

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret  
Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Mécanique



## PROJET DE FIN DE CYCLE MASTER

**Domaine :** Sciences et Technologie

**Filière :** Electromécanique

**Parcours :** Master

**Spécialité :** Maintenance Industrielle

### Thème

Analyse FMD d'un four a induction

Préparé par :

MAARADJI Farouk Abd eldjilil & HOUARI Nadhir

Soutenu publiquement le : .. / 07 / 2022, devant le jury composé de :

M. KARAS Abdelkader	Professeur (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. BOUREGUIG Kada	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
Mm. ASRI Aicha	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M <sup>elle</sup> SLIMANI Halima	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadrant

Année universitaire : 2021 - 2022

# Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier **ALLAH** le toutpuissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*On voudra dans un premier temps remercier, notre directeur de mémoire Dr. **SLIMANI HALIMA** pour sa disponibilité, ses orientations, ses précieux conseils le long de cette période de préparation de ce mémoire.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils nous ont porté, en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs remarques pertinentes.*

*Nous désirons aussi remercier tous les enseignants du département de **Génie Mécanique** de l'université*

***Ibn Khaldoun de Tiaret**, qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite.*

*Enfin, nous tenons à remercier toute personne qui a participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# Dédicaces

## *A mes très chers parents*

*Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je vous porte, ni la profonde gratitude que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être.*

*C'est travers vos encouragements que j'ai opté pour cette profession, t'est travers vos critiques que je me suis réalisé. J'espère avoir répondu aux espoirs que vous avez fondés en moi.*

*Je vous rends hommage par ce modeste travail en guise de ma reconnaissance éternelle et de mon infini amour.*

*Qu'Allah tout puissant vous garde et vous procure santé, bonheur et longue vie pour que vous demeuriez le flambeau illuminant.*

*A mes chers frères et ma très chère sœur.*

*Aucun mot ne pourra décrire vos dévouements et vos sacrifices.*

*Mes charmantes tantes et cousins. A toute ma famille*

*A tous mes amis, En témoignage de l'amitié sincère qui nous a liées et des bons moments qu'on a passés ensemble.*

*Je vous dédie ce travail en vous souhaitant un avenir radieux et plein de bonnes promesses.*

*A tous les gens qui ont cru en moi et qui me donnent l'envie d'aller en avant,*

*je vous remercie tous, votre soutien et vos encouragements me donnent*

*la force de continuer.*

# *Dédicaces*

*Ce travail est dédié à mon père Houari Allal décédé trop tôt, Qui m'a toujours  
poussé et motivé dans mes études.*

*J'espère que, du monde qui est sien maintenant,*

*Il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'un fils qui a  
toujours prié pour le salut de son âme.*

*Tu été toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne  
méticuleuse,*

*Je tiens à honorer l'homme que tu été.*

*Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que tu as déployés pour mon éducation  
et ma formation Puisse Dieu,*

*Le tout puissant et Miséricordieux accorder au défunt Sa Sainte Miséricorde et  
l'accueillir en Son Vaste Paradis.*

# SOMMAIRE

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....02

## Chapitre I : Notions générales sur la maintenance

I.1. Introduction.....	5
I.2 Définition et le rôle de la maintenance .....	5
I.2.1Définition de la maintenance.....	5
I.2.2Le rôle de la maintenance.....	6
I.3.Evolution de la maintenance.....	6
I.4.Objectif de la maintenance.....	8
I.5. Choix de méthode de maintenance.....	9
I.6.Les types de maintenance .....	10
1.6.1 La maintenance corrective.....	11
I.6.2.Maintenance préventive .....	12
I.7.Autres types de maintenance .....	14
I.8.Opération de la maintenance.....	14
I.9.Les niveaux de la maintenance .....	16
I.10.Conclusion : .....	18

## Chapitre II : Four à induction

I.1 Introduction.....	20
II.2 Définition de four .....	20
II.3 Principe de fonctionnement des fours .....	20
II.4 Classification des fours industriels .....	21
II.5 Différents types des fours industriels .....	23

II.5.1 Fours rotatifs .....	23
II.5.2 Fours pour CRUCIBLES .....	23
II.5.3 Fours Réverbérant .....	24
II.5.4 Four électrique .....	24
II.6 Différents types de fours électrique.....	25
II.6.1 Fours à arc électrique :.....	25
II.6.2 Fours à résistance électrique .....	26
II.6.3 Four à induction .....	26
II.7 Principe de fonctionnement d'un four à induction.....	27
II.8 Types de four à induction .....	28
II.8.1 Fours à creuset .....	28
II.8.2 Four à canal.....	28
II.9 Applications des fours à induction : .....	29
II.10 Avantages et inconvénients des fours à induction.....	29
II.11 Conclusion.....	31

## **Chapitre III : Analyse FMD du four à induction**

III.1 Introduction .....	33
III.2 Analyse FMD .....	33
III.2.1 Le but de l'analyse FMDS.....	33
III.2.2 La Fiabilité.....	33
III.2.3 Maintenabilité.....	37
III.2.4 Disponibilité .....	37
III.3 Analyse de PARETO .....	38
III.4 Présentation d'historique des pannes du four à <i>induction</i> .....	40
III.5 Méthode d'analyse de Pareto .....	41
III.5.1 Cumul des causes d'arrêt .....	41
III.5.2 Diagramme de Pareto (ou méthode ABC).....	41

III.6 L'analyse FMD .....	45
III.6.1 Fiabilité opérationnelle .....	45
III.6.2 Fiabilité prévisionnelle .....	46
III.6.2.1 Calcule les paramètres de weibull.....	46
III.6.2.2 Exploitation des paramètres de WEIBULL .....	48
III.6.2.3 Etude de modèle de weibull .....	49
III.6.3 La maintenabilité : .....	55
III.6.4 La disponibilité .....	55
III.7 Conclusion.....	57
Conclusion générale.....	59
Références bibliographiques.....	61
Annexes.....	65

## Liste des abréviations

**AFNOR** : Association de normalisation française

**SDF** : La Sûreté de fonctionnement

**FMD** : Fiabilité, Maintenabilité et Disponibilité

**FMDS** : Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité et Sécurité

**f(t)** : Densité de probabilité

**F(t)** : La fonction de répartition

**R(t)** : La fonction de fiabilité

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

**MTBF** : Moyenne des temps de bon fonctionnement

**$\gamma$**  : Paramètre de position

**$\eta$**  : Paramètre d'échelle

**$\beta$**  : Paramètre de forme

**M(t)** : La fonction de la maintenabilité

**MTTR** : Temps moyen jusqu'à l'échec

**$\mu(t)$**  : La durée moyenne jusqu'à la réparation d'une entité réparable

**g(t)** : Taux de réparation

**D(t)** : La fonction de la disponibilité instantanée

**M(t)** : La fonction de la maintenabilité

# Liste des figures

## Chapitre I

<b>Figure I.1 :</b> Evolution de la maintenance depuis 1940.....	07
<b>Figure I.2 :</b> Contenu de la fonction maintenance .....	08
<b>Figure.I.3 :</b> Démarche suivi pour le choix d'un type de maintenance.....	10
<b>Figure I.4:</b> Classification des types de la maintenance .....	11

## Chapitre II

<b>Figure II.1 :</b> Four réverbérant.....	24
<b>Figure II.2 :</b> Four à arc électrique .....	25
<b>Figure II.3 :</b> Fours électriques à résistances .....	26
<b>Figure II.4 :</b> Four à induction.....	27
<b>Figure II.5 :</b> Isolation de bobine de four à induction .....	27
<b>Figure II.6 :</b> Fonderie a la chauffe par induction.....	28
<b>Figure II.7.</b> Chauffage par induction.....	28
<b>Figure II.8 :</b> Fours à creuset .....	29
<b>Figure II.9 :</b> Corps d'un four à creuset.....	29
<b>Figure II.10:</b> Schéma d'un four à canal.....	29

## Chapitre III

<b>Figure III-1 :</b> Représentation sur graphique à échelle fonctionnelle de la distribution de Weibull (graphique d'Allan Plait).....	36
<b>Figure III.2 :</b> Diagramme de Pareto ou courbe ABC .....	40
<b>Figure III-3 :</b> Diagramme de Pareto (ou méthode ABC) .....	43
<b>Figure III.4 :</b> présente l'évolution de la fonction de taux de défaillance $\lambda(t)$ .....	45
<b>Figure III.5 :</b> La représentation graphique de la fonction de répartition sur le papier de Weibull .....	47
<b>Figure III.6:</b> La Courbe de La fonction de la densité de probabilité.....	50
<b>Figure III.7:</b> La Courbe de Fonction Répartition .....	51
<b>Figure III.8:</b> La Courbe de la fonction de Fiabilité .....	52
<b>Figure III.9 :</b> courbe du taux de défaillance $\lambda(t)$ .....	53

<b>Figure III.10:</b> courbe de la maintenabilité $M(t)$ .....	55
<b>Figure III.11 :</b> courbe de la disponibilité instantanée $D(t)$ .....	56

# Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Les niveaux de la maintenance .....	17
<b>Tableau II.1</b> : les avantages et les inconvénients d'un four à induction .....	31
<b>Tableau III.1</b> : Dossier historique du Four à induction (donné à ALFET) .....	41
<b>Tableau III.2</b> : Cumul causes d'arrêt du four à induction .....	42
<b>Tableau III.1</b> : les valeurs de $F(t)$ , $R(t)$ et $\lambda(t)$ .....	45
<b>Tableau III.2</b> : les valeurs de $F(t)$ en % .....	47
<b>Tableau III.5</b> : Paramètres de calcul de la fiabilité .....	48
<b>Tableau III.6</b> : Calcul de la fonction de la densité de probabilité .....	50
<b>Tableau III.7</b> : les valeurs de $F(t)$ .....	51
<b>Tableau III.8</b> : Calcul de la fiabilité .....	52
<b>Tableau III.9</b> : Calcul du taux de défaillance .....	53
<b>Tableau III.10</b> : les valeurs de la maintenabilité du four .....	54
<b>Tableau III.11</b> : les valeurs de la disponibilité instantane .....	56

# Introduction générale

## ***INTRODUCTION GENERALE***

Le présent mémoire s'inscrit dans le cadre de notre projet de fin d'études pour l'obtention de diplôme de master en maintenance industrielle, sous le thème : « **Analyse FMD d'un four à induction** ». Il s'intègre dans un contexte technologique, en relation avec le secteur de l'industrie mécanique et particulièrement celui de l'industrie de fonderie.

La complexité des mécanismes de dégradation des équipements a fait en sorte que la durée de vie de ces derniers a toujours été traitée comme une variable aléatoire. Cet état de fait a incité plusieurs entreprises à adopter des approches plutôt réactives, n'étant pas en mesure de justifier économiquement les avantages que peut procurer la mise en place d'une maintenance préventive.

L'absence de données fiables et d'outils efficaces de traitement de ces données a réduit la fonction maintenance à des tâches de dépannage, et par le fait même, à une fonction dont les coûts ne cessent d'augmenter et dont la contribution à la performance de l'entreprise n'est pas évidente.

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

Le but de ce travail est d'étudier la maintenance d'un four à induction et de calculer ses indicateurs de fiabilité pour améliorer la disponibilité d'un four à induction.

Pour mieux arborer notre travail, ce manuscrit est structuré sous forme de trois chapitres :

Dans le premier chapitre on a présenté une mise en valeur de la maintenance comme impérative nécessaire à une meilleure garantie de la disponibilité des équipements toujours en faveur d'un meilleur rendement de la production et de l'économie. Quelques définitions concernant la maintenance, d'une manière générale un chapitre coutumiers dans la spécialité.

Le contexte du second chapitre est consacré pour une présentation générale des fours électrique plus particulièrement les fours à induction leur définition, sont principe de fonctionnement, ainsi que leur différente classification.

Enfin, le troisième et dernier chapitre, est considéré comme la pièce maitresse de ce travail. Il est entièrement consacré à une Analyse FMD du four à induction expose l'application pratique de FMD sur l'équipement de Production étudiée (four à induction). Et bien-sûr on clôture ce manuscrit par une conclusion qui donne un aperçu global de tout le travail et des recommandations pour l'avancement de ce projet.

## *Chapitre I :*

### *Notions générales sur la maintenance*

## ***Chapitre I : Notions générales sur la maintenance.***

### **I.1 Introduction**

La fonction maintenance a pour but d'assurer la disponibilité optimale des installations de production et de leurs annexes ; en impliquant un minimum économique de temps d'arrêt. Jugée pendant longtemps comme une fonction secondaire entraînant une perte d'argent inévitable, la fonction maintenance est en général, assimilée à la fonction dépannage et réparation d'équipements soumis à usage et vieillissement. La véritable portée de la fonction de la maintenance mène beaucoup plus loin : elle doit être une recherche incessante de compromis entre la technique et l'économique. Il reste alors, beaucoup à faire pour que sa fonction productive soit pleinement comprise. Une organisation, une planification et des mesures méthodiques sont nécessaires pour gérer les activités de la maintenance.

### **I.2 Définition et le rôle de la maintenance**

#### **I.2.1 Définition de la maintenance**

La première définition de la maintenance industrielle a été donnée par l'AFNOR en 1994 (Norme NFX 60- e.010), à savoir « l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ». En 2001, elle a été remplacée par une nouvelle définition européenne (NF EN 13306 X 60-319) : « Ensemble de toutes les actions techniques administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ».

La définition de la maintenance fait donc apparaître 4 notions : [1]

- Maintenir qui suppose un suivi et une surveillance (maintenance préventive).
- Rétablir qui sous-entend l'idée d'une correction de défaut (maintenance corrective).
- État spécifié et service déterminé qui précise le niveau de compétences et les objectifs attendus de la maintenance.
- Coût optimal qui conditionne l'ensemble des opérations dans un souci d'efficacité économique.

## **I.2.2 Le rôle de la maintenance**

Selon A. Ahmed [1] la politique de maintenance définie par la direction de l'entreprise doit être mise en œuvre par le service maintenance. Cette politique devant permettre d'atteindre le rendement maximal des systèmes de production. Cependant, d'un point de vue maintenance, tous équipements n'ont pas le même degré d'importance. Le service devra donc, dans le cadre de la politique globale, définir les stratégies les mieux adaptées aux diverses situations.

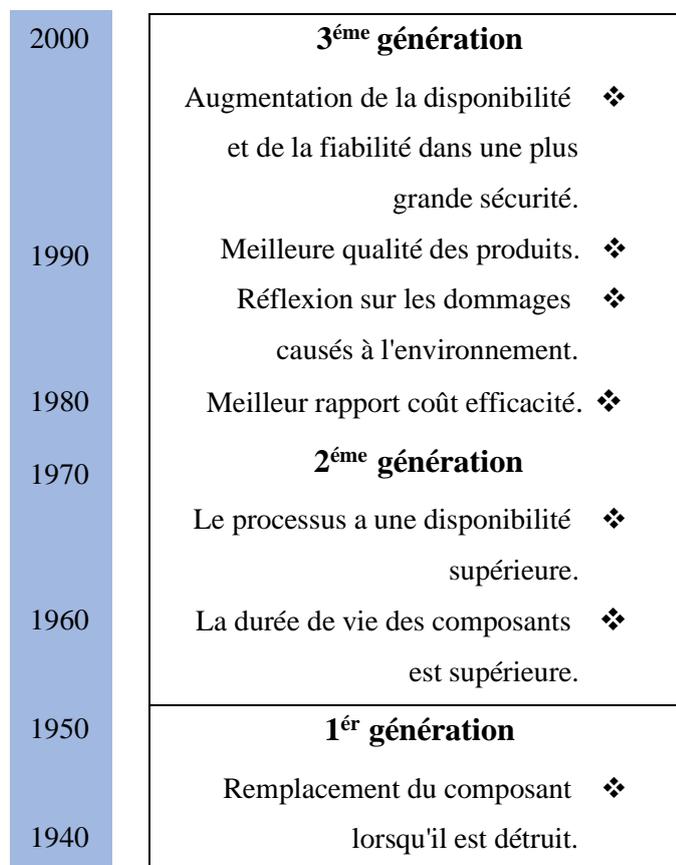
La fonction maintenance sera alors amenée à établir des prévisions ciblées [2] :

- Prévisions à long terme : elles concernent les investissements lourds ou les travaux durables. Ce sont des prévisions qui sont le plus souvent dictées par la politique globale de l'entreprise.
- Prévisions à moyen terme : la maintenance doit se faire la plus discrète possible dans le planning de charge de la production. Il lui est donc nécessaire d'anticiper, autant que faire se peut, ses interventions en fonction des programmes de production. La production doit elle aussi prendre en compte les impératifs de suivi des matériels.
- Prévisions à courts termes : elles peuvent être de l'ordre de la semaine, de la journée, voire de quelques heures.

## **1.3 Evolution de la maintenance**

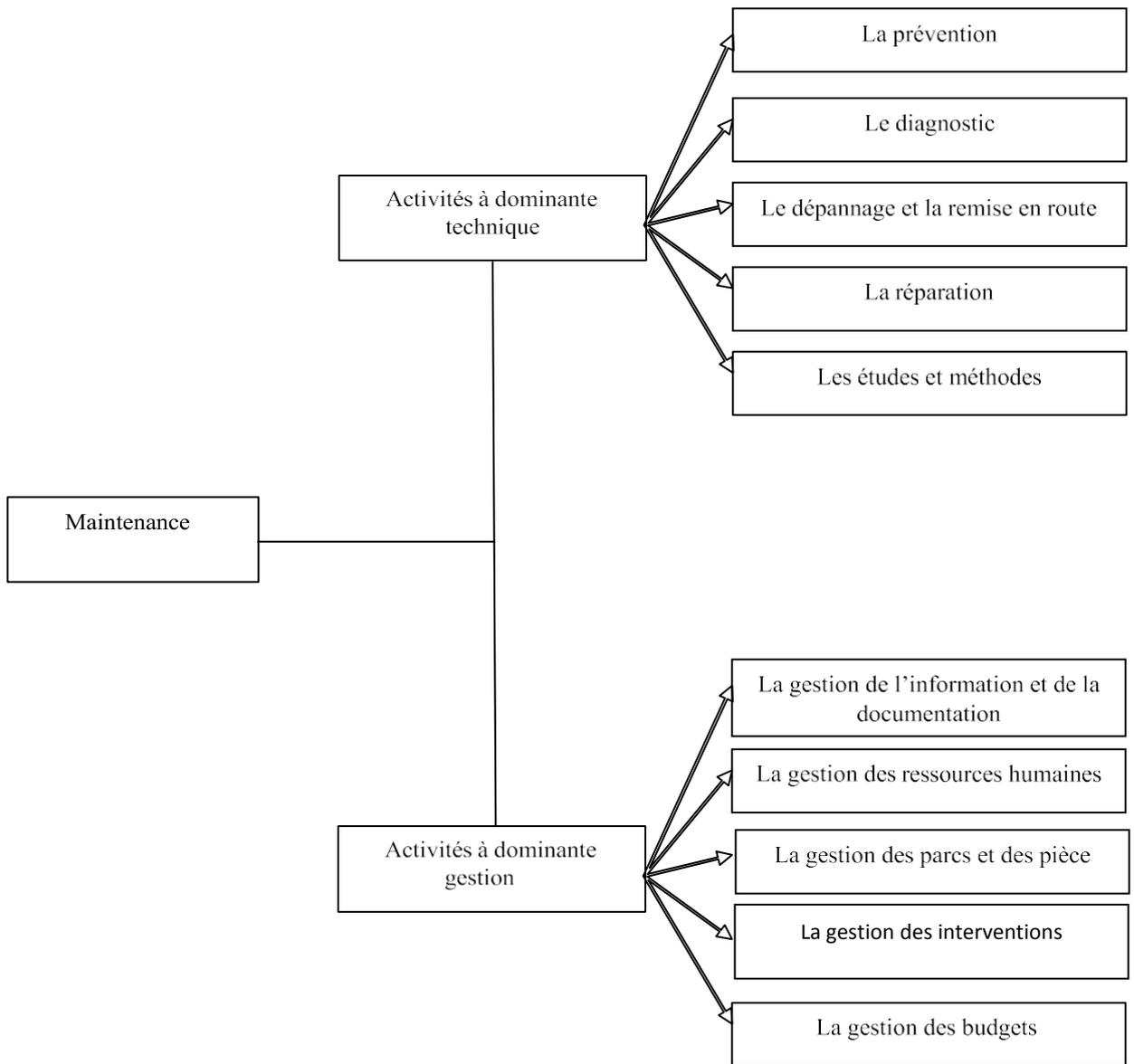
D'après Moubray dans [2] depuis les années 1940, l'évolution de la maintenance peut être tracée à travers trois générations, comme il est montré sur la (figure I.1). La troisième génération commence au milieu industriel dès les années 70, le processus de changement dans l'industrie rassemble encore plus de dynamiques et de remises en causes. Ces changements peuvent être classés sous les rubriques :

- Nouvelles attentes ;
- Nouvelles recherches ;
- Nouvelles techniques [3] ;



**Figure I.1 :** Evolution de la maintenance depuis 1940

(Retour et al) dans [4] présentent la fonction maintenance comme un ensemble d'activités regroupées en deux sous-ensembles : les activités à dominantes technique et les activités à dominante gestion, comme il est montré sur la (**figure I.2**)



**Figure I.2 :** Contenu de la fonction maintenance

### I.4 Objectif de la maintenance

L'objectif des équipes de maintenance est de maintenir les installations de production en parfait état et d'assurer le rendement global maximum tout en optimisant le coût. L'obtention du meilleur rendement passe par la prévention des pannes, le respect des cadences de production et l'amélioration continue de la qualité des produits. Maintenir, ce n'est plus subir les pannes mais maîtriser les défaillances par l'optimisation de la politique de maintenance, par une bonne prévention, par des réparations rapides et efficaces, enfin par l'amélioration du matériel. [5] Pour assurer correctement

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

- Les objectifs financiers ;
- Les objectifs opérationnels ;

#### **Les objectifs financiers :**

- Minimiser les dépenses de maintenance ;
- Assurer la maintenance dans les limites d'un budget ;
- Avoir des dépenses de maintenance portant sur le service exigé par l'installation en fonction de leur âge et de leur taux d'utilisation ;
- Tolérer à la discrétion du responsable de la maintenance une certaine quantité de dépense imprévue ;
- Augmenter au maximum les profits ;

#### **Les objectifs opérationnels :**

- Maintenir le bien durable :
  1. Dans un état acceptable ;
  2. Dans des meilleures conditions ;
- Assure la disponibilité maximale à un coût raisonnable ;
- Eliminer les pannes à tout moment et au meilleur coût ;
- Maximiser la durée de vie de bien ;
- Remplacer le bien à des périodes prédéterminées ;
- Assurer au bien des performances de haute qualité ;
- Assurer au bien un fonctionnement sûr et efficace ;
- Obtenir de l'investissement un rendement maximum ;
- Garder au bien une présentation suffisamment satisfaisante ;
- Maintenir le bien dans un état de propreté absolue ;

### **1.5. Choix de méthode de maintenance**

Le choix entre les méthodes de maintenance s'effectue dans le cadre de la politique de la maintenance et doit s'opérer en accord avec la direction de l'entreprise. Pour choisir, il faut donc être informé des objectifs de la direction, des directions politiques de maintenance, mais il faut connaître le fonctionnement et les caractéristiques des matériels, le comportement du matériel en exploitation, les conditions d'application de chaque méthode, les coûts de maintenance et les coûts de perte de

production. L'organigramme suivant représente la démarche suivie pour le choix d'un type de maintenance.

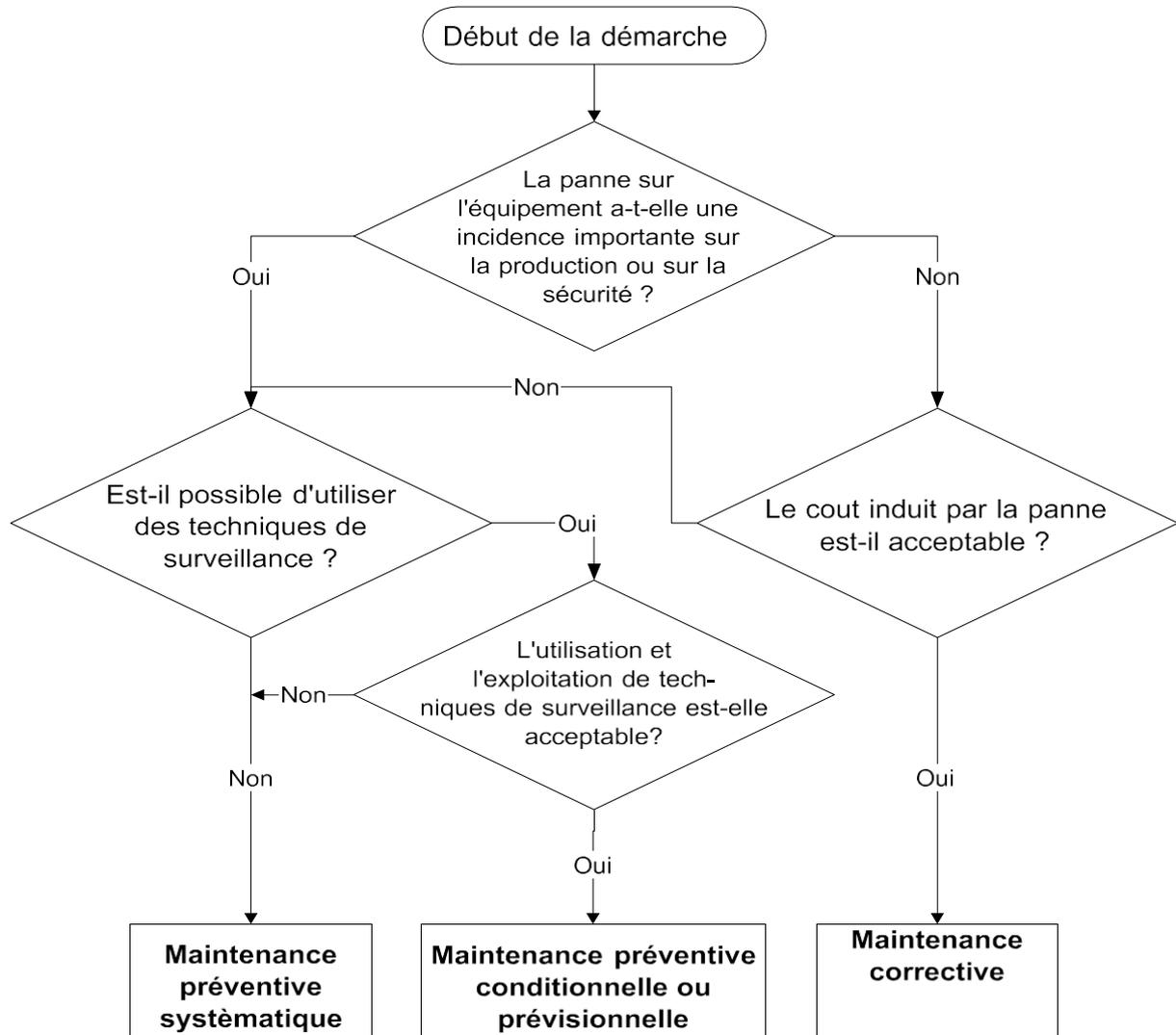
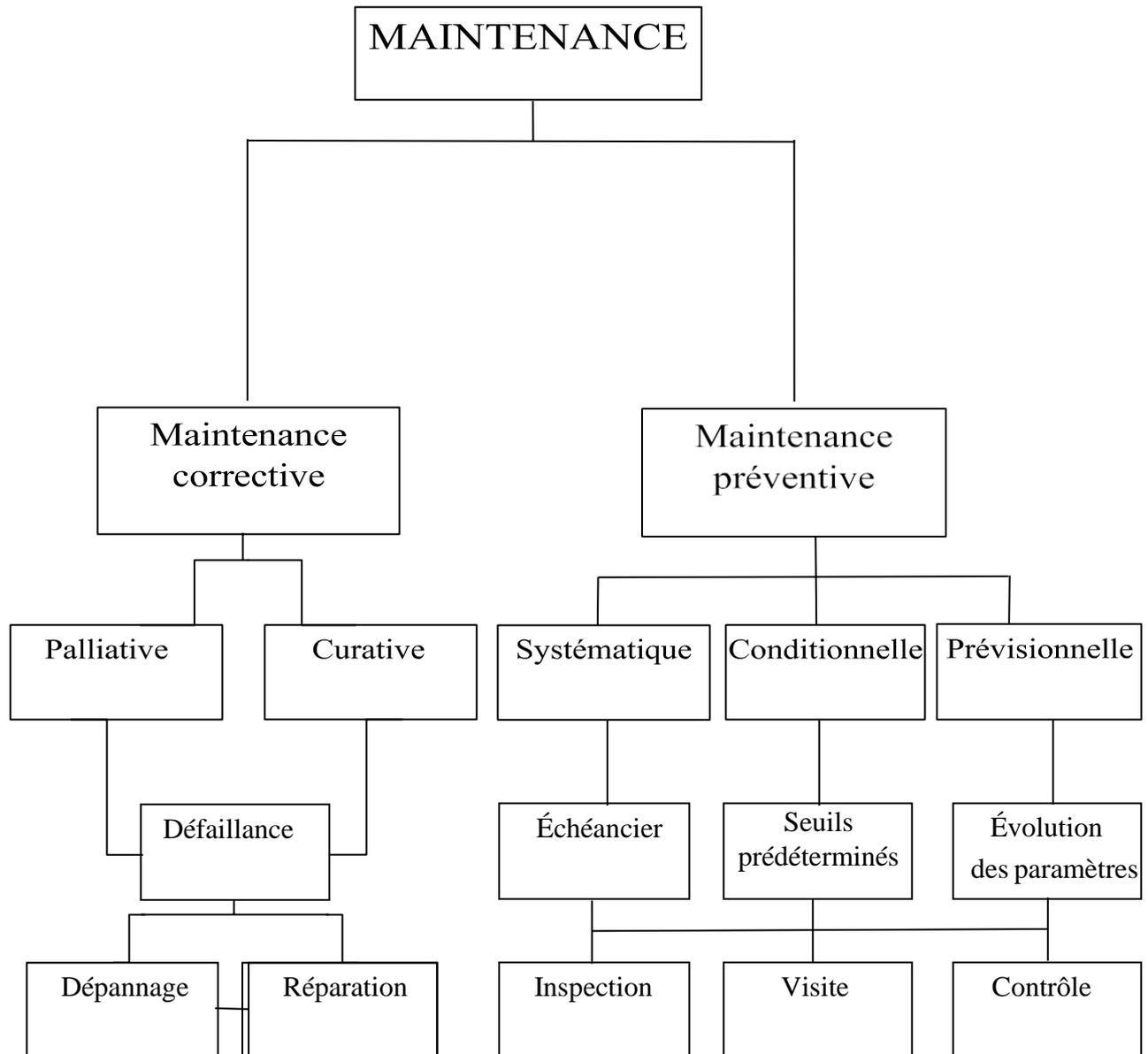


Figure.I.3 : Démarche suivie pour le choix d'un type de maintenance. [6]

### I.6 Les types de maintenance

La maintenance est divisée en deux types principaux, qui sont la maintenance après la panne (*la maintenance corrective*) et la maintenance avant l'apparition des défaillances (*la maintenance préventive*). Comme il est montré sur la (figure I.4). Il faut noter que les actions de maintenance corrective ne peuvent être entièrement éliminées dans les systèmes de productions, mais une bonne politique de maintenance préventive permet de réduire considérablement la nécessité des actions de maintenance corrective. [7]



**Figure I.4:** Classification des types de la maintenance

Les normes internationales définissent les différentes classes de maintenance comme suit :

### 1.6.1 La maintenance corrective

La maintenance corrective est « une maintenance exécutée après détection d’une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. » (AFNOR, 2002). La maintenance corrective (ou accidentelle) a pour objectif de rétablir le système après une défaillance (perte de la fonction requise) de manière à ce qu’il soit capable de fournir à nouveau ses fonctions. On peut distinguer deux types de maintenance corrective : la maintenance curative et la maintenance palliative [8]

### **I.6.1.1 Maintenance palliative**

Activités de maintenance corrective destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise, Elle est constituée d'opérations qui devront toutefois être suivies d'opérations curatives (réparations). Les opérations de dépannage sont souvent de courte durée et peuvent être nombreuses, et parce qu'elles ont lieu souvent ; elles sont également très coûteuses [9, 10]

### **I.6.1.2 Maintenance curative**

Contrairement aux actions palliatives, la maintenance curative a pour objectif de rétablir d'une façon permanente la fonction requise d'un système. Elle est appelée aussi réparation. Et son coût est très élevé. Les équipements réparés doivent assurer les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus, ce type de maintenance, provoque donc une indisponibilité du système [10]

## **I.6.2 Maintenance préventive**

Maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. Elle doit permettre d'éviter des défaillances des matériels en cours d'utilisation. L'analyse des coûts doit mettre en évidence un gain par rapport aux défaillances qu'elle permet d'éviter.

**Le but de la maintenance préventive est de :**

- Augmenter la durée de vie des matériels ;
- Diminuer la probabilité des défaillances en service ;
- Diminuer le temps d'arrêt en cas de révision ou de panne ;
- Prévenir et aussi prévoir les interventions de la maintenance corrective coûteuse ;
- Diminuer le budget de la maintenance ;
- Supprimer les causes d'accidents graves.

Il y a trois types de Maintenance préventive :

### **I.6.2.1 La maintenance conditionnelle**

La maintenance préventive conditionnelle ou tout simplement la maintenance conditionnelle, est une « maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement et intégrant les actions qui en découlent ; la surveillance

du fonctionnement et des paramètres pouvant être exécutée selon un calendrier, ou à la demande, ou de façon continue. » (AFNOR, 2002)

L'efficacité d'une maintenance conditionnelle est subordonnée à l'efficacité et à la fiabilité des paramètres de mesure qui la caractérisent.

La maintenance conditionnelle sera donc réservée aux matériels dont l'évolution d'éventuels défauts est facilement détectable et mesurable avec des capteurs fiables. Il s'agira principalement : [11]

- Des machines en mouvement (capteurs vibrations-analyse huiles, ...) ;
- Des canalisations (détection de fuites ...) ;
- Des équipements soumis à température ou pression (capteurs) ;
- Des capteurs électriques (analyse chromatographique, ...) ;
- Des appareils soumis à des déformations (examen de structure ou de surface).

### **I.6.2.2. La maintenance systématique**

Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien (EN 13306 : avril 2001). Même si le temps est l'unité la plus répandue, d'autres unités peuvent être retenues telles que : la quantité de produits fabriqués, la longueur de produits fabriqués, la distance parcourue, la masse de produits fabriqués, le nombre de cycles effectués, etc. Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision complète ou partielle.

Ce type de maintenance a des avantages et des limites :

- Elle est facile à gérer, les périodes d'intervention étant fixes ;
- Elle permet d'éviter les détériorations graves ;
- Elle diminue les risques d'avarie imprévue ;
- L'inconvénient d'une telle stratégie est qu'elle repose sur l'hypothèse d'un temps moyen de bon fonctionnement constant, ce qui implique un taux de défaillances constant, alors qu'en réalité un équipement vieillit (phénomènes d'usure), ce qui se traduit par une diminution du temps moyen de bon fonctionnement. [12]

### **I.6.3.2 La Maintenance prévisionnelle**

C'est « une maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien permettant de retarder et de planifier les interventions. Elle est parfois improprement appelée maintenance prédictive ». (AFNOR X60-010). Selon le projet de CEN

**WI 319 003**, la maintenance prévisionnelle : « Est une maintenance préventive exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation des paramètres significatifs de la dégradation du bien ». [13]

## **I.7 Autres types de maintenance**

Ces activités complètent les actions de maintenance citées précédemment et participent pour une part non négligeable à l'optimisation des coûts d'exploitation. [14]

### **I.7.1 La maintenance d'amélioration**

L'amélioration des biens d'équipements consiste à procéder à des modifications, des changements, des transformations sur un matériel.

Dans ce domaine, beaucoup de choses restent à faire. Il suffit de se référer à l'adage suivant : « on peut toujours améliorer ». C'est un état d'esprit qui nécessite une attitude créative. Cependant, pour toute maintenance d'amélioration une étude économique sérieuse s'impose pour s'assurer de la rentabilité du projet.

Les améliorations à apporter peuvent avoir comme :

- L'augmentation des performances de production du matériel ;
- L'augmentation de la fiabilité (diminuer les fréquences d'interventions) ;
- L'amélioration de la maintenabilité (amélioration de l'accessibilité des sous- systèmes et des éléments à haut risque de défaillance) ;
- La standardisation de certains éléments pour avoir une politique plus cohérente et améliorer les actions de maintenance ;
- L'augmentation de la sécurité du personnel ;

## **I.8 Opération de la maintenance**

Il existe des définitions normatives des différentes opérations de maintenance.

### **I.8.1 Opérations de la maintenance corrective**

Après apparition d'une défaillance, le maintenancier doit mettre en œuvre un certain nombre d'opérations dont les définitions sont données ci-dessous. Ces opérations s'effectuent par étapes (dans l'ordre) :

- **Test** c'est à dire la comparaison des mesures avec une référence.
- **Détection** ou action de déceler l'apparition d'une défaillance.
- **Localisation** ou action conduisant à rechercher précisément les éléments par lesquels la défaillance se manifeste.
- **Diagnostic** ou identification et analyse des causes de la défaillance.
- **Dépannage, réparation** ou remise en état (avec ou sans modification).
- **Contrôle** du bon fonctionnement après intervention.
- **Amélioration éventuelle** c'est à dire éviter la réapparition de la panne.
- **Historique** ou mise en mémoire de l'intervention pour une exploitation ultérieure.

## I.8.2 Opérations de la maintenance préventive

Les différentes actions à mener à bien afin d'effectuer ce type de maintenance sont :

- **Les inspections** : Activités de surveillance consistant à relever périodiquement des anomalies et exécuter des réglages simples. Elles sont en général exécutées sans outillage spécifique et ne nécessitent pas d'arrêt de l'outil de production ou des équipements.
- **La visite** : Opérations de surveillance qui, dans le cadre de la maintenance préventive systématique se traduit par un examen détaillé et prédéterminé de tout ou partie du bien, s'opèrent selon une périodicité déterminée. Ces activités peuvent entraîner des démontages partiels des éléments à visiter (et donc d'entraîner une immobilisation du matériel) ainsi que des opérations de maintenance corrective.
- **Les contrôles** : Vérifications de conformité par rapport à des données préétablies suivie d'un jugement. Le contrôle peut :
  - Comporter une activité d'information.
  - Inclure une décision : Acceptation ; rejet ; ajournement.
  - Déboucher comme les visites sur des opérations de maintenance corrective.

**P.S les opérations de surveillance** (contrôles, visites, inspections) sont nécessaires pour maîtriser l'évolution de l'état réel du bien. Elles sont effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage.

- **Révision** : Ensemble des actions d'examens, de contrôles et des interventions effectuées en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique, pendant un temps ou pour un nombre d'unités d'usage donné. Il faut distinguer suivant l'étendue des opérations à effectuer les révisions partielles et les révisions générales. Dans les deux cas, cette opération

nécessite la dépose de différents sous-ensembles. Le terme révision ne doit en aucun cas être confondu avec les termes visites, contrôles, inspections. Les deux types d'opérations définis (révision générale ou partielle) relèvent du 4<sup>ème</sup> niveau de maintenance.

- **Les échanges standards :** Reprise d'une pièce ou d'un organe ou d'un sous-ensemble usagé, et vente au même client d'une pièce ou d'un organe ou d'un sous-ensemble identique, neuf ou remis en état conformément aux spécification du constructeur, moyennant le paiement d'une soulte dont le montant est déterminé d'après le coût de remise en état.

## I.9 Les niveaux de la maintenance

Le degré du développement de la maintenance est classifié en 5 niveaux. Ces niveaux sont donnés par la norme à titre indicatif pour servir de guide et leur utilisation pratique n'est concevable qu'entre des parties qui sont convenues de leur définition précise selon le type de bien maintenir.

- **1<sup>er</sup> niveau de maintenance :** Actions simples nécessaires à l'exploitation et réalisées sur des éléments facilement accessibles en toute sécurité à l'aide d'équipements de soutien intégrés au bien. Ce type d'opération peut être effectué par l'utilisateur du bien avec, le cas échéant, les équipements de soutien intégrés au bien et à l'aide des instructions d'utilisation.
- **2<sup>ème</sup> niveaux de maintenance :** Actions qui nécessitent des procédures simples et/ou des équipements de soutien (intégrés au bien ou extérieurs) d'utilisation ou de mise en œuvre simple. Ce type d'actions de maintenance est effectué par un personnel qualifié avec les procédures détaillées et les équipements de soutien définis dans les instructions de maintenance. Un personnel est qualifié lorsqu'il a reçu une formation lui permettant de travailler en sécurité sur un bien présentant certains risques potentiels, et est reconnu apte pour l'exécution des travaux qui lui sont confiés, compte tenu de ses connaissances et de ses aptitudes.
- **3<sup>ème</sup> niveaux de maintenance :** Opérations qui nécessitent des procédures complexes et/ou des équipements de soutien portatifs, d'utilisation ou de mise en œuvre complexes. Ce type d'opération de maintenance peut être effectué par un technicien qualifié, à l'aide de procédures détaillées et des équipements de soutien prévus dans les instructions de maintenance.
- **4<sup>ème</sup> niveaux de maintenance :** Opérations dont les procédures impliquent la maîtrise d'une technique ou technologie particulière et/ou la mise en œuvre d'équipements de soutien spécialisés. Ce type d'opération de maintenance est effectué par un technicien ou

une équipe spécialisée à l'aide de toutes instructions de maintenance générales ou particulières.

- **5ème niveaux de maintenance** : Opérations dont les procédures impliquent un savoir-faire, faisant appel à des techniques ou technologies particulières, des processus et/ou des équipements de soutien industriels. Par définition, ce type d'opérations de maintenance (rénovation, reconstruction, etc.) est effectué par le constructeur ou par un service ou société spécialisée avec des équipements de soutien définis par le constructeur et donc proches de la fabrication du bien concerné.

Ces niveaux de maintenance font référence à la complexité des tâches à effectuer et aux ressources humaines et matérielles nécessaires à la réalisation de chacune des tâches. Cette spécification est détaillée dans le tableau 1. Le système de maintenance ainsi situé permet de préciser, de limiter et de dégager les responsabilités et les attentes envers ce système. Cependant, ceci constitue une condition nécessaire mais malheureusement non suffisante pour réussir l'implantation d'un système de maintenance dans une entreprise. [15]

**Tableau I.1 : Les niveaux de la maintenance**

Niveaux	Personnel d'intervention	Moyens
<b>1<sup>er</sup></b>	Exploitant sur place.	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation.
<b>2ème</b>	Technicien habilité sur place.	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation, plus pièces de rechange trouvées à proximité sans délai.
<b>3ème</b>	Technicien spécialisé, sur place ou en local de maintenance.	Outillage prévu plus appareils de mesure, banc d'essai, de contrôle, etc.
<b>4ème</b>	Equipe complète, polyvalente en atelier central.	Moyens proches de la fabrication par le constructeur.
<b>5ème</b>	Equipe complète, polyvalente en atelier central.	Moyens proches de la fabrication par le constructeur.

**I.10 Conclusion :**

La maintenance est une fonction complexe qui, selon le type de processus, peut être déterminante pour la réussite d'une entreprise. Les fonctions qui la composent et les actions qui les réalisent doivent être soigneusement dosées pour que les performances globales de l'outil de production soient optimisées, c'est pour cette raison qu'on a choisi de consacrer ce chapitre pour une présentation de l'état de l'art de la maintenance.

Dans le prochain chapitre on va présenter les fours à induction pour qu'on puisse faire leur analyse FMD prochainement.

***Chapitre II :***  
***Four à induction***

## ***Chapitre II : Four à induction***

### **I.1 Introduction**

Le chauffage par induction a connu ces dernières années un développement important, essentiellement lié aux avantages de ce mode de chauffage. Le chauffage par induction électromagnétique est une technique de chauffage pour les matériaux conducteurs fréquemment utilisée par de nombreux procédés thermiques tels que la fusion ou les traitements thermiques des métaux. [16]

C'est un phénomène physique basé sur l'effet Joule et l'induction électromagnétique, cette dernière a pour particularité de générer la chaleur directement à l'intérieur du matériau à chauffer. Cette particularité présente de nombreux atouts par rapport aux méthodes de chauffe plus standards. [17]

### **II.2 Définition de four**

Un four est un outil de production destiné à élaborer ou transformation des matériaux grâce aux transferts thermique entre une source de chaleur et la matière à traiter. [18] Il peut être soit :

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

### **II.3 Principe de fonctionnement des fours**

Le principe de fonctionnement du four est simple : l'objet à traiter y est enfermé pour être soumis à sa chaleur interne. Cette chaleur provient d'une source de chaleur annexe aux parois internes du four. La chaleur à l'intérieur du four peut être répartie par circulation forcée d'air, par convection naturelle, par conduction thermique ou par rayonnement (infrarouge, micro-ondes). [18]

La source d'énergie pour fournir la chaleur du four peut être :

- Un combustible (bois, gaz naturel...) ;
- L'électricité dans des résistances ;
- Le rayonnement solaire, (four solaire).

## **II.4 Classification des fours industriels**

Les fours sont classés suivant le procédé de chauffage, la manutention des produits traités, le niveau de température et suivant le combustible utilisé. [19]

### **II.4.1 Classification suivant le mode de chauffage**

En fonction du procédé de chauffage, on distingue les fours à chauffage directs et les fours à chauffage indirects. Le critère est ici le contact entre le produit et les gaz issus de la combustion.

#### **II.4.1.1 Fours à chauffage direct**

Dans les fours à chauffage direct, il y a un contact entre les gaz issus de la combustion et les produits à chauffer. Du point de vue thermique, cela entraîne qu'une partie du transfert de chaleur s'effectue par convection. [19]

#### **II.4.1.2 Four à chauffage indirect**

Au niveau des fours à chauffage indirect, l'interaction entre les gaz de combustion et les produits n'existe plus. Par contre, il s'introduit une résistance supplémentaire au transfert de chaleur qui doit se faire par conduction au travers de la paroi protectrice, puis par rayonnement et éventuellement par convection vers la charge. Le problème technologique est alors la tenue de cette paroi qui est portée à haute température et est au contact de la flamme et/ou des gaz à haute température.

### **II.4.2 Classification suivant la manutention des produits traités**

Dans la manutention des produits traités, on distingue les fours continus et les fours discontinus.

#### **II.4.2.1 Fours continus**

Dans un four continu (encore appelé four tunnel ou four à passage), le produit à chauffer entre une extrémité et en ressort à l'autre, c'est-à-dire que l'enfournement et le défournement sont mis en œuvre pendant le fonctionnement du four.

### **II.4.2.2 Fours discontinus**

Dans un four discontinu (ou four intermittent ou périodique), le produit à chauffer est immobile dans le four, autrement dit, il est chargé et déchargé (enfourné et défourné) au même endroit. Pour ces types de four, le foyer doit être éteint pendant le déchargement et le rechargement du four. La différence dans la manutention entraîne des différences notables du point de vue thermique. Dans un four continu, un point du four sera toujours (ou à peu près) à la même température tandis que dans un four discontinu la température en un point donné du four évoluera en fonction du cycle de chauffage que l'on veut faire subir au produit.

### **II.4.3 Classification suivant le niveau de température**

Par rapport au niveau de température, les fours sont soit à haute température ou soit à basse température. La classification est ici plus arbitraire car une même température peut être considérée comme haute dans un type d'activité et basse dans une autre activité. Même si cette limite est un tant soit peu arbitraire, elle n'en est pas moins réelle. [19]

#### **II.4.3.1 Fours à haute température**

Les fours à haute température sont en particulier les fours de sidérurgie, de verrerie, de cimenterie. La température que l'on veut obtenir sur le produit dépasse, et parfois nettement, 1200 °C. Le transfert de chaleur s'y fait essentiellement par rayonnement de la flamme et des gaz issus de la combustion. [19]

#### **II.4.3.2 Fours à basse température**

Il s'agit des fours de traitement thermique de métallurgie, les fours de revêtement de surface et les fours pour les métaux non ferreux. La température que l'on veut obtenir sur le produit dépasse rarement 700 °C, et est parfois sensiblement inférieure. C'est également le cas des zones de convection des fours de l'industrie du pétrole et de la chimie. Le transfert de chaleur s'y fait essentiellement par convection de gaz transparents.

### **II.4.4 Classification suivant le combustible utilisé**

On trouvera dans le domaine des fours industriels, avec plus ou moins d'importance selon les activités, toutes les formes d'énergie :

- Des fours électriques : il s'agit des fours à résistances (effet Joule), à arcs, à induction, à électrodes submergées, etc. ;

- Des fours à gaz ; ils utilisent le gaz naturel, mais aussi le gaz de cokerie, le gaz de raffinerie, le gaz de haut-fourneau, etc. ;
- Des fours à combustibles liquides : ils utilisent le fuel lourd, mais aussi le gazole, le naphta, etc. ;
- Des fours à combustibles solides : ils utilisent les charbons ou le coke de pétrole (généralement sous forme pulvérisée), mais aussi les déchets divers.

## II.5 Différents types des fours industriels

Il existe différents types de fours industriels, généralement segmentés en fonction de leur type d'énergie et de la manière dont elle est traitée. [20]

### II.5.1 Fours rotatifs

Les fours rotatifs sont constitués d'une enveloppe cylindrique en acier, d'axe sensiblement horizontal, qui se termine par deux structures, une à chaque extrémité. Le brûleur est situé à une extrémité et la sortie des gaz brûlés est située à l'autre extrémité, qui passe généralement à travers un système de récupération de chaleur pour préchauffer l'air soufflé avant d'être évacué par la cheminée. L'intérieur entier du four est revêtu d'un matériau réfractaire. Les fours rotatifs ont été considérés comme des fours à réverbération améliorés, car en plus de la charge étant chauffée par le contact des flammes et des gaz et par le rayonnement de la voûte chaude, il est également chauffé par contact direct avec la partie supérieure du four, que lorsque le virage est sous la charge. Ceci permet un raccourcissement notable du temps de fusion, car il est possible d'éviter l'effet isolant de la couche de laitier, qui flotte sur le bain, qui dans les fours à réverbération ordinaires rend difficile le chauffage de la masse du métal. Les fours rotatifs sont utilisés pour fondre toutes sortes de métaux et alliages, tels que le cuivre, le bronze, le laiton, l'aluminium, la fonte, l'acier, etc., et pour l'incinération ou la calcination. [20]

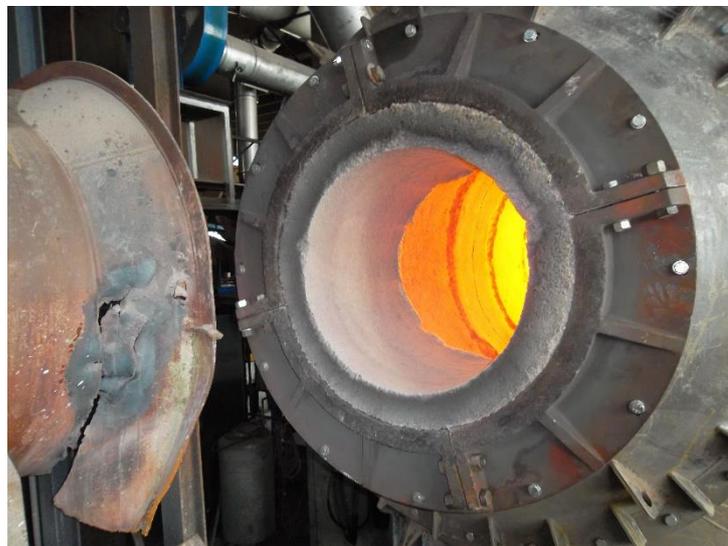
### II.5.2 Fours pour CRUCIBLES

Les creusets sont des récipients en argile mélangés avec du graphite et d'autres substances, pourvus d'un couvercle pour la fermeture hermétique, qui une fois chargés et fermés sont chauffés. La fusion dans des creusets est l'un des procédés les plus anciens et les plus simples de fabrication des métaux, et il est encore utilisé, et sera probablement toujours utilisé pour l'économie de son installation, en particulier pour fondre de petites quantités. Les fours à creuset sont construits pour

la cuisson d'un seul creuset, dont le dessus dépasse du four. Si les fours sont fixes, le bouillon est extrait avec une cuillère, mais des fours à creuset basculant sont également construits. Dans lequel le linge est plus confortable. L'avantage des fours à creuset, à la fois fixes et basculants, est que la charge est complètement isolée, et donc sa composition n'est pas altérée par l'effet des gaz produits lors de la combustion. [20]

### II.5.3 Fours Réverbérant

Le four réverbérant (**figure II.1**) est un type de four généralement rectangulaire, recouvert d'une voûte en briques réfractaires et d'une cheminée, qui réfléchit (ou réverbère) la chaleur produite dans un endroit indépendant du foyer où se fait le feu. Il est utilisé pour fondre le concentré de cuivre et séparer les scories, ainsi que pour la fusion et l'affinage de minéraux ou la fusion de métaux à bas point de fusion tels que l'aluminium. Ces fours sont utilisés dans la production de cuivre, d'étain et de nickel, dans la production de certains bétons et ciments et dans le recyclage de l'aluminium. Les fours à réverbération sont utilisés pour la fusion de métaux ferreux et non ferreux, tels que le cuivre, le laiton, le bronze et l'aluminium. La capacité des fours réverbérants est très variable et va de 45 kg à 1000 kg que ceux utilisés pour la fusion des métaux non ferreux ont, jusqu'à 80 tonnes que les plus gros utilisés pour la fusion. [21]



**Figure II.1** : Four réverbérant.

### II.5.4 Four électrique

Les fours électriques présentent de grands avantages pour la fusion des métaux, les plus importants étant les suivants : Des températures très élevées jusqu'à 3500 ° C peuvent être obtenues dans certains types de fours électriques. La vitesse de montée en température peut être contrôlée et maintenue dans des limites très précises, avec des régulations entièrement automatiques. La charge

est totalement exempte de contamination par le gaz combustible. L'atmosphère en contact avec la masse fondue peut être parfaitement contrôlée, la rendant oxydante ou réductrice à volonté, et même dans certains types de four, elle peut fonctionner sous vide. Les revêtements durent plus longtemps que les autres types et sont installés dans un espace confiné. Son fonctionnement est effectué avec une hygiène supérieure à celle des autres types de fours. Les types de base de fours électriques sont énumérés ci-dessous.

## II.6 Différents types de fours électrique :

### II.6.1 Fours à arc électrique :

Un four à arc (**figure II.2**) 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. Le four à arc électrique lui-même est divisé en trois sections (cuve inférieure, cuve supérieure et toit) et peut être basculé de manière hydraulique.

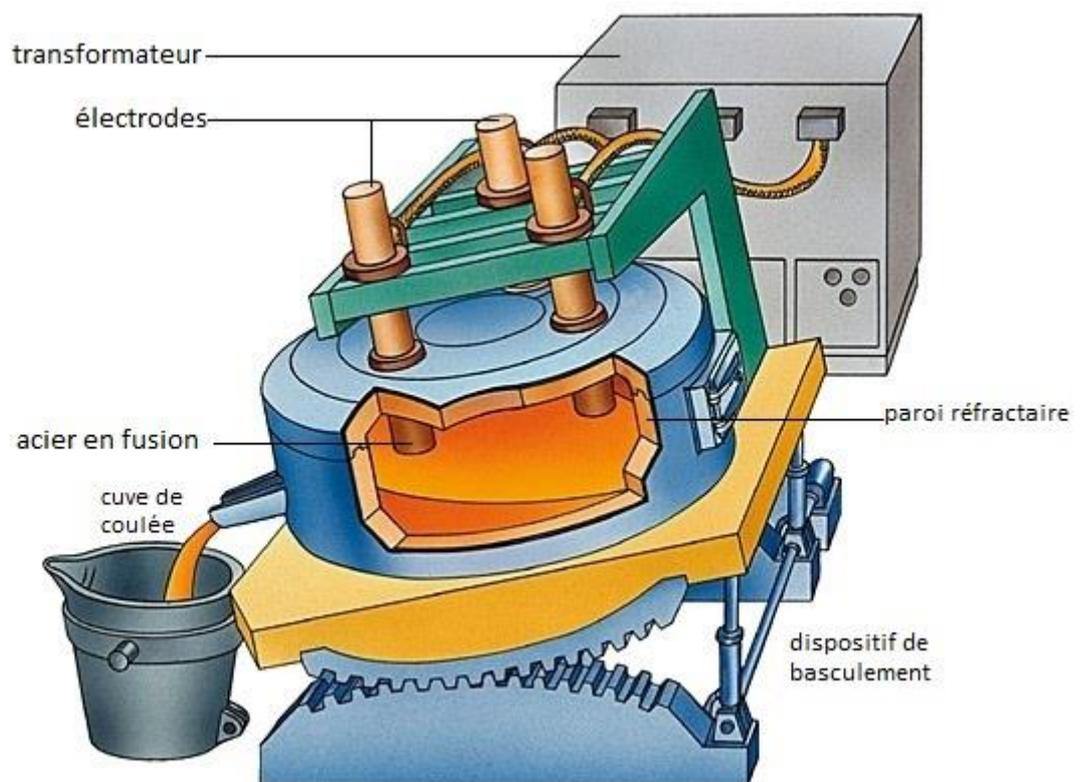


Figure II.2 : Four à arc électrