  : le nombre d'individus pour lesquels la grandeur analysée a la valeur x.
- $e$  : est la base de l'exponentielle (2,718...)[9]

### 4° La loi log normale

- On a pu voir que les valeurs possibles d'une variable aléatoire normale étaient l'ensemble des nombres réels. Pour une situation réelle ne pouvant prendre des valeurs négatives, on peut
- malgré tout utiliser une loi normale lorsque la Moyenne et l'écart type sont tels que la probabilité théorique d'avoir une valeur Négative est à toute fin pratique nulle.
- En probabilité et statistique, une variable aléatoire X est dite suivre une loi log-normale de paramètres  $\mu$  et  $\sigma$  si la variable  $Y=\ln(X)$  suit une loi normale de paramètres  $\mu$  et  $\sigma$ .
- Une variable peut être modélisée par une loi log-normale si elle est le résultat de la multiplication d'un grand nombre de petits facteurs indépendants[9].
- Sa fonction de probabilité est:

$$n(t) = \frac{n}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t)-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (1.46)$$

- Avec les paramètres de signification

- $\sigma$  : l'écart type
- $\mu$ : c'est la moyenne

### 1.3.2.3 Lois approchées

Pour une valeur donnée de  $t$ , les valeurs exactes de  $F(t)$  et de  $R(t)$  ne sont pas connues.

Donc on est amené à estimer les nombres  $F(t)$  et  $R(t)$  à partir de valeurs observées sur un échantillon. Pour cela on a trois méthodes: Méthode des rangs bruts, Méthode des rangs moyens, Méthode des rangs médians [11].

On définit:

- $N_{TOT}$  : Nombre total d'éléments de l'échantillon.
- $N_i$  : effectif cumulé à l'instant  $t_i$  parmi les  $N$  éléments de l'échantillon

#### Méthode 1: "Méthode des rangs bruts" ( $N_{TOT} > 50$ )

Elle est utilisée quand l'effectif  $N_{TOT}$  de l'échantillon est de grande taille. Dans ce cas, comme estimation de  $F(t_i)$  on prend:

$$F(t_i) = \frac{N_i}{N_{TOT}} \quad (1.47)$$

#### Méthode 2: "Méthode des rangs moyens" ( $20 < N_{TOT} \leq 50$ )

Elle est utilisée quand l'effectif  $N_{TOT}$  de l'échantillon est de taille moyenne. Dans ce cas, comme estimation de  $F(t_i)$  on prend:

$$F(t_i) = \frac{N_i}{N_{TOT} + 1} \quad (1.48)$$

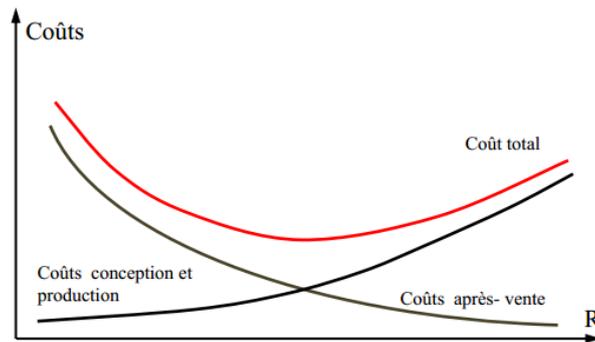
#### Méthode 3: "Méthode des rangs médians" ( $N \leq 20$ )

Elle est utilisée quand l'effectif  $N$  de l'échantillon est de petite taille. Dans ce cas, comme estimation de  $F(t_i)$  on prend [9]

$$F(t_i) = \frac{n_i - 0.3}{N + 0.4} \quad (1.49)$$

## 1.4. EVOLUTION DES COÛTS EN FONCTION DE LA FIABILITE

Le non fiabilité augmente les coûts d'après vente (garanties, frais judiciaires). Construire plus fiable, augmente les coûts de conception et de production.



**Figure 1.5.** Courbes d'évolution des coûts en fonction de la fiabilité

La fiabilité d'une machine a tendance à diminuer avec le nombre de ses composants ou de leurs complexités.

La maîtrise de la fiabilité devient donc plus délicate.

Une très haute qualité pour chaque composant, n'entraîne pas nécessairement une grande fiabilité. Après assemblage, les interactions entre les composants diminuent la capacité de l'ensemble.

Une grande fiabilité sous certaines conditions, n'implique pas une grande fiabilité sous d'autres conditions (exemple: une huile moteur de synthèse prévue pour des moteurs moderne (multisoupapes et turbo) ne convient pas forcément pour un moteur de conception plus rudimentaire (tondeuse, moteur usé, voiture ancienne)[7].

### 1.5. LA RELATION ENTRE LA FIABILITE ET LA MAINTENANCE

Tous les équipements d'une installation industrielle sont soumis à des mécanismes de dégradation dus aux conditions de fonctionnement et/ou d'environnement : usure, fatigue, vieillissement. Face aux défaillances qui en résultent, on peut se contenter de pratiquer une maintenance corrective, mais on n'évite pas ainsi les conséquences des pannes que l'on subit.

Une attitude plus défensive consiste à mettre en œuvre une maintenance préventive destinée à limiter, voire à empêcher, ces défaillances, mais on court alors le risque de dépenses excessives et d'indisponibilités inutiles.

Devant cette situation, le responsable de maintenance ne doit plus se contenter de surveiller et de réparer, il doit envisager des stratégies.

Une part de son travail consiste à prévoir les événements et à évaluer les différentes alternatives qui s'offrent à lui pour trouver la solution optimale, ou tout au moins pour s'en rapprocher.

Les forces dont il dispose, limitées par ses moyens techniques et financiers, doivent être placées aux bons endroits.

C'est dans ce contexte que la maintenance s'est dotée de méthodes qui considèrent à la fois, et plus ou moins, la technique et l'organisation.

Les industries de processus ont générale appliquée des démarches alliant une évaluation des risques, une analyse du retour d'expérience, et une logique de sélection de tâches de maintenance. L'Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité (OMF).

## 1.6. CONCEPT FMD D'UN SYSTEME

### 1.6.1. Fiabilité d'un système

La détermination de la fiabilité d'un système électronique, mécanique ou autre nécessite tout d'abord de connaître la loi de la fiabilité (ou la loi de défaillance) de chacun des composants intervenant dans le système.

Ce ci est simple pour certains types de systèmes tels que les systèmes électroniques, or ce n'est pas le cas pour des systèmes mécaniques à cause de la complexité de la structure du système étudié.

Les systèmes mécaniques sont des ensembles d'éléments technologiques liés par des relations statiques et dynamiques assez complexes.

Pour un système électronique chaque composant à un poids important dans la fiabilité du système, la fiabilité du système est donc calculé en fonction de la fiabilité de tous ses composants. Les calculs sont effectués sous l'hypothèse que les taux de défaillance sont constants dans le temps, une hypothèse acceptable pour la plupart des composants, ce qui rend les calculs beaucoup plus simple. La détermination des taux de défaillance des composants est effectuée soit à partir des modèles développés dans des bases de données disponibles, soit à partir d'essais effectués sur les composants ou bien à partir des résultats d'exploitation des produits.

La fiabilité d'un système mécanique, contrairement à l'électronique, repose sur la fiabilité de quelques composants élémentaires responsables de son dysfonctionnement, dits composants "responsables" ou "critiques" (parfois un seul)

#### 1.6.1.1. Fiabilité de système constitué de plusieurs composants

##### 1° En série

La fiabilité  $R_s$  d'un ensemble de  $n$  constituants connectés en série est égale au produit des fiabilités respectives  $R_A, R_B, R_C, R_n$  de chaque composant.

$$R_s = R_A * R_B * R_C * \dots * R_n \quad (1.50)$$

Si les "n" composants sont identiques avec une même fiabilité  $R$  la formule sera la suivante :

$$R(s) = R^n \quad (1.51)$$

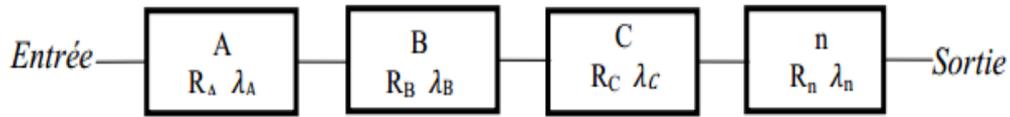


Figure 1.6. Composants en série

Si les taux de défaillances sont constants au cours du temps la fiabilité sera calculée suivant la formule:[12]

$$R(s) = (e^{-\lambda_A t}) * (e^{-\lambda_B t}) * (e^{-\lambda_C t}) * \dots * (e^{-\lambda_n t}) \tag{1.52}$$

$$\text{Avec : } MTBF_{(s)} = \frac{1}{\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C + \dots + \lambda_n} \tag{1.53}$$

$$\text{Si en plus, les composants sont identiques: } \lambda_A = \lambda_B = \lambda_C = \dots = \lambda_n \tag{1.54}$$

Alors :

$$R(s) = (e^{-\lambda_n t}) \text{ et } MTBF = \frac{1}{n * \lambda} \tag{1.55}$$

**2° En parallèle**

La fiabilité d'un système peut être augmentée en plaçant les composants en parallèle. Un dispositif constitué de **n** composants en parallèle ne peut tomber en panne que si les **n** composants tombent en panne au même moment.

Si **Fi** est la probabilité de panne d'un composant, la fiabilité associée **Ri** est son complémentaire:

$$F_i = 1 - R_i \tag{1.56}$$

**Fi** représentant la fiabilité associée. [12]

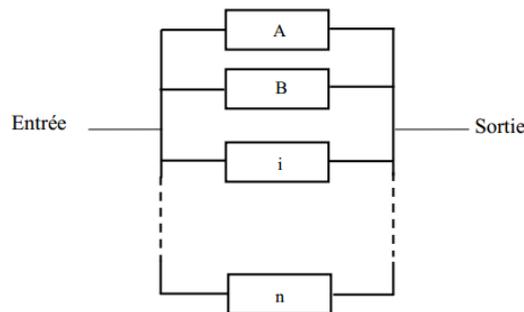


Figure 1.7. Composants en parallèle

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

$$R(s) = 1 - (1 - R)^n \tag{1.57}$$

Le cas particulier de deux dispositifs en parallèle si  $\lambda$  est constant  $R_S$  est obtenu par :

$$R_S = 1 - (1 - R_A) * (1 - R_B) = R_A + R_B - R_A * R_B = e^{-\lambda_A t} + e^{-\lambda_B t} - e^{-(\lambda_A + \lambda_B)t} \tag{1.58}$$

## 1.6.2. la maintenabilité

### 1.6.2.1. Définition

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

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

A partir de ces définitions, on distingue :

- La maintenabilité intrinsèque : elle est « construite » dès la phase de conception à partir d'un cahier des charges prenant en compte les critères de maintenabilité (modularité, accessibilité,... etc.).
- La maintenabilité prévisionnelle : elle est également « construite », mais à partir de l'objectif de disponibilité.
- La maintenabilité opérationnelle : elle sera mesurée à partir des historiques d'interventions.

L'analyse de maintenabilité permettra d'estimer la MTTR ainsi que les lois probabilistes de maintenabilité (sur les mêmes modèles que la fiabilité)[13].

### 1.6.2.2 Quantification de la maintenabilité

Si la fiabilité correspond à la probabilité de bon fonctionnement d'un produit, la maintenabilité correspond à une probabilité attachée à sa durée de réparation. On retient généralement comme indicateur de maintenabilité la moyenne des temps techniques de réparation. On le désigne par "MTTR"(Mean Time To Repair ).

$$MTTR = \frac{\sum \text{des temps de réparation}}{\text{Nombre de réparation}} \quad (1.59)$$

La maintenabilité caractérise la facilité à remettre ou de maintenir un bien en bon état de fonctionnement. Cette notion ne peut s'appliquer qu'a du matériel maintenable, donc réparable.« Les moyens prescrits » englobent des notions très diverses : moyens en personnel, appareillages, outillages, etc.[13]

La maintenabilité d'un équipement dépend de nombreux facteurs :

**Tableau 1.2 : Les facteurs liés à la maintenabilité**

| Facteurs liés à l'EQUIPEMENT   | Facteurs liés au CONSTRUCTEUR  | Facteurs liés à la MAINTENANCE   |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- documentation</li> <li>- aptitude au démontage</li> <li>- facilité d'utilisation</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- conception</li> <li>- qualité du service après-vente</li> <li>- facilité d'obtention des pièces de rechange</li> <li>- coût des pièces de rechange</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-préparation et formation des personnels</li> <li>- moyens adéquats</li> <li>- études d'améliorations (maintenance mélioratives)</li> </ul> |

### 1.6.2.3. Amélioration de la maintenabilité

on peut améliorer la maintenabilité en :

- Développant les documents d'aide à l'intervention
- Améliorant l'aptitude de la machine au démontage (modifications risquant de coûter cher)
- Améliorant l'interchangeabilité des pièces et sous ensemble.
- l'accessibilité.
- l'aide au diagnostic.

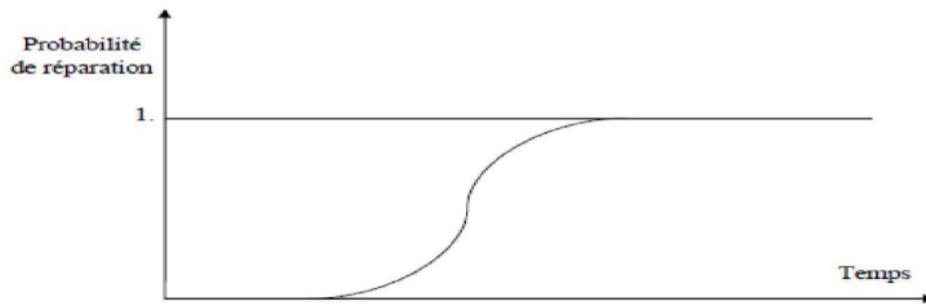
le maintenancier doit améliorer la maintenabilité par les actions suivantes :

- 1- disponibilité de la documentation tenue à jour du matériel .
- 2- utilisation des systèmes d'aide au diagnostic
- 3- utilisation des capteurs intégrés pour la localisation de la panne
- 4- disponibilité des accessoires outillages[14]

### 1.6.2.4. Taux de réparation

$$\mu = 1 / \text{MTTR} \quad (1.60)$$

La probabilité de réparation d'un composant est principalement fonction du temps écoulé depuis l'instant de défaillance. Il existe un certain délai  $t$  avant que le composant puisse être réparé. Ce délai  $t$  comprend le temps de détection et le temps d'attente de l'équipe de réparation. Il s'y ajoute le temps de réparation proprement dit (**Figure 1.8**) donne l'allure de la probabilité de réparation d'un composant tombé en panne en  $t=0$ .



**Figure 1.8.** Probabilité de réparation au cours de temps.

### 1.6.3. la disponibilité

#### 1.6.3.1. Définition

Aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires est assurée.

Cette aptitude dépend de la combinaison de la fiabilité, de la maintenabilité et de la logistique de maintenance.

Les moyens extérieurs nécessaires autres que la logistique de maintenance n'affectent pas la disponibilité du bien (NF EN 13306).

#### 1.6.3.2. Quantification de la disponibilité

La prise en compte simultanée des indicateurs de fiabilité et de maintenabilité permet de définir la disponibilité moyenne "D" d'un produit qui correspond au pourcentage du temps pendant lequel ce produit remplit effectivement les fonctions attendues par l'utilisateur.

- **Disponibilité intrinsèque:**

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (1.61)$$

- **Disponibilité instantané :**

$$D(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-t(\lambda + \mu)} \quad (1.62)$$

Pour qu'un équipement présente une bonne disponibilité, il doit :

- Avoir le moins possible d'arrêts de production
- Etre rapidement remis en bon état s'il tombe en panne

La disponibilité d'un équipement dépend de nombreux facteurs :

- Les facteur liés à la La disponibilité

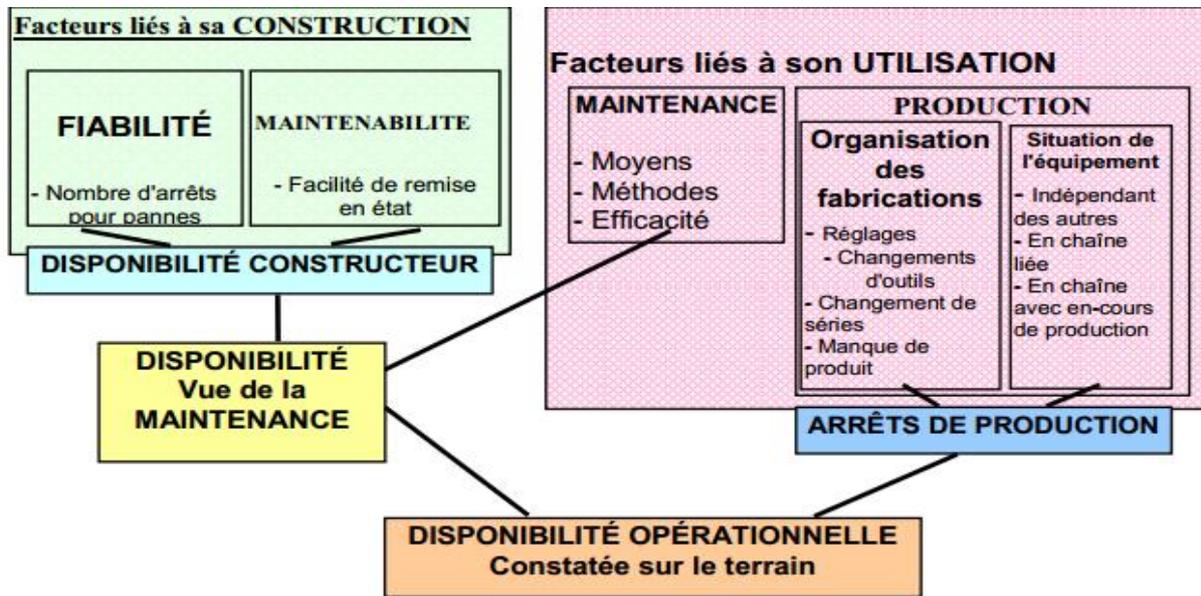


Figure1.9. Les facteur liés à la La disponibilité.

La disponibilité allie donc les notions de fiabilité et de maintenabilité.

### 1.6.3.3. Amélioration de la disponibilité

Augmenter la disponibilité passe par :

- L'allongement de la MTBF (action sur la fiabilité)
- La notion de le MTTR (action sur la maintenance)
- Fiabilité.
- maintenabilité.
- logistique.[14]

### 1.6.3.4. la relation entre les notions FMD

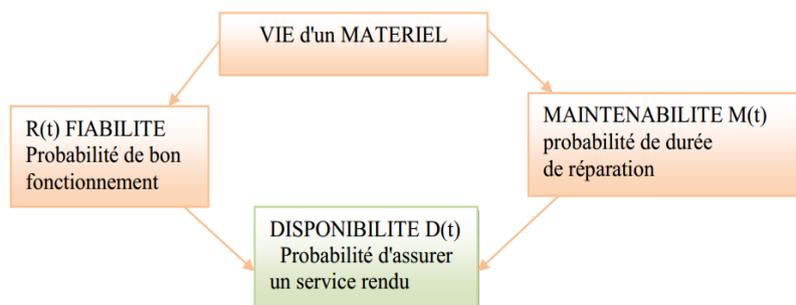


Figure1.10. la relation entre les notions FMD

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

### **CONCLUSION**

La maintenance est une fonction essentielle de l'entreprise ; ses objectifs vont au delà de remettre en état l'outil de production, mais surtout d'anticiper des événements qui interviennent dans un environnement d'incertitudes, et de contribuer à la performance globale du système de production. Cela nous mène à substituer la maintenance curative par celle préventive visant à préserver la fiabilité de l'équipement, réduire les surcoûts, et assurer la qualité des produits finies. Cette maintenance préventive se traduit par la définition de plans d'actions et l'intervention sur l'équipement. La sûreté de fonctionnement d'une machine en tenant compte de l'aspect sécurité et les critères visant à éviter un entretien fréquent, difficile et coûteux se résument en trois points connus sous la notion F.M.D. (Fiabilité\_ Maintenabilité\_ Disponibilité) que le concepteur d'équipement devrait tenir compte lors des études d'engineering.

# CHAPITRE 02

*Les fours à arc électrique*

## 2.1 INTRODUCTION

Bien que les premiers fours électriques aient été conçus initialement pour l'élaboration de l'aluminium et des ferroalliages, l'introduction de l'aciérie électrique dans le domaine des métaux ferreux a marqué une rupture décisive dans les modalités de la fabrication du fer et de l'acier, car ce type de four peut fonctionner à partir d'une charge composée à 100% M de vieilles ferrailles recyclées. Le premier four destiné à fondre de l'acier a été inventé vers 1900 par le français P. Héroult mais, à cause du coût de l'énergie électrique, la production industrielle d'« acier électrique » n'a vraiment démarré qu'après la Seconde Guerre mondiale. Depuis cette époque, ce procédé n'a cessé de croître au détriment de la filière fonte et l'on estime qu'il représente actuellement environ la moitié du tonnage d'aciers, moulée et corroyée, produite en Europe. Les fours à arcs ont également connu de nombreux développements en termes de capacité, de puissance spécifique et de productivité.

Un four est toute enceinte ou appareil qui permet de faire subir des transformations chimiques et physiques à un corps grâce à de la chaleur. Il utilise pour cela des sources d'énergies calorifiques diverses. Cependant lorsque la chaleur est tirée de l'électricité on le qualifie de four électrique.

Un four est un outil utilisé pour élever la température d'un produit, il peut être soit :

- un équipement destiné uniquement au chauffage (exemple : réchauffage de l'acier avant déformation plastique, réchauffage de pétrole brut avant distillation)
- un réacteur dans lequel on élabore les produits (exemple : four de fusion de métaux, four de fusion de verre, four de vapocraquage de la pétrochimie, etc...).

Il s'intègre généralement dans une ligne de production complexe dont il est un des éléments. On trouve les fours dans un très grand nombre d'activités industrielles. Le présent chapitre traite les fours dans leurs généralités, on s'efforce d'y dégager des caractéristiques communes à l'ensemble des fours. Globalement on distingue :

- les fours de l'industrie sidérurgique ;
- les fours de traitement thermique des métaux ;
- les fours de raffinage et de l'industrie chimique ;
- les fours de cimenteries ;
- les fours de l'industrie verrière ;
- les fours des industries céramiques et des produits réfractaires.

## 2.2. FOUR ELECTRIQUE

### 2.2.1. Différents types de fours électriques

#### 2.2.2.1. Fours électriques à résistance

##### 1°. Principe de fonctionnement des fours à résistances

La puissance électrique  $P(W)$  dissipée dans l'élément chauffant de résistance  $R(\Omega)$  est transformée en chaleur par effet joule ; elle s'exprime par la loi de Joule :

$$P = UI = RI^2 = U^2/R$$

Avec  $U(V)$  et  $I(A)$  respectivement les valeurs efficaces de la tension aux bornes de la résistance et du courant électrique qui la traverse. Dans la pratique, les résistances électriques utilisées de manière classique ont une réactance faible devant  $R$  ( $\cos\varphi$  voisin de 1). Les fours à résistances procèdent par chauffage indirect, la chaleur produite par effet Joule par les résistances est transmise à la charge par rayonnement et par convection. Suivant le mode de transmission de la chaleur produite par les résistances encastrées dans les parois, on a les fours à convection naturelle, les fours à chaleur tournante ou à convection forcée [15].

##### 2°. Caractéristiques des fours à résistances :

Un four à résistances est essentiellement constitué :

D'une enceinte (laboratoire ou chambre de chauffe) réalisée à partir de matériaux à caractère isolant ou réfractaires dont le rôle est de réduire les pertes thermiques par transmission vers l'extérieur ; de résistances électriques disposées en voûte, en sole ou sur les parois latérales (pariétales) de l'enceinte. Leur alimentation est assurée soit directement par le réseau, soit par l'intermédiaire d'un ou plusieurs transformateurs ; un système de modulation de la puissance y est associé, piloté par un système de régulation de température ; de la Charge à traiter, caractérisée par sa forme, sa nature et sa température initiale [15].

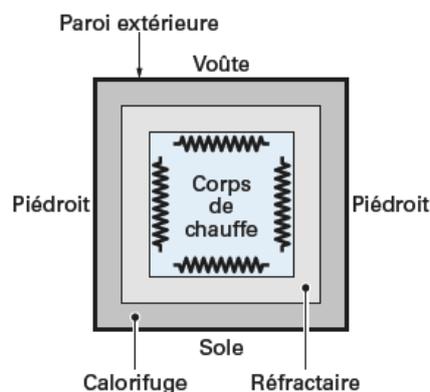


Figure 2.1. : Représentation schématique d'un four à résistance

### **3°. Différents types de fours électriques à résistances**

Plusieurs types de fours électriques à résistances sont connus. Prenant tous source dans le principe de base des fours électriques, ces différents types ne diffèrent que sur la base de la forme ou du mécanisme intégré dans leurs enceintes (positionnement des résistances dans l'enceinte...).

Ainsi nous avons :

- ✓ Fours à sole ;
- ✓ Fours à cloche,
- ✓ Fours à plateau tournant ;
- ✓ Fours à chaînes et à convoyeur ;
- ✓ Fours continus à tablier, à tapis ou à bande ;
- ✓ Fours à wagonnets ;
- ✓ Fours spéciaux.

#### **2.2.2.2. Four électrique à micro ondes**

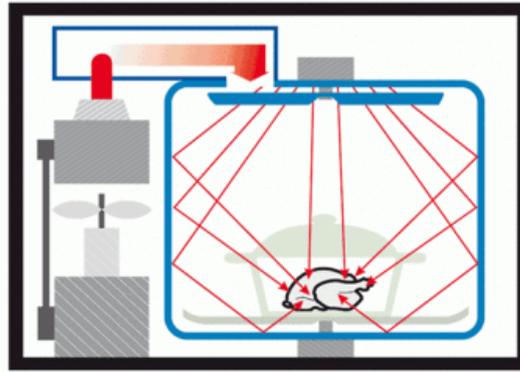
##### **1°. Principe**

Les fours à micro-ondes sont des fours électriques utilisant des ondes produites dans des tubes à électrons spécifiques, comme le klystron et le magnétron, ou grâce à des oscillateurs spéciaux ou à des semi-conducteurs, pour faire vibrer les molécules d'eau qui se trouvent dans la charge à chauffer, ce qui produit l'échauffement. L'énergie électrique, sous la forme d'une tension alternative (haute et basse tension) est transformée en tension continue par l'intermédiaire d'un transformateur élévateur, d'une diode et d'un condensateur. Le courant arrivant du transformateur élévateur sert à alimenter le magnétron. Les micro-ondes pénètrent par des ouvertures sur le dessus de l'enceinte chauffante, où un distributeur les répartit uniformément dans le four. Elles ne peuvent pas pénétrer dans un récipient métallique pour chauffer la nourriture [16].

##### **2°. Constitutions**

Les fours à micro ondes sont constitués essentiellement de :

- Une enceinte constituée de parois métalliques qui reflètent le rayonnement et le maintiennent dans le four.
- Magnétron alimenté par un générateur haute tension, produit le rayonnement magnétique
- Un transformateur élévateur de tension;
- Un distributeur d'ondes qui assure la répartition uniforme des ondes afin de rendre homogène la cuisson [16].



**Figure 2.2:** Principe de fonctionnement d'un four à micro onde

### 2.2.2.3 Four électrique à induction

Four à induction est un four électrique fonctionnant grâce au phénomène de chauffage par induction de métal. L'avantage de ce procédé est qu'il est propre, économe en énergie et permet de mieux contrôler la fusion des métaux. Les fonderies modernes utilisent ce type de four qui supplante les hauts fourneaux pour produire la fonte, car ces derniers émettent beaucoup de poussières et polluent beaucoup. Le four à canal est le premier à être utilisé industriellement. Les capacités des fours à induction varient de moins d'un kilogramme à cent Tonnes ; ils sont utilisés pour fondre le fer et l'acier, le cuivre, l'aluminium et les métaux précieux. Comme aucun arc ou combustion n'est utilisé, la température de la matière n'est pas supérieure à celle requise pour le faire fondre, ce qui peut prévenir la perte des éléments d'alliage précieux. L'inconvénient majeur à l'utilisation du four à induction dans une fonderie est l'absence de raffinage dans le phénomène : les matériaux de charge doivent être propres de produits d'oxydation et d'une composition connue, et certains éléments d'alliage peuvent être perdus en raison de l'oxydation (et doivent être ajoutés après-coup à la fonte). Les fréquences opérationnelles vont de 50 - 60 Hz à 400 kHz ou plus, en fonction du matériau à fondre, du volume du four et de la vitesse de fusion requis [17].

#### 1°.Principe

Ce type de four utilise le principe de l'induction électromagnétique. Selon ce principe physique, un champ magnétique produit dans le métal un courant électrique induit. Le métal se comporte alors telle une résistance et chauffe proportionnellement à la puissance du champ. En effet ce mode de chauffage est basé sur le principe du transformateur. Il utilise les propriétés électromagnétiques de certains matériaux qui, lorsqu'ils sont soumis à un champ alternatif, laissent se développer des courants induits (courants de Foucault). C'est le corps à chauffer lui-même qui constitue le secondaire du transformateur



**Figure 2.3.:** *Chauffage d'un métal par induction*

### **2°. Applications industrielles des fours à induction**

L'avantage du four à induction est qu'il est propre, économe en énergie et permet de mieux contrôler la fusion des métaux. Les fonderies modernes utilisent ce type de four qui supplante les hauts fourneaux pour produire la fonte, car ces derniers émettent beaucoup de poussières et polluent beaucoup. Vu ces avantages techniques, les fours à inductions ont trouvé plusieurs applications dans les industries. Ils sont retrouvés également sous plusieurs types [17].

### **3°. Four à induction Kjellin**

Le four de type Kjellin est constitué par un récipient de forme annulaire, revêtu intérieurement de matériaux réfractaires et traversé par le noyau ferromagnétique d'un transformateur, dont l'enroulement primaire est connecté au générateur. Grâce à un courant d'intensité élevée (jusqu'à 30 000 ampères), la matière en fusion peut atteindre une température très élevée. La conception de ce type vise à donner à la boucle magnétique de fonte une taille minimale. Le but est d'assurer une résistance électrique élevée au passage du courant (améliorant ainsi l'efficacité) sans créer de contractions dans le fluide à l'interruption du passage du courant.

## 2.3 FOUR A ARC

### 2.3.1. Définition

Le four à arc d'aciérie est un outil de fusion destiné à fondre un métal primaire qui est, en général, de la ferraille, mais qui peut être de la fonte (solide ou liquide) ou encore des minerais pré réduits. Un four à arc est un type de four électrique utilisé en métallurgie. Il utilise l'énergie thermique de l'arc électrique établi entre une (ou plusieurs) électrode(s) de carbone et le métal pour obtenir une température suffisant à sa fusion. De petite (environ une tonne) ou grande capacité (jusqu'à 400 t), il est principalement utilisé pour la production d'acier liquide (environ 35 % de la production mondiale) et aussi pour le recyclage des métaux (par exemple pour récupérer le zinc de poussières et déchets métallurgiques). Des fours à arc miniatures sont utilisés dans certains laboratoires de recherche. Certains fours sont utilisés pour des réactions entre solides ou entre phases gazeuses. On le retrouve dans d'autres secteurs, comme celui de l'odontologie, avec des capacités de quelques dizaines de grammes [18].



**Figure 2.4.** Four à arc électrique

### 2.3.2. Arc électrique

#### 2.3.2.1. Définition

L'arc électrique est la manifestation du passage du courant entre deux électrodes dans un milieu ionisé (air ou gaz particulier), il est caractérisé par une tension basse et un fort courant. Un arc électrique peut être obtenu entre deux électrodes de charbons soumises à une différence de potentiel convenable. Lorsque l'arc jaillit entre les électrodes, la différence de potentiel entre celle ci devient faible : L'ionisation intense de l'espace inter électrodes a rendu cette espace

brutalement très conducteurs alors qu'il était isolant (ou presque) avant l'amorçage. On s'explique ainsi que :

1- Un arc doit être préalablement amorcé pour amener à l'incandescence un point de la cathode ; le mode d'amorçage le plus simple consiste à mettre en contact les électrodes. Ce contact, toujours imparfait, presque une résistance « R » appréciable et, si le courant qui la traverse a une intensité « I » suffisante (produit  $RI^2$  assez grand), les surfaces en contact sont portées et l'incandescence. Cela explique qu'un arc ne puisse subsister avec une cathode froide ; par exemple, avec une cathode dans l'huile, surtout si celle-ci est en cuivre (bonne conductivité thermique), le maintien de l'arc est plus difficile.

2- La décharge par arc exige un minimum de tension et un maximum de courant. Le minimum de tension est compris entre 10 et 20 V suivant le gaz et la distance entre les électrodes à courant égale, quand on écarte les électrodes, la tension de l'arc s'accroît[19].

### 2.3.2.2. Propriétés

L'arc électrique, dont la forme caractéristique est au mouvement de l'air ascendant est dit arc voltaïque. Il est lumineux, instable et dégage de la chaleur. On peut en première approximation assimiler un arc électrique à une résistance variable. Alors que, si « I » le courant de l'arc, la tension s'exprime, par la relation usuelle.

$$U_a = R_a \cdot I$$

La courbe caractéristique de l'arc  $U_a = f(I)$  est donnée par la figure suivante, pour des valeurs croissantes de la longueur d'arc [19].

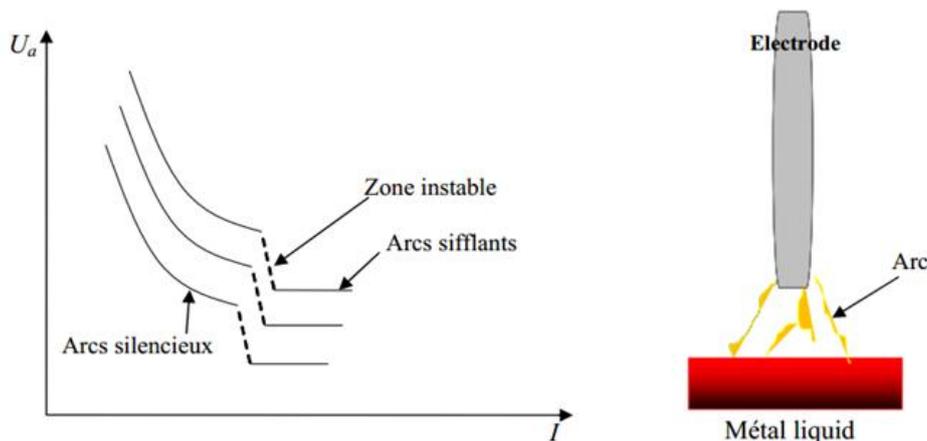


Figure 2.5. La courbe «  $u_a=f(I)$  »

### 2.3.3. Principe du four à arc électrique

En effet, l'arc électrique est la manifestation du passage du courant entre les électrodes dans un milieu gazeux ionisé à la pression atmosphérique ou à une pression différente. Il permet de mettre en œuvre des puissances très élevées et d'atteindre des températures de l'ordre de 4000°C. Un courant traversant un arc électrique est généralement intense et variable. C'est pourquoi un arc électrique cause de fortes perturbations électriques. Dans le modèle physique du four à arc (**Figure 2.4**) il y'a trois électrodes qui se déplacent verticalement en haut et en bas à l'aide des vérins hydrauliques. Théoriquement, le minerai est fondu lorsque les électrodes subissent une puissance énorme. Puisque la densité du produit réel est plus grande que son résidu, le minerai se sédimente au fond du four en créant la matte. Au-dessus de la matte se trouve les scories ou les résidus. En revanche, c'est la chaleur énorme créée par les électrodes qui permet au minerai de se liquéfier et de se séparer. Toutefois, selon les mécanismes de conversion de la puissance en chaleur et selon le transfert de la chaleur libérée à la charge. Contrairement à un haut fourneau, un four à arc ne fonctionne pas en coulée continue. En fonction de la capacité de la cuve, une certaine quantité de ferraille est introduite dans la cuve puis est progressivement liquéfié avant d'être extraite de celle ci. Un tel cycle se fait en plusieurs étapes :

#### **1<sup>ère</sup> étape : Chargement du four :**

A l'aide du panier à ferraille, on verse la matière première dans la cuve. Celle-ci est principalement composée de différents types de ferrailles préalablement mélangés afin d'avoir une qualité constante. Une fois la charge insérée, on ferme la cuve.[20]

#### **2<sup>ème</sup> étape Phase de fonte**

Une fois le couvercle hermétiquement posé sur la cuve, on insère les électrodes dans celle ci. Dès la mise sous tension, l'énergie thermique dégagée par les arcs électriques commence à faire fondre les ferrailles situées à proximité des électrodes. Au fur et à mesure de la fonte de la charge située en surface, les électrodes sont abaissées afin de liquéfier progressivement toutes les ferrailles contenues dans le four. Lors de cette phase, différents éléments sont injectés dans le four :

- La chaux servant à la constitution du laitier en surface.
- Le laitier est un produit apparaissant lorsque l'on fait fondre de l'acier. Il rassemble les impuretés qui s'échappent lors de la fusion du carbone, nécessaire à la formation d'un laitier moussant et à la réduction partielle de l'oxyde de fer. Avec un laitier moussant, l'arc électrique est noyé dans le laitier, ce qui donne un fonctionnement électrique plus stable et surtout améliore le rendement thermique du four en évitant le rayonnement de l'énergie de

l'arc vers les parois de l'oxygène qui a pour rôle d'accélérer la décarburation de la charge, en brûlant le carbone en monoxyde et en dioxyde de carbone du gaz naturel, dont le rôle est d'apporter une énergie thermique supplémentaire et de permettre une fusion plus régulière de la charge.

- Différent éléments d'addition en fonction du type d'acier que l'on veut produire. Ceux ci sont injectés en fin de fusion, pendant la période d'affinage.[20]

### 3<sup>ème</sup> étape: Coulée

Une fois que toute la charge est liquéfiée, le laitier qui se trouve en surface est extrait en faisant basculer le four d'un angle de quelques degrés. Enfin, on continue à basculer la cuve jusqu'à ce que l'ensemble de l'acier liquéfié se soit écoulée. Une fois cette opération effectuée, le four se remet dans sa position initiale, les électrodes sont extraites de la cuve et le couvercle est retiré afin de démarrer un nouveau cycle de fonte. La durée d'un cycle, appelé temps de coulé-à-coulé, varie entre 35 et 80 minutes et dépend de la taille du four, de l'acier à produire ou encore du type de ferrailles utilisé. On peut toutefois considérer qu'une telle opération dure en moyenne 45 à 50 minutes pour des fours de capacité standards, c'est-à-dire entre 80 et 150 tonnes par cycle [20].

#### 2.3.4. Caractéristiques de fonctionnement du four

Dans la construction du FAE on distingue le circuit principal de courant et le circuit auxiliaire. Le circuit principal inclut (**figure 2.6.**) Le four avec les électrodes et la cuve 1, le réseau court 2, le transformateur du four 3, le réacteur 4 (dans ce cas il est incorporé) et les commutateurs 6, l'équipement de commutation de moyen tension 5. Au circuit auxiliaire on attribue les circuits de commande, de mesure, de protection, d'automatisation etc... Le fonctionnement du FAE est caractérisé par les régimes suivants:

##### 1. Le régime électrique :

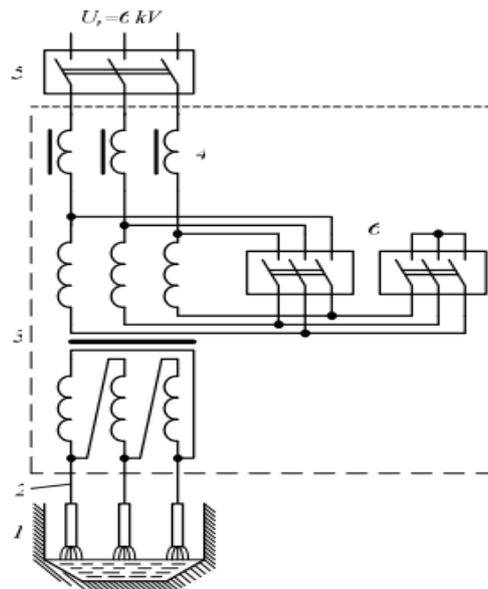
Il est défini par les valeurs du courant, de la tension, de l'impédance et de la puissance. La variation de la charge a lieu par suite de la modification de la longueur et de l'impédance de l'arc, fluctuant de zéro (le court-circuit et la puissance du transformateur et maximale) à l'infinie (la coupure de l'arc).

##### 2. Le régime de chargement :

Il est défini par les régimes de marche à vide, de charge nominale et de court-circuit d'exploitation.

### 3. Le régime de fonctionnement :

Il doit être économique et rationnel, qui est défini par une série des indices énergétiques comme la productivité, la consommation spécifique de l'énergie électrique, la qualité et le prix de revient de fabrication. La rationalité de fonctionnement du FAE est caractérisée par la brûlure continue des arcs électriques, l'absence de la non symétrie des puissances des arcs et le rapport correct entre l'impédance du circuit d'alimentation et les impédances des arcs



**Figure 2.6.** Schéma électrique du FAE.

**Tableau 2.1 :** Exemple de caractéristiques techniques du four à arc t [21]

|  |                 |
|--|-----------------|
| Capacité nominal                         | <b>5 tonne</b>  |
| Intensité du courant nominal d'électrode | <b>9200 A</b>   |
| Puissance nominal du transformateur      | <b>3500 KVA</b> |
| Nombre de la phase de four               | <b>3 phases</b> |
| Diamètre intérieur de la chemise de four | <b>3150 mm</b>  |
| Diamètre nominal d'électrode             | <b>250 mm</b>   |

#### 2.3.5. Les facteurs liés au fonctionnement des FAE

**1. La caractéristique du FAE**, c'est-à-dire la destination, le type, le matériel fusionné, la capacité nominale, les paramètres du transformateur et l'équipement électrique, le système automatique de réglage, le processus technologique, le caractère de la charge et la consommation de puissance active et réactive.

**2. La caractéristique d'alimentation en énergie électrique**, le rapport de puissances du transformateur du four et de court-circuit du système dans le point commun de raccordement du four et du réseau, la présence des installations de compensation.

3. Les perturbations créées par le FAE, le type de consommateurs sensibles, l'évaluation quantitative des ces perturbations sur les jeux de barres du centre d'alimentation et leur présence dans le réseau électrique de distribution [22].

## 2.4. LES TYBE DES FOURS A ARC

### 2.4.1 Four à arc d'après leur nature d'arc

- *Four à arc libre*

Dans le four à arc libre, ou à arc indirecte, l'arc est maintenu entre les électrodes disposées horizontalement sur la charge (dans lesquels la chaleur est produite par le passage de l'arc directement entre les électrodes). Il est généralement utilisé pour la fusion de la fonte ou l'acier.

- *Four à arc sur résistance*

Le four à arc sur résistance, ou à arc submergé est utilisé à la fabrication des ferroalliage, ou à la réduction de certains mènerais. Dans ce genre de four les électrodes sont plongées dans la charge.

- *Four à arc sur charge*

Dans ce four l'arc est maintenu entre les électrodes et la charge. Ce type de four est presque exclusivement utilisé à la fabrication de l'acier à partir de la ferraille ou autres charges métalliques.

L'alimentation de ces types des fours peut être continue ou alternative, monophasé, biphasé ou triphasés. Généralement les fours de grande puissance sont triphasés [19].

- *Applications*

*Les fours à arc libre*, dont la capacité s'échelonne entre 100 KVA et 500 KVA environ, sont surtout utilisés pour l'élaboration de métaux (fonte alliage, bronze, etc.,...) qui ne peuvent être obtenus dans des conditions économiquement satisfaisantes avec les autres types de fours. Jusqu'à une époque récente, *les fours à arc sur charge* étaient utilisés pour l'élaboration d'aciers spéciaux, mais depuis 1950, des travaux menés par sidérurgies et des électriciens ont permis des accroissements considérables des puissances. Ces fours, dites à ultra haute puissance ou productivité « U.H.P » peuvent fournir des dizaines de mégawatts ; ils sont alimentés à partir du réseau haute tension et permettent la production économique d'acier ordinaire à une cadence rapide.

### 2.4.2. Four à arc d'après leur nature d'alimentation

#### 2.4.2.1. Four alimenté en courant continu

Du point de vue descriptif, le four à courant continu est semblable au four à courant alternatif. Il s'en distingue toutefois par son alimentation électrique et par présence d'une ou de plusieurs

électrodes de sole .Autrefois, les fours à courant continu de grande puissance étaient équipés d'un système de trois électrodes alimentés chacune par un redresseur spécifique. Aujourd'hui, le système mono-électrode, alimenté par un ou plusieurs redresseurs en parallèle ou en série, équipé la grande majorité des fours à courant continue [22].

• *Description de la partie électrique*

L'architecture d'alimentation électrique d'un four à arc à courant continu est semblablement la même que celle d'un four à courant alternatif. Toutefois, elle se distingue par la présence de redresseur entre le transformateur du four et les électrodes. L'architecture la plus couramment répandue comprend :

- Un transformateur abaisseur permettant de passer de la haute tension à une moyenne tension.
- Un ou deux disjoncteurs de protection et de manœuvre.
- Un transformateur de four permettant de passer de la tension intermédiaire à des basses tensions.
- Un redresseur.
- Un ensemble de câbles souples et une porte électrode.
- Un système de compensation d'énergie réactive comprenant un filtrage anti harmonique.

Les puissances mises en jeu dans les fours à arc étant relativement importantes, ils nécessitent donc des convertisseurs à courants élevés ; on utilise généralement la mise en parallèle de deux ponts triphasés à thyristors, raccordés à un transformateur à double enroulement. Les enroulements secondaires de se transformateur sont alors couplés en étoile et triangle de manière à obtenir un redresseur triphasé à indice de pulsation  $p=12$ .

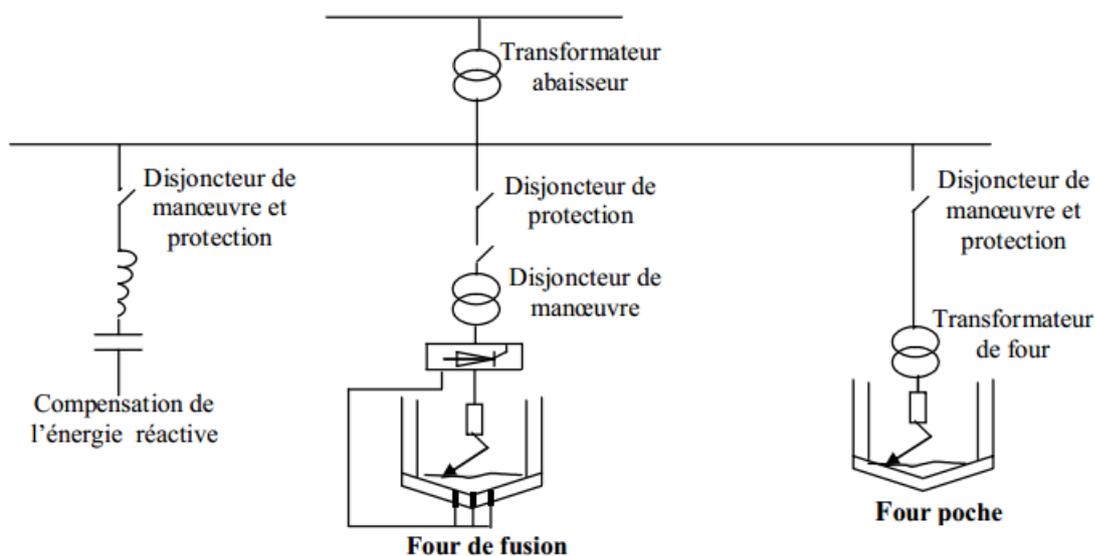


Figure 2.7: Schéma électrique d'un four à arc à courant continu

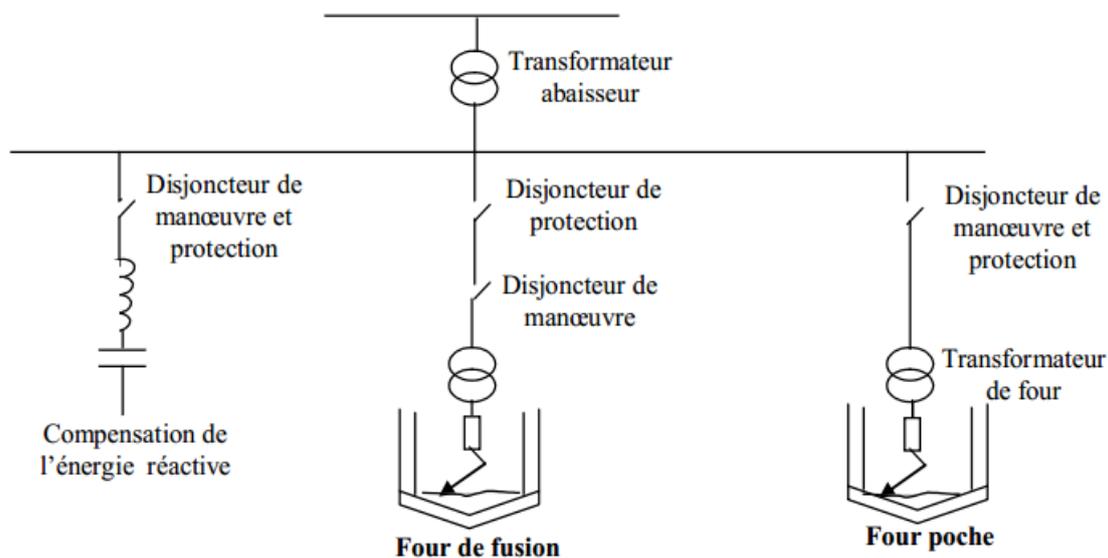
### 2.4.2.2. Four à arc à courant alternatif

Un four à arc électrique est un outil permettant de produire de l'acier, généralement à partir de ferrailles de récupération. L'énergie nécessaire au fonctionnement d'une telle installation provient principalement de l'arc électrique apparaissant entre les électrodes introduites dans le four.

- **Description de la partie électrique**

Etant donnée les puissances mises en jeu, les fours à arcs de sidérurgie sont toujours raccordés au réseau haute tension. L'architecture d'alimentation électrique la plus couramment répandue comporte :

- Un transformateur abaisseur permettant de passer de la haute à une moyenne tension intermédiaire.
- Un disjoncteur de protection et un disjoncteur de manœuvre.
- Un transformateur de four réglable en charge, permettant de passer de la tension intermédiaire à des basses tensions au niveau du four.
- Un ensemble de câbles souples et une porte électrode.
- Un système de compensation d'énergie réactive comprenant un filtrage anti harmonique ; la compensation d'énergie réactive peut être obtenue soit par un dispositif plus élaboré de compensation statique.



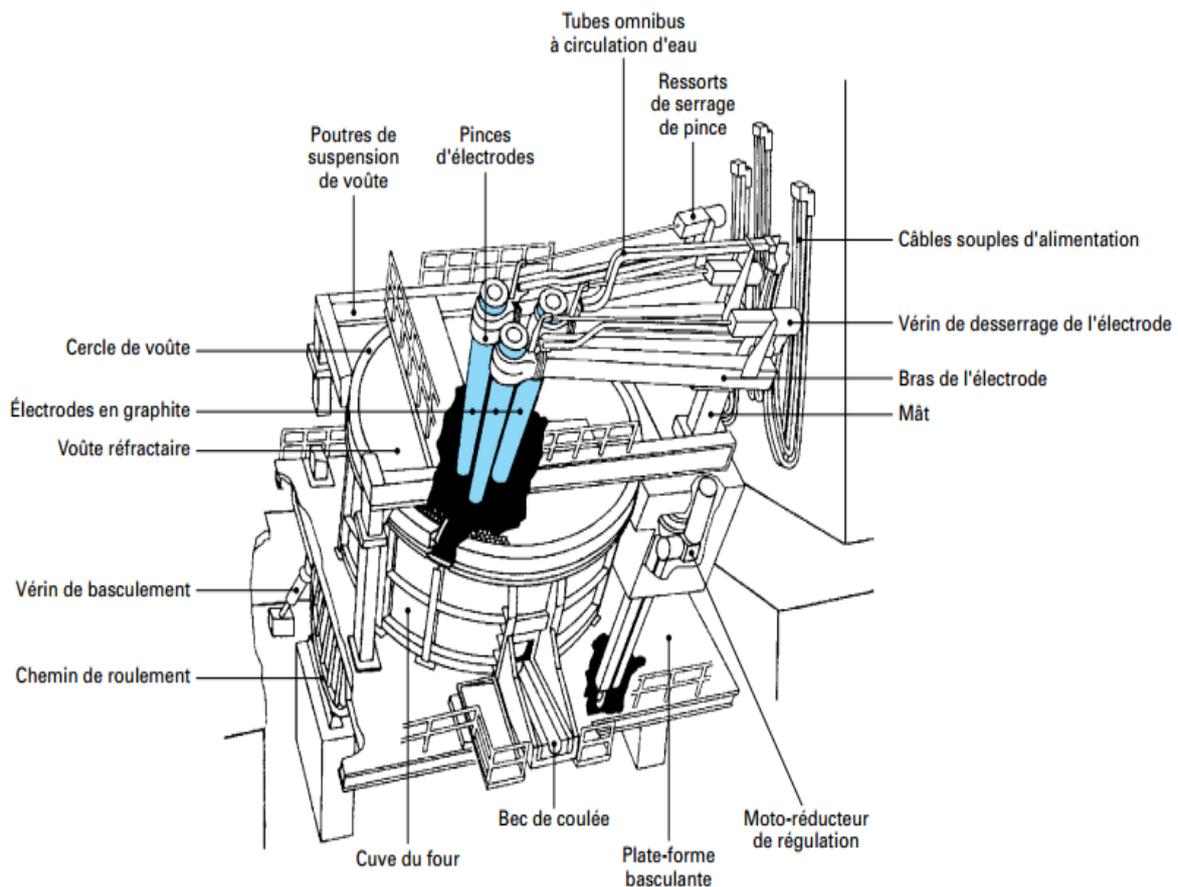
**Figure 2.8.** : Schéma électrique d'un four à arc à courant alternatif

En comparaison avec le four à courant continu, le four à courant alternatif présente deux avantages — ne nécessitant aucun composant d'électronique de puissance, l'alimentation électrique est constituée de composants électrotechniques classiques et présente un moindre coût ;

- aucune électrode de sole, placée au fond de cuve au travers de la sole réfractaire, n'est nécessaire pour le retour du courant [22].

- **Description technologique :**

Dans le four à arc à courant alternatif triphasé, les arcs se développent entre chacune des trois électrodes en graphite et le métal. Le métal fond par attaque directe des arcs qui creusent des puits dans la charge métallique solide. Lorsque ces puits sont formés, les arcs travaillent sur un bain liquide dont le volume augmente au cours de la fusion.



Le four représenté est un four à bélier

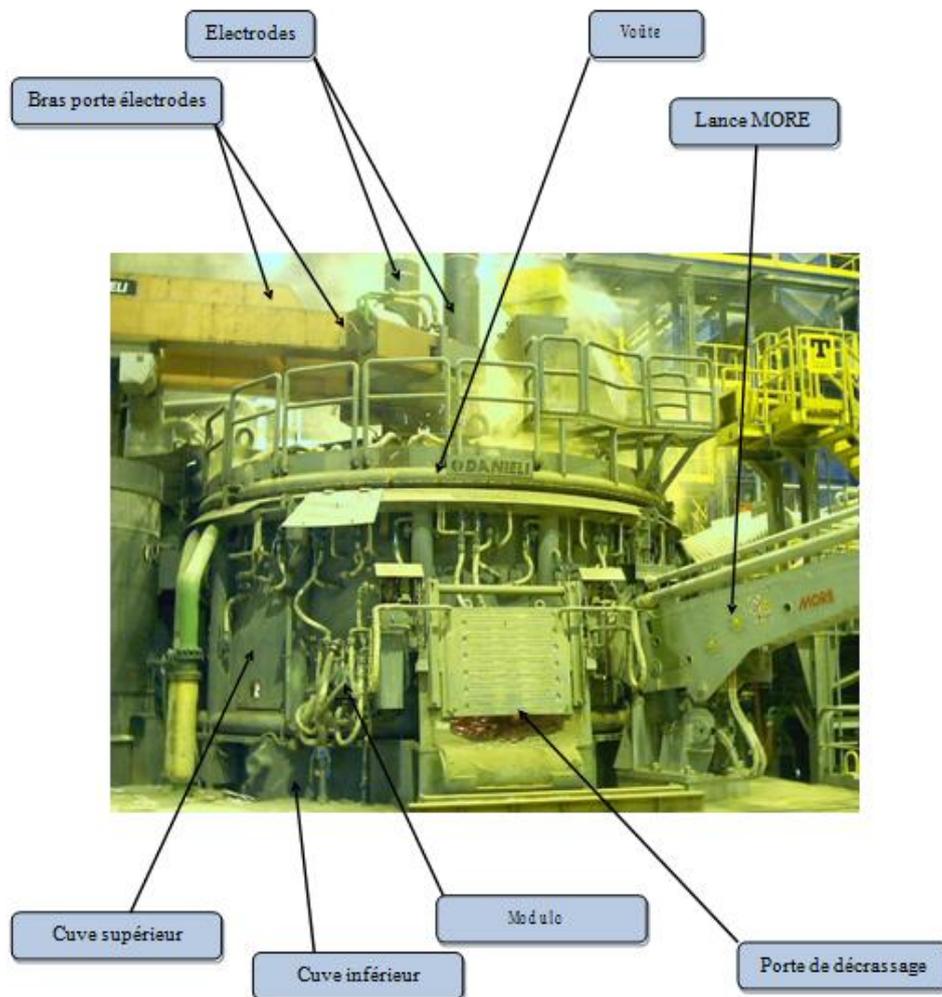
**Figure 2.9.** Vue extérieure d'un four à arc à courant alternatif

## 2.5. DESCRIPTION DES EQUIPEMENTS EAF

Le four électrique est formé par les composants suivants :

- Système de basculement du four :
  - Plate forme de support
  - Système de blocage de la plate forme
- Cuve et panneaux refroidis à l'eau

- Porte de décrassage
- Coulée en poche à trou excentrique (EBT)
- Lance d'ouverture EBT
- Ensemble de levage/rotation de la voûte
- Voûte refroidie
- Ensemble de levage des électrodes
- Bras porte électrode
- Circuit secondaire
- Câbles souples refroidis



**Figure 2.10.** Les équipements d'un four à arc

### 2.5.1. Système de basculement du four

Ce système est constitué de deux gros vérins hydrauliques commandés par une centrale hydraulique, fixés aux fondations et latéralement connectés à la plate-forme du côté de décrassage ils sont protégés contre la chaleur et la chute de matières étrangères par un mur de béton armé

recouvert de briques réfractaire.

### **Système de blocage de la plate-forme :**

Deux dispositifs de blocage sont installés sur la plate-forme de support pour empêcher que le four bascule spontanément vers la position de décrassage pendant le chargement et la fusion de la ferraille. Ces dispositifs de blocage sont formés par deux leviers commandés par deux vérins hydrauliques à double effet. Les vérins absorbent les contraintes au choc pendant le chargement de la ferraille en empêchant leur transmission au système de basculement [23].

### **2.5.2. Cuve et panneaux refroidis**

La cuve est soutenue et fixé à la plate-forme de basculement.

#### **Cuve inférieur :**

La cuve inférieure a une forme ovale, en plaques d'aciers épaisses, complètement soudée et renforcée avec cordons. Cette cuve est renforcée par des couches de briques réfractaires. Elle est équipée d'injecteur de gaz pour le brassage du bain.

#### **Cuve supérieur :**

La cuve supérieur est constituée de panneaux refroidis ayant des formes différentes, conçus pour obtenir le meilleur refroidissement de tous les composants du four. Les panneaux de refroidissement donnent à la cuve une structure modulaire en remplaçant le revêtement réfractaire, ce qui fait augmenter la capacité de la cuve.

#### **Porte de décrassage :**

La porte de décrassage sert à dégager la première couche de laitier de la coulée.

La porte de décrassage est constituée d'un panneau refroidi à eau. Elle est commandée par un vérin hydraulique qui fait lever/baisser (ouvrir/fermer) la porte [23].

### **2.5.3. EBT (dispositif de coulée en poche à trou excentrique)**

L'EBT, monté sur le fond du four électrique à arc, sert à obtenir une coulée en poche compacte, avec un débit concentré sans laitier. Le trou de coulée est rempli de sable réfractaire, et le dispositif de fermeture marche selon le principe d'un tiroir actionné par un système hydraulique.

#### **Généralement, chaque EBT est constitué de :**

- Un trou de coulée formé par un jeu briques réfractaires en anneau, appuyées sur une bride en acier fixé à la cuve du four au moyen de goupilles et coins.
- Un dispositif refroidi à l'eau contrôlé par un vérin hydraulique qui commande la plaque d'ouverture et la fermeture du trou de coulée.
- Un circuit de refroidissement pour les composants du système, tel que le bras de la plaque, les vérins hydraulique de rotation de blocage.

#### 2.5.4. Lance d'ouverture EBT : (si prévu)

La lance d'ouverture de l'EBT est utilisée seulement dans des situations d'urgence, c'est-à-dire lorsque le système de coulée en poche à trou excentrique est colmaté et empêche que l'acier sorte. Dans une telle situation, la lance est placée en-dessous du trou et de l'oxygène est injecté jusqu'à ce que le trou s'ouvre et l'acier sorte.

#### 2.5.5. Ensemble de levage et rotation de la voûte

L'ensemble de levage et de rotation est un soubassement fixé à la plate-forme par un gros palier de poussée qui garantit, au moyen d'un vérin hydraulique, la rotation de la structure supérieure, et par conséquent, la rotation des colonnes-pont qui soutiennent la voûte et des mâts-bras des électrodes. L'ensemble de levage de la voûte est fixé au soubassement et actionné par vérin hydraulique à double effet. Un dispositif mécanique commandé par un vérin hydraulique bloque le mât en position élevée en cas de manque de pression. L'ensemble de levage et rotation est conçu pour faire tourner les bras porte-électrodes tandis que la voûte reste sur la cuve du four sans aucun débranchement mécanique [23]

#### 2.5.6. Ensemble de levage des électrodes

Le système est composé de mâts (un pour chaque électrode) formés par une structure en acier à la quelle sont soudés des guidages, ces guidages se déplacent sur 4 paires de roues installées sur des supports fixés au carter de support, dont la position, par rapport aux guidages, peut être réglée pour obtenir une verticalité parfaite de l'électrode. Chaque mât est activé par son vérin hydraulique, sa partie inférieure est fixé au fond de la structure rotative alors que sa partie supérieure est fixé à la structure du mât.

#### 2.5.7. Bras porte-électrodes conducteur

Chaque bras porte-électrode est composé de plaques bimétalliques cuivre-acier soudées. Ces bras sont complétés de tuyaux souples pour alimenter et décharger l'eau de refroidissement. L'attache entre l'électrode et la pince est au moyen d'un ensemble pousseur/serreur composé d'une série de rondelles ressorts, qui bloquent l'électrode au cas en cas de manque de pression dans le circuit hydraulique du four. L'ouverture de la pince (dégagement de l'électrode) est par un vérin hydraulique, dont la force est supérieure à celle des rondelles ressort. Le bras porte-électrode est fixé de façon permanente à la partie supérieure du mât. La forme de cette partie permet de régler la position du bras dans certaines limites afin de régler le diamètre primitif et mettre en place les électrodes à l'intérieur du logement de la voûte centrale

### 2.5.8. Circuit secondaire

Ce circuit sert à créer une connexion électrique entre le transformateur et les câbles de courant souples connectés aux bras porte-électrode. Le circuit est formé par des tuyaux conducteurs en cuivre refroidis et comprend également une structure de support soudée complétée de supports pour les fils conducteurs [23].

### 2.5.9. Electrode au graphite

Les électrodes au graphite possèdent les qualités physiques, chimiques et électriques nécessaires pour la fusion de l'acier. Les électrodes sont constituées d'une pâte de carbone ayant subi, après cuisson, un traitement de graphitisation ; elles s'usent au cours de la fusion, et leur consommation est d'environ 1,2 Kg par tonne d'acier produit. La consommation d'électrodes d'un four à arc est due à deux types d'usure :

- L'usure de pointe : cette usure est proportionnelle au carré de l'intensité du courant et à la durée de fonctionnement.
- L'usure latérale : cette usure est due à l'oxydation du graphite porté au rouge et est proportionnelle au temps de cycle de fusion (tap to tap time) et à la surface rougie en contact avec l'air.

### 2.5.10. Installation d'aspiration de fumée

L'aspiration des fumées du four électrique est effectuée par un système spécifique indépendant (la dépoussiéreuse FTP). Les fumées sont rassemblées à travers le canal de chargement : une légère pression négative est créée à l'intérieur du four, ce qui permet de rassembler et décharger les fumées et les poussières produites pendant le procédé.

### 2.5.11. Système de graissage

Le système à lignes double centralisé avec inverseur automatique est composé d'une motopompe avec réservoir, d'un équipement électrique de commande, de filtres, des tuyaux rigides et flexibles pour la connexion avec les points d'usage (roue de guidage du mât, palier de butée de rotation et articulation du vérin).

### 2.5.12. Système de refroidissement

L'eau est le fluide de refroidissement principalement utilisée au cours du refroidissement commandé des composants du four exposés aux radiations thermiques. Le système est à circuit fermé, sauf pour le circuit de refroidissement des électrodes amovibles. Le tout est alimenté avec l'eau propre et filtrée, provenant du système de traitement des eaux de l'aciérie.

### 2.5.13. Système hydraulique

Le système hydraulique est composé principalement d'une centrale, de tuyaux flexible et rigides ainsi que de dispositifs de réglage et de commande : il fournit un fluide hydraulique à haute pression vers les vérins moteurs (levage, baisse, verrouillage...) et aux systèmes asservis pour le réglage des électrodes du four.

### 2.5.14. Chariot poche

Ce chariot transporte la poche de la zone de coulée (EBT) du four à la station de la poche.

Le chariot est constitué essentiellement des éléments suivant :

- Une structure solide en acier soudée avec deux longerons latéraux supportant les groupes moteurs et les galets de roulement raccordés par deux longerons en position de tête.
- Deux selles d'appui pour la poche avec un système de pesage pour contrôler constamment la quantité d'acier dans la poche.
- Des protections pour la structure du chariot ainsi que pour les pièces mécaniques et électriques.

### 2.5.15. Auxiliaire

- **Lance PALMUR (MORE) :**

Le manipulateur PALMUR est un équipement qu'on utilise pour injecter l'oxygène et le charbon à l'intérieur du four électrique pendant la fusion d'une charge métallique.

- **Modulo :**

Le four électrique possède un système de 2 "modulo" plus un oxyjet pour injecter le charbon et l'oxygène à l'intérieur du four. Chaque modulo est composé d'un oxyjet et d'un carbone-jet.

## 2.6. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU FOUR A ARC

### 2.6.1. Avantages

Le four à arc présente un certain nombre de qualités que n'ont pas les autres procédés : Souplesse et précision du réglage de la température.

Choix et constance de l'atmosphère dans le four [19].

- ✓ Facilité dans la conduite et l'exploitation.
- ✓ Facilité d'automatisation.
- ✓ Minimum d'effluents gazeux.
- ✓ Possibilité de travailler avec des parois froides.
- ✓ Températures élevées.
- ✓ Souplesse de conduite.
- ✓ Maîtrise indépendante de l'intensité et de la tension.

- ✓ Possibilité de travailler avec une voûte froide (arc submergé).
- ✓ Taille modulable.
- ✓ Grande rapidité de fusion.

### **2.6.2. Inconvénients**

- ✓ Consommation d'électrodes.
- ✓ Vaporisation en surface (arc rayonnant).
- ✓ Erosion des réfractaires.
- ✓ Initier la fusion lorsque le bain n'est pas conducteur à froid.
- ✓ Influence de la résistivité du bain (arc submergé)[19].

## **CONCLUSION**

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu général sur les fours à arcs, concernant leurs descriptions, types, rôles, avantages et inconvénients. Après avoir rappelé les notions nécessaires à la compréhension du fonctionnement des fours à arcs, nous avons vu que l'aciérie électrique avec le four à arc est également économique et suivie d'une énorme évolution surtout coté capacité et taux de production. Dans le chapitre qui suit, la maintenance d'un tel équipement sera abordée sous l'aspect fiabilité, maintenabilité et disponibilité.

# CHAPITRE 03

*Etude de cas*

### 3.1. INTRODUCTION

Positionner la maintenance au sein de l'appareil de production est un exercice difficile, comme il est toujours difficile de faire simple dans un environnement complexe. l'objectif du dernier chapitre où on tente par l'exploitation de l'historique de panne de four à arc électrique de faire face à l'étude expérimentale des indicateurs FMD de telle four tout en traçons les courbes de ces trois indicateurs. Pour les produits réparables on retient comme indicateur de fiabilité, la moyenne des temps de bon fonctionnement satisfaisant entre deux défaillances du produit. On le désigne par « MTBF » (Mean Time Between Failure = moyenne des temps de bon fonctionnement).

L'aspect qui nous intéresse pour le calcul de la MTBF

#### Aspect statistique

$$\text{MTBF} = \frac{\sum \text{des temps de bon fonctionnement satisfaisant}}{\text{Nombre de périodes de bon fonctionnement}}$$

La MTBF comme moyenne des temps de bon fonctionnement.

Pour calculer ou même estimer la fiabilité  $R(t)$ , et pour étudier ou bien estimer le taux de défaillance  $\lambda$  de la machine on a besoin des données indispensable comme le temps de bon fonctionnement (TBF) et le nombre de pannes et le temps de réparation.

### 3.2. FIABILITE OPERATIONNELLE

#### 3.2.1 Exploitation de l'historique

L'historique des pannes (four à arc 5t) (voir annexe 1)

Le traitement des données brutes de l'historique (tableau 3.1), passe par :

- Le calcul des heures d'arrêt suite à des pannes (TA) qui résultent des différences entre les dates d'arrêt et de démarrage.
- Le calcul des heures de bon fonctionnement (TBF), qui résultent des différences entre deux pannes successives.
- Le calcul des heures techniques de réparation.

**Tableau 3.1:** l'historique des pannes (four à arc 5t)

| N° d'ordre | Date de démarrage | TBF (h) | Date d'arrêt | TA (h) | TTR q(h) |
|------------|-------------------|---------|--------------|--------|----------|
| 01         | 06.01.2016        | 624     | 02.02.2016   | 24     | 08       |
| 02         | 03.02.2016        | 96      | 04.03.2016   | 24     | 03       |
| 03         | 05.03.2016        | 1588    | 10.05.2016   | 24     | 01       |
| 04         | 11.05.2016        | 48      | 12.05.2016   | 24     | 02       |
| 05         | 13.05.2016        | 168     | 19.05.2016   | 24     | 02       |
| 06         | 20.05.2016        | 96      | 23.05.2016   | 24     | 01       |
| 07         | 24.05.2016        | 48      | 25.05.2016   | 24     | 04       |
| 08         | 26.05.2016        | 1296    | 19.07.2016   | 24     | 06       |
| 09         | 20.07.2016        | 168     | 26.07.2016   | 24     | 02       |
| 10         | 27.07.2016        | 1656    | 05.10.2016   | 24     | 04       |
| 11         | 06.10.2016        | 1416    | 04.12.2016   | 24     | 02       |
| 12         | 05.12.2016        | 1416    | 03.02.2017   | 24     | 02       |
| 13         | 04.02.2017        | 168     | 10.02.2017   | 48     | 21       |
| 14         | 12.02.2017        | 960     | 20.03.2017   | 24     | 05       |

Le tableau suivant comporte les TBF classés par ordre croissant, et les  $F(t_i)$  calculés par la

méthode des rangs médians  $F(t_i) = \frac{N_i - 0,3}{N_{tot} + 0,4}$ .

(Dans notre cas  $N = 14 \leq 20$ ).

Après le calcul de  $F(t_i)$  on calculé la fiabilité et le taux de défaillance  $\lambda(t)$  par les équations suivants :

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

$$\lambda(t) = \frac{F'(t)}{R(t)} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)}$$

**Tableau 3.2** : les valeurs de F(t) ,R(t) et  $\lambda(t)$ 

| TBF (h) | ni      | Ni | F(t <sub>i</sub> ) | F(t <sub>i</sub> )% | R(t)   | $\lambda(t)$ |
|---------|---------|----|--------------------|---------------------|--------|--------------|
| 48      | 01      | 01 | 0,0498             | 4,9857              | 0,9501 | 0,0749       |
| 48      | 01      | 02 | 0,1210             | 12,108              | 0,8789 | 0,0810       |
| 96      | 01      | 03 | 0,1923             | 19,230              | 0,8076 | 0,0881       |
| 96      | 01      | 04 | 0,2635             | 26,353              | 0,7364 | 0,0967       |
| 168     | 01      | 05 | 0,3347             | 33,475              | 0,6652 | 0,1070       |
| 168     | 01      | 06 | 0,4059             | 40,598              | 0,5940 | 0,1199       |
| 168     | 01      | 07 | 0,4772             | 47,720              | 0,5227 | 0,1362       |
| 624     | 01      | 08 | 0,5484             | 54,843              | 0,4515 | 0,1577       |
| 960     | 01      | 09 | 0,6196             | 61,965              | 0,3803 | 0,1872       |
| 1296    | 01      | 10 | 0,6908             | 69,088              | 0,3091 | 0,2304       |
| 1416    | 01      | 11 | 0,7621             | 76,210              | 0,2378 | 0,2994       |
| 1416    | 01      | 12 | 0,8333             | 83,333              | 0,1666 | 0,4273       |
| 1588    | 01      | 13 | 0,9045             | 90,455              | 0,0954 | 0,7462       |
| 1656    | 01      | 14 | 0,9757             | 97,578              | 0,0242 |              |
|         | Ntot=14 |    |                    |                     |        |              |

### 3.2.2. Calcul les indicateurs MTBF, MTTR,

Le calcul des indicateur de fiabilité MTTR et MTBF ce faire comme suite :

Exemple de calcul :

$$MTBF = \frac{\sum \text{des temps de bon fonctionnement satisfaisant}}{\text{Nombre de périodes de bon fonctionnement}}$$

$$MTTR = \frac{\sum \text{des temps de réparation}}{\text{Nombre de réparation}}$$

$$MTBF = \frac{\sum TBF}{NP + 1} + \frac{9748}{15} = 649.86 \text{ h}$$

$$MTTR = \frac{\sum \text{Temps de réparation}}{NP} = \frac{63}{14} = 4.5 \text{ h}$$

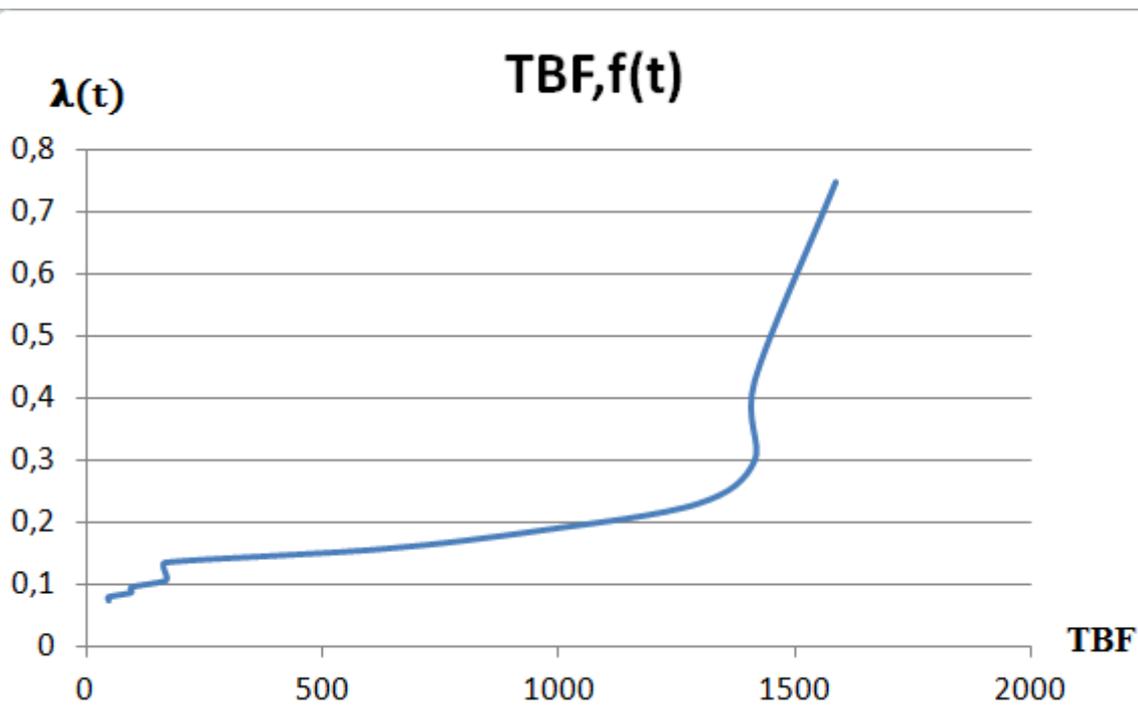


Figure 3.1: La Courbe de taux de défaillance  $\lambda(t)$

### 3.2.3. Analyse de courbe de taux de défaillance

Figure 3.1 présente l'évolution de la fonction de taux de défaillance  $\lambda(t)$ . D'après cette figure on remarque que le taux de défaillance et croissant avec le temps.

## 3.3. FIABILITE PREVISIONNELLE

Dans cette partie on utilise la loi de weibull comme modèle pour estimer une loi de fiabilité.

### 3.3.1. Calcul les paramètres de weibull

Le tableau suivant présenté les TBF classés par ordre croissant, et les  $F(t_i)$  calculés par la méthode des rangs médians.

$$F(t_i) = \frac{n_i - 0,3}{N + 0,4}$$

Après le calcul de  $F(t_i)$  en % nous avons porté les couples de points  $t_i ; F(t_i)$

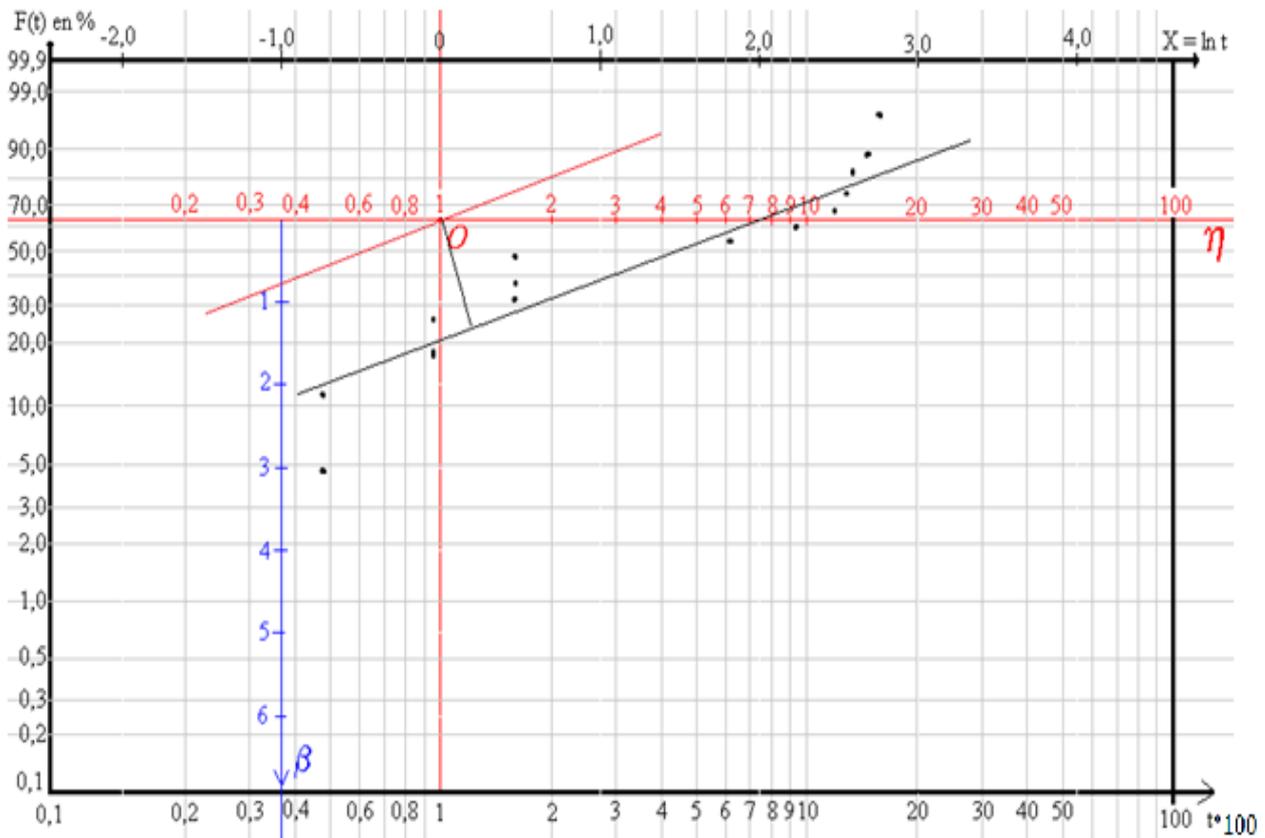
(Dans notre cas  $N = 14 \leq 20$ ) et on trace la courbe de Weibull :

Tableau 3.4 : les valeurs de  $F(t)$  et  $R(t)$  en%

| $t_i = TBF$<br>(h) | $F(t_i)$ | $F(t_i)$<br>% | $R(t)$ | $R(t)$<br>% |
|--------------------|----------|---------------|--------|-------------|
| 48                 | 0,0486   | 4,86          | 0,9501 | 95,01       |
| 48                 | 0,1180   | 11,80         | 0,8789 | 87,89       |
| 96                 | 0,1875   | 18,75         | 0,8076 | 80,76       |

|      |        |       |        |       |
|------|--------|-------|--------|-------|
| 96   | 0,2569 | 25,69 | 0,7364 | 73,64 |
| 168  | 0,3263 | 32,63 | 0,6652 | 66,52 |
| 168  | 0,3958 | 39,58 | 0,5940 | 59,4  |
| 168  | 0,4652 | 46,52 | 0,5227 | 52,27 |
| 624  | 0,5347 | 53,47 | 0,4515 | 45,15 |
| 960  | 0,6041 | 60,41 | 0,3803 | 38,03 |
| 1296 | 0,6736 | 67,36 | 0,3091 | 30,91 |
| 1416 | 0,7430 | 74,30 | 0,2378 | 23,78 |
| 1416 | 0,8125 | 81,25 | 0,1666 | 16,66 |
| 1588 | 0,8819 | 88,19 | 0,0954 | 9,54  |
| 1656 | 0,9513 | 95,13 | 0,0242 | 2,42  |

**Papier de WEIBULL**



**Figure 3.2.** Détermination graphique des paramètres de la loi de weibull.

A partir du papier de WEIBULL On a obtenu les valeurs suivant :

$$\eta=750; \quad \beta=0.8; \quad \gamma=0$$

**3.3.2. Test (KOLMOGOROV SMIRNOV):**

Avant la validation de toutes les lois de fiabilité, il est nécessaire de tester l'hypothèse pour savoir si nous devons accepter ou rejeter le modèle proposé par le test de K-S avec un seuil de confiance de  $\alpha = 20\%$ . Ce test consiste à calculer l'écart entre la fonction théorique  $F_e(t_i)$  et la fonction réelle  $F(t)$  et prendre le maximum en valeur absolue  $D_n.\max$

Cette valeur est comparée avec  $D_n.\alpha$  qui est donnée par la table de Kolmogorov smirnov (voir annexe 03). Si  $D_n.\max. > D_n.\alpha$  on refuse l'hypothèse.

**Tableau 3.5:** test de kolmogrov-smirnov

| N° d'ordre | TBF (h) | $F(t_i)$ | F(t) | $D_n.\max =  F(t_i) - F(t) $ |
|------------|---------|----------|------|------------------------------|
| 01         | 48      | 0,0486   | 0,10 | 0,0514                       |
| 02         | 48      | 0,1180   | 0,10 | 0,018                        |
| 03         | 96      | 0,1875   | 0,17 | 0,0175                       |
| 04         | 96      | 0,2569   | 0,17 | 0,0869                       |
| 05         | 168     | 0,3263   | 0,26 | 0,0663                       |
| 06         | 168     | 0,3958   | 0,26 | 0,1358                       |
| 07         | 168     | 0,4652   | 0,26 | <b>0,2052</b>                |
| 08         | 624     | 0,5347   | 0,57 | 0,0353                       |
| 09         | 960     | 0,6041   | 0,70 | 0,0959                       |
| 10         | 1296    | 0,6736   | 0,78 | 0,1064                       |
| 11         | 1416    | 0,7430   | 0,81 | 0,067                        |
| 12         | 1416    | 0,8125   | 0,81 | 0,0025                       |
| 13         | 1588    | 0,8819   | 0,83 | 0,0519                       |
| 14         | 1656    | 0,9513   | 0,84 | 0,1113                       |

D'après la table de K-S:

$D_n.\max. < D_n.\alpha$  Ce qui veut dire que le modèle de Weibull est accepté.

Nous avons pris la valeur maximale

$$D_n.\max = |F(t_i) - F(t)|$$

$D_n.\max=0,2052$  tandis que  $D_n.\alpha = D_{14,0.2} = 0,274$

$0,2052 < 0,274$  donc l'hypothèse du modèle de Weibull est acceptable.

### 3.3.3. Exploitation les paramètres de weibull

Dans cette partie on calcule la densité de probabilité, La fonction de réparation, La fiabilité et Le taux de défaillance en fonction de MTBF. Mais on première on calcule le MTBF.

#### 1- Le MTBF

D'après le tableau de MTBF (voir annexe 02) on a les valeurs suivant :

$$A = 1,133 \quad B = 1,43.$$

$$MTBF = A \cdot \eta + \gamma$$

$$MTBF = 1,133 \times 750 + 0$$

$$MTBF = 849,75 \text{ h.}$$

### 2-La densité de probabilité en fonction de MTBF

$$\begin{aligned} f(t = MTBF) &= \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \times e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} = \frac{0,8}{750} \left( \frac{849,75}{750} \right)^{-0,2} \times e^{-\left(\frac{849,75}{750}\right)^{0,8}} \\ &= 0,00034 = 0.034 \% \end{aligned}$$

### 3-La fonction de défaillance en fonction de MTBF

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

$$F(t = MTBF) = 1 - e^{-\left(\frac{849,75}{750}\right)^{0,8}} = 0.66 = 66\%$$

### 4-La fiabilité en fonction de MTBF

$$R(t = MTBF) = 1 - F(t = MTBF) = 1 - 0,66 = 0,34.$$

$$R(MTBF) = 34\%.$$

### 5-Le taux de défaillance en fonction de MTBF

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

$$\lambda(t = MTBF) = \frac{0,8}{750} \left( \frac{849,75}{750} \right)^{-0,2} = 0.0010 \text{ panne/heure}$$

### 6-Calcul du temps souhaitable pour une intervention systématique

$$R(t) = 90\% \rightarrow t = ?$$

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

$$\ln R(t) = -\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta = \ln(0.9) \Leftrightarrow -[\ln R(t)]^{1/\beta} = -t/\eta \Rightarrow t = \eta [\ln(1/R(t))]^{1/\beta}$$

$$t = 750 \left[ \ln\left(\frac{1}{0,9}\right) \right]^{0,8} = 45,02 \text{ h}$$

Pour garder la fiabilité de four 80% il faut intervenir chaque temps systématique 115,02 h

### 3.3.4. Etude de modèle de weibull

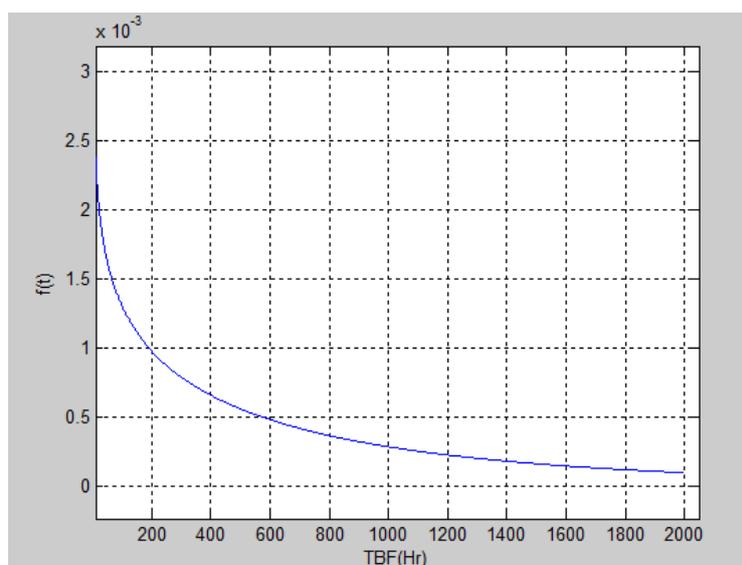
#### 3.3.4.1. La fonction de la densité de probabilité

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

$$f(t) = R(t) \cdot \lambda(t)$$

**Tableau 3.6 :** les valeurs de f(t)

| TBF (h)    | f(t)10 <sup>-3</sup> | TBF (h)     | f(t)10 <sup>-3</sup> | TBF (h)     | f(t)10 <sup>-3</sup> |
|------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|----------------------|
| <b>48</b>  | 1,65                 | <b>168</b>  | 1,06                 | <b>1416</b> | 0,17                 |
| <b>48</b>  | 1,65                 | <b>168</b>  | 1,06                 | <b>1416</b> | 0,17                 |
| <b>96</b>  | 1,32                 | <b>624</b>  | 0,46                 | <b>1588</b> | 0,14                 |
| <b>96</b>  | 1,32                 | <b>960</b>  | 0,30                 | <b>1656</b> | 0,13                 |
| <b>168</b> | 1,06                 | <b>1296</b> | 0,20                 |             |                      |



**Figure 3.3:** La Courbe de densité de probabilité

#### Commentaire

La figure 3.3 présente l'évolution de la fonction densité de probabilité. D'après cette courbe on remarque que la fonction  $f(t)$  (densité de probabilité) est décroissante avec le temps.

3.3.4.2. Fonction de défaillance  $F(t)$

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

Tableau 3.7: les valeurs de  $F(t)$

| TBF (h) | F(t) | TBF (h) | F(t) | TBF (h) | F(t) |
|---------|------|---------|------|---------|------|
| 48      | 0,10 | 168     | 0,26 | 1416    | 0,81 |
| 48      | 0,10 | 168     | 0,26 | 1416    | 0,81 |
| 96      | 0,17 | 624     | 0,57 | 1588    | 0,83 |
| 96      | 0,17 | 960     | 0,70 | 1656    | 0,84 |
| 168     | 0,26 | 1296    | 0,78 |         |      |

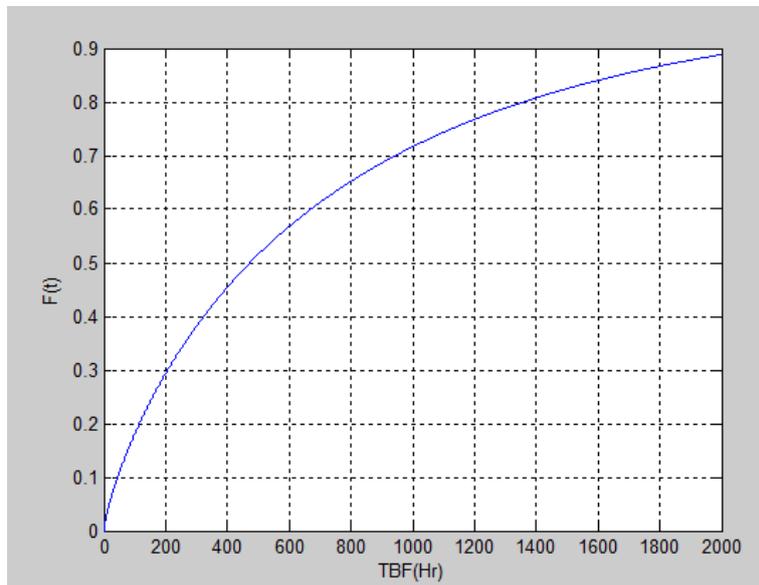


Figure 3.4. La Courbe de Fonction Répartition

Commentaire

La figure 3.4 présente l'évolution de la fonction Répartition. Cette courbe est croissant en fonction de temps, et pour  $t=MTBF$ ,  $F(MTBF)=0,66=66\%$

3.3.4.3. La fiabilité

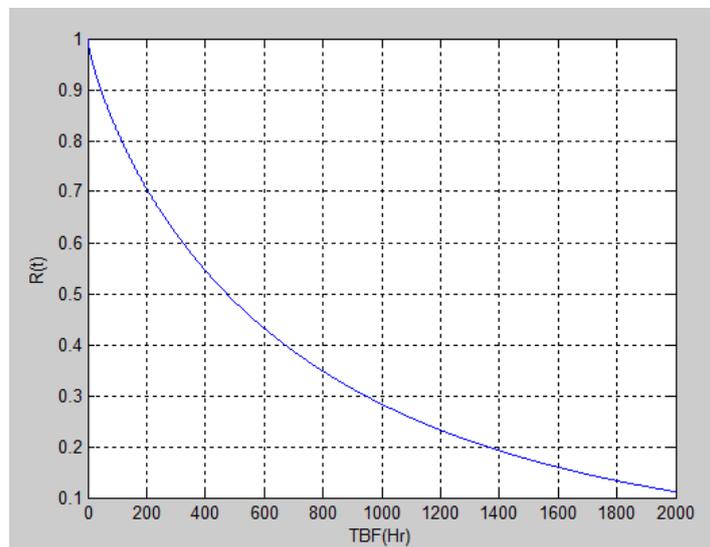
La fonction fiabilité de celle de répartition:  $R(t) = 1 - F(t)$ , après calcul la fiabilité de four aux temps  $t=MTBF$ , on déduit que la valeur n'est pas satisfaisante donc on peut dire que le four n'est pas fiable à  $t=MTBF$ .

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

$$R(t = MTBF) = 0,66$$

**Tableau 3.8:** Calcul de la fiabilité

| TBF (h)    | R(t) | TBF (h)     | R(t) | TBF (h)     | R(t) |
|------------|------|-------------|------|-------------|------|
| <b>48</b>  | 0,89 | <b>168</b>  | 0,73 | <b>1416</b> | 0,18 |
| <b>48</b>  | 0,89 | <b>168</b>  | 0,73 | <b>1416</b> | 0,18 |
| <b>96</b>  | 0,82 | <b>624</b>  | 0,42 | <b>1588</b> | 0,16 |
| <b>96</b>  | 0,82 | <b>960</b>  | 0,36 | <b>1656</b> | 0,15 |
| <b>168</b> | 0,73 | <b>1296</b> | 0,21 |             |      |



**Figure 3.5.** La Courbe de la fonction de Fiabilité

**Commentaire**

La [figure 3.5](#) présente l'évolution de la fonction de Fiabilité. Le graphe décroissant en fonction de temps ce qui fait expliquer par le phénomène de dégradation.

L'amélioration de la fiabilité de four passe obligatoirement par une analyse des défaillances avec une étude détaillée de leurs causes de leurs modes et de leurs conséquences

3.3.4.4. Le taux de défaillance

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

Tableau 3.9: les valeurs de taux de défaillance  $\lambda(t)$

| TBF (h) | $\lambda(t) \cdot 10^{-3}$ | TBF (h) | $\lambda(t) \cdot 10^{-3}$ | TBF (h) | $\lambda(t) \cdot 10^{-3}$ |
|---------|----------------------------|---------|----------------------------|---------|----------------------------|
| 48      | 1,84                       | 168     | 1,43                       | 1416    | 0,93                       |
| 48      | 1,84                       | 168     | 1,43                       | 1416    | 0,93                       |
| 96      | 1,60                       | 624     | 1,10                       | 1588    | 0,91                       |
| 96      | 1,60                       | 960     | 1,10                       | 1656    | 0,91                       |
| 168     | 1,43                       | 1296    | 0,95                       |         |                            |

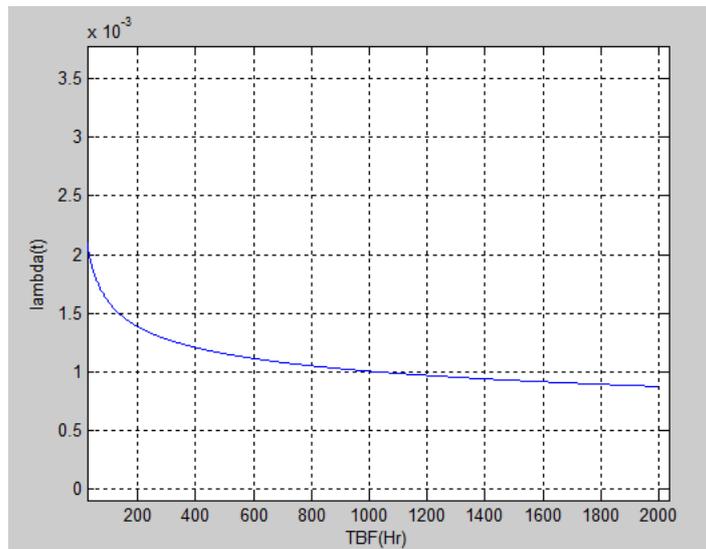


Figure 3.6. La Courbe de la fonction de taux de défaillance

Commentaire

La figure 3.6 présente l'évolution de la fonction de taux de défaillance. On remarque que la courbe de la fonction de taux de défaillance est décroissante en fonction de temps.

3.4. Calcul de la maintenabilité et la disponibilité du four à arc

**3.4.1. Calcul la maintenabilité de four**

D'après l'historique des pannes de four:

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

TR : temps de réparation.

N : nombre de panne.

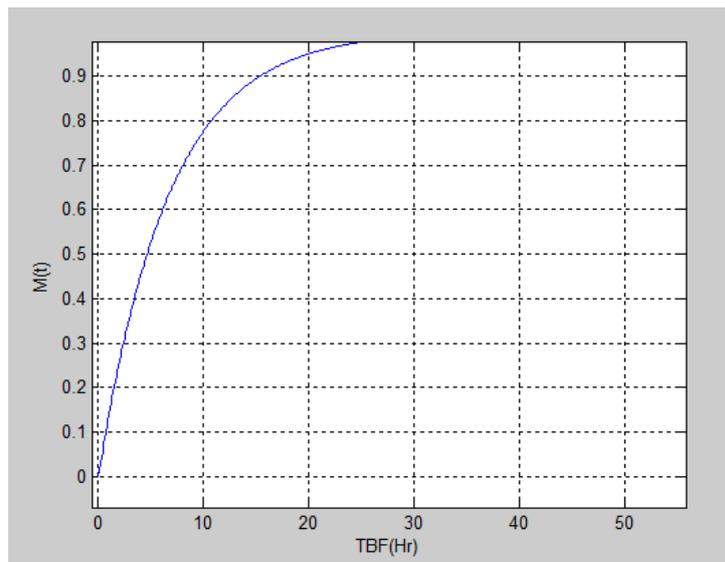
$$MTTR=90 /14 = 6,42 \text{ h.}$$

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

Avec  $\mu = 1/MTTR = 1/6,42 = 0,15$  intervention / heure.

**Tableau 3.10:**les valeurs de la maintenabilité du four.

|      |        |        |        |        |        |        |        |        |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| T(h) | 10     | 20     | 30     | 40     | 50     | 60     | 70     | 80     |
| M(t) | 0,7768 | 0,9502 | 0,9888 | 0,9975 | 0,9994 | 0,9998 | 0,9999 | 0,9999 |



**Figure 3.7.** La courbe de la maintenabilité

**Commentaire**

La figure 3.7 présente l'évolution de la fonction de maintenabilité. D'après cette figure on remarque que la Maintenabilité est croissant en fonction de temps à l'instant T=80 heures, la maintenable 99,99%.

**3.4.2. Calcul la disponibilité du four**

**Disponibilité intrinsèque au asymptotique**

$$D_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{679,8}{679,8 + 6,42} = 0,9906$$

**Disponibilité instantané**

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

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{679,8} = 0,0014$$

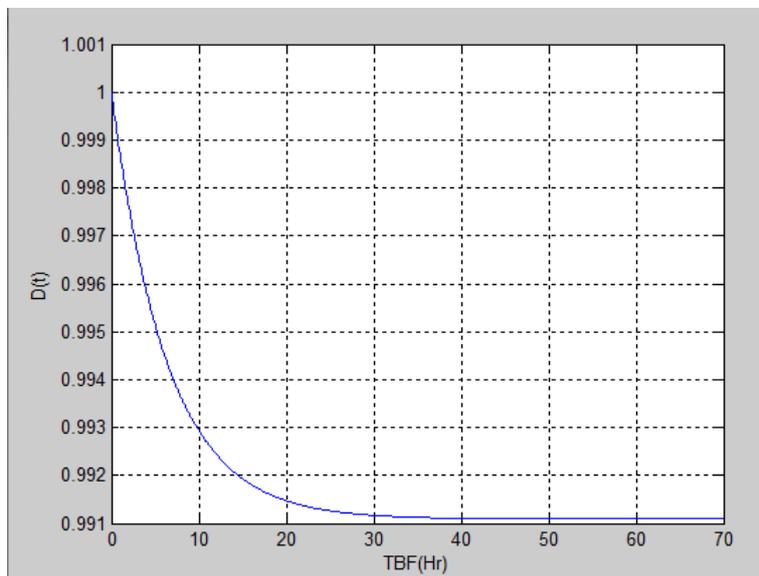
$$MTTR = \frac{1}{\mu} \Rightarrow \mu = \frac{1}{MTTR} = \frac{1}{6,42} = 0,1557$$

$$\mu + \lambda = 0,1557 + 0,0014 = 0,1571$$

$$D(t) = \frac{0,1557}{0,1571} + \frac{0,0014}{0,1571} e^{-(0,1571)t}$$

**Tableau 3.11:** les valeurs de la disponibilité instantané

|              |        |        |        |        |        |        |        |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>T (h)</b> | 10     | 20     | 30     | 40     | 50     | 60     | 70     |
| <b>D (h)</b> | 0,9929 | 0,9914 | 0,9911 | 0,9911 | 0,9910 | 0,9910 | 0,9910 |



**Figure 3.8.** La courbe de disponibilité

**Commentaire**

La [figure 3.8](#) présente l'évolution de la fonction de disponibilité. La courbe est décroissante en fonction de temps, pour augmenter la disponibilité d'un four consiste à diminuer le nombre de ses arrêts (augmenté sa fiabilité) et réduire le temps nécessaire pour résoudre les causes de ceux-ci (augmenté sa maintenabilité).

### Conclusion

L'étude de cas ayant porté sur la mise en œuvre du concept de la FMD appliquée à un four arc électrique, il a été question d'évaluer sa fiabilité opérationnelle à travers son aspect statistique en exploitant les données du fichier historique fourni par l'entreprise, en suite de prédire sa fiabilité prévisionnelle à travers son aspect probabiliste pour dégager l'expression du taux de défaillance, la fonction fiabilité et la fonction de défaillance en utilisant la loi de Weibull.

## CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce mémoire, qui finalise nos études en master, notre mémoire nous sommes penchés sur une entreprise mécanique en ALFET (algérienne des fonderies de Tiaret) pour l'étude de la machine (four à arc 5t).

Dans notre étude et à travers l'aspect statistique nous avons approché la fiabilité opérationnelle et à travers son aspect probabiliste nous avons approché la fiabilité prévisionnelle pour exprimer les fonctions fiabilité, défaillance et taux de défaillance par l'exploitation de la loi de Weibull.

Dans ce mémoire nous avons présenté une validation expérimentale des indicateurs FMD en maintenance d'un four à arc 5t. La problématique relative à la prise en compte de la fiabilité de la maintenabilité et de la disponibilité de l'équipement étudiée. Au cours de notre étude nous avons constaté que l'amélioration de la Fiabilité- Maintenabilité- Disponibilité de four à arc joue un grand rôle dans la baisse régulière des dépenses internes et externes de maintenance ramenées au chiffre d'affaires de l'entreprise.

On a obtenu comme résultats :

le taux de défaillance est croissant et la disponibilité est décroissant avec le temps.

Nous avons dégagé comme recommandations ce qui suit:

- Augmentation de la disponibilité des systèmes (diminuer le nombre de ses arrêts) et augmenté sa maintenabilité.
- Maîtrise de la durée de vie des équipements.
- Optimisation des interventions pendant les arrêts programmés.
- Meilleure surveillance des systèmes (création des tâches de surveillance).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] :Sûreté de fonctionnement <https://fr.wikipedia.org>.-visité le 29 mars 2017.
- [2] <http://www.umc.edu.dz> /fiabilité maintenabilité disponibilité-visité le 04.04.2017.
- [3] Cours bts : fiabilité - Free -<http://mathematiques.daval.free.fr>-visité le 29.03.2017
- [4] Cours de Fiabilité by Stéphane Jaubert- <https://issuu.com/sjaubert/docs/fiabilite-ing>.
- [5] W. BENZAOUI Cours -Sûreté de Fonctionnement Master Académique. Automatique – S3Université Kasdi Merbah-Ouargla 2014/2015.
- [6] Jean héng, dunod pratique de la maintenance préventive (mécanique, pneumatique, hydraulique, électricité, froid) l'usine nouvelle série / gestion industrielle - , Paris ,2002 ISBN 2 10 006565 0
- [7] La Sûreté de Fonctionnement (SdF) - Eduscol -<http://eduscol.education.fr>.Visité le 08.05.2017.
- [8][http://lpmei.com/cd\\_bac\\_mei/eleve/cours/gestion%20de%20maintenance/521%20analyse%20de%20defaillances.pdf](http://lpmei.com/cd_bac_mei/eleve/cours/gestion%20de%20maintenance/521%20analyse%20de%20defaillances.pdf) visité le 15 mai 2017.
- [9] Pr. Ahmed BELLAOUAR M.A. Salima BELEULM mémoire -Fiabilité Maintenabilité Disponibilité-UNIVERSITE Constantine 1-2013-2014.
- [10] Rémi LARONDE -THESE DE DOCTORAT-Fiabilité et durabilité d'un système complexe dédié aux énergies renouvelables -30 septembre 2011.
- [11] Zerrifi Sofiane et Yousfi Abdelkader- Estimation de la fiabilité d'une unité de production d'énergie électrique du complexe GL1/Z selon le modèle de Weibull -Université d'Oran-2013.
- [12] cours Fiabilité©\_PDF - scribd.com.visité le 03mai 2017.
- [13]Cours Organisation Industrielle BTS ATI 2 S115-Organisation et suivi de la maintenance – CH2.
- [14] KADI Mohammed / GANA Djamel Eddine-étude et amélioration FMD d'une motopompe centrifuge- Université Kasdi Merbah – Ouargla-2013.2014.
- [15] Jean-François BOURGEOIS, Fours électriques à résistances - Présentation générale, technique de l'ingénieur, Février 2005.
- [16] [www.bag.admin.ch](http://www.bag.admin.ch), Four à micro-ondes, visité le 03 Juillet 2014 à 13h58.
- [17] [www.inductionenfonderie.centerblog.net](http://www.inductionenfonderie.centerblog.net), Les fours à induction en fonderie, visité le 03 juillet 2014 à 11h00.
- [18] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Four\\_à\\_arc\\_électrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Four_à_arc_électrique).visité le 09 avril 2017 à 17h00.
- [19] DJEGHADER Yacine-THESE-Étude de la propagation et caractéristiques des harmoniques stochastiques générées par un four à arc-UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA.2010.
- [20] M. Gérard Hermal-Projet de fin d'études : Étude technico-économique de la valorisation des fumées de fours à arc électrique avant filtration- 7août 2010.

[21] Dossier technique de four à arc 5t-ALFET-Tiaret.

[22] [www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/...fours.../fours-industriels-be8842](http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/...fours.../fours-industriels-be8842). visité le 06 mai 2017 à 14h00.

[23] Yassine Bounjem- mémoire de projet de fin d'études -Classification des équipements critiques et élaboration d'un plan de maintenance préventive du four à arcs électriques- université sidi mohamed ben abdellah- 06/2010.

# ANNEXES

## ANNEXE 01

Programme de charge de four à arc 5t

Année 2016

| Mois      | TBF         | Temps d'arrêt | Nombre de pannes | Temps de D'intervention |
|-----------|-------------|---------------|------------------|-------------------------|
| Janvier   | 336         | 24            | 1                |                         |
| Février   | 336         | 24            | 1                | 08                      |
| Mars      | 312         | 48            | 1                | 30                      |
| Avril     | 360         | -             | -                | -                       |
| Mai       | 340         | 20            | 5                | 10                      |
| Juin      | 360         | -             | -                | -                       |
| Juillet   | 312         | 48            | 2                | 06                      |
| Aout      | 360         | -             | -                | -                       |
| Septembre | 360         | -             | -                | -                       |
| Octobre   | 336         | 24            | 1                | 04                      |
| Novembre  | 360         | -             | -                | -                       |
| Décembre  | 336         | 24            | 1                | 02                      |
| Somme     | <b>4108</b> | <b>288</b>    | 12               | <b>60</b>               |

## ANNEXE 02

Distribution de Weibull : valeurs des coefficients A et B en fonction du paramètre de forme.

| $\beta$ | A       | B     | $\beta$ | A      | B     | $\beta$ | A      | B     |
|---------|---------|-------|---------|--------|-------|---------|--------|-------|
| 0,2     | 120     | 1 901 | 1,5     | 0,9027 | 0,613 | 4       | 0,9064 | 0,254 |
| 0,25    | 24      | 199   | 1,55    | 0,8994 | 0,593 | 4,1     | 0,9077 | 0,249 |
| 0,3     | 9,2625  | 50,08 | 1,6     | 0,8966 | 0,574 | 4,2     | 0,9086 | 0,244 |
| 0,35    | 5,291   | 19,98 | 1,65    | 0,8942 | 0,556 | 4,3     | 0,9102 | 0,239 |
| 0,4     | 3,3234  | 10,44 | 1,7     | 0,8922 | 0,54  | 4,4     | 0,9146 | 0,235 |
| 0,45    | 2,4686  | 6,46  | 1,75    | 0,8906 | 0,525 | 4,5     | 0,9125 | 0,23  |
| 0,5     | 2       | 4,47  | 1,8     | 0,8893 | 0,511 | 4,6     | 0,9137 | 0,226 |
| 0,55    | 1,7024  | 3,35  | 1,85    | 0,8882 | 0,498 | 4,7     | 0,9149 | 0,222 |
| 0,6     | 1,546   | 2,65  | 1,9     | 0,8874 | 0,486 | 4,8     | 0,916  | 0,218 |
| 0,65    | 1,3663  | 2,18  | 1,95    | 0,8867 | 0,474 | 4,9     | 0,9171 | 0,214 |
| 0,7     | 1,2638  | 1,85  | 2       | 0,8862 | 0,463 | 5       | 0,9162 | 0,21  |
| 0,75    | 1,1906  | 1,61  | 2,1     | 0,8857 | 0,443 | 5,1     | 0,9192 | 0,207 |
| 0,8     | 1,133   | 1,43  | 2,2     | 0,8856 | 0,425 | 5,2     | 0,9202 | 0,203 |
| 0,85    | 1,088   | 1,29  | 2,3     | 0,8859 | 0,409 | 5,3     | 0,9213 | 0,2   |
| 0,9     | 1,0522  | 1,17  | 2,4     | 0,8865 | 0,393 | 5,4     | 0,9222 | 0,197 |
| 0,95    | 1,0234  | 1,08  | 2,5     | 0,8873 | 0,38  | 5,5     | 0,9232 | 0,194 |
| 1       | 1       | 1     | 2,6     | 0,8882 | 0,367 | 5,6     | 0,9241 | 0,191 |
| 1,05    | 0,9803  | 0,934 | 2,7     | 0,8893 | 0,355 | 5,7     | 0,9251 | 0,186 |
| 1,1     | 0,9649  | 0,878 | 2,8     | 0,8905 | 0,344 | 5,8     | 0,926  | 0,165 |
| 1,15    | 0,9517  | 0,83  | 2,9     | 0,8919 | 0,334 | 5,9     | 0,9269 | 0,183 |
| 1,2     | 0,9407  | 0,787 | 3       | 0,893  | 0,316 | 6       | 0,9277 | 0,18  |
| 1,25    | 0,99314 | 0,75  | 3,1     | 0,8943 | 0,325 | 6,1     | 0,9266 | 0,177 |
| 1,3     | 0,9236  | 0,716 | 3,2     | 0,8957 | 0,307 | 6,2     | 0,9294 | 0,175 |
| 1,35    | 0,917   | 0,667 | 3,3     | 0,897  | 0,299 | 6,3     | 0,9302 | 0,172 |
| 1,4     | 0,9114  | 0,66  | 3,4     | 0,8984 | 0,292 | 6,4     | 0,931  | 0,17  |

## ANNEXE 03

Tableau de loi Kolmogorov-Smirnov.

| N   | Niveau significatif     |                         |                          |                         |                         |
|-----|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
|     | 0,2                     | 0,15                    | 0,1                      | 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                    | 0,521                   | 0,618                   |
| 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  | 0,252                   | 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  | 0,210                   | 0,220                   | 0,240                    | 0,270                   | 0,320                   |
| 30  | 0,190                   | 0,200                   | 0,220                    | 0,240                   | 0,290                   |
| 35  | 0,180                   | 0,190                   | 0,210                    | 0,230                   | 0,270                   |
| >35 | $\frac{1,07}{\sqrt{N}}$ | $\frac{1,22}{\sqrt{N}}$ | $\frac{0,188}{\sqrt{N}}$ | $\frac{1,36}{\sqrt{N}}$ | $\frac{1,63}{\sqrt{N}}$ |

## Résumé

Le four à arc est un système électrothermique utilisant l'énergie fournie par un arc électrique pour chauffer une charge. Les fours à arc sont utilisés presque exclusivement pour la fabrication d'acier à partir de ferraille de récupération. Le but de notre travail est l'étude et évaluation des concepts de la fiabilité, maintenabilité et disponibilité sur un four à arc électrique.

**Mots clés :** Four à arc électrique, fiabilité, disponibilité, maintenabilité.

## Abstract

The arc furnace is an electro thermal system using the energy provided by an electric arc to heat a load. Arc furnaces are used almost exclusively for the manufacture of steel from scrap metal. The aim of our work is the study and evaluation of the concepts of reliability, maintainability and availability on an electric arc furnace.

**Keywords:** Electric arc furnace, reliability, availability, maintainability.

## المخلص

فرن القوس الكهربائي هو نظام الكترول حراري يعمل على استخدام الطاقة التي يوفرها القوس الكهربائي لتسخين الحمولة. افران القوس الكهربائي تستخدم بشكل تقريبي في صناعة الحديد الصلب من الخردة او الحديد. والهدف من عملنا هو دراسة و تقييم الموثوقية، والصيانة وتوافر فرن القوس الكهربائي. **كلمات البحث** فرن القوس الكهربائي والموثوقية، التوافر والصيانة .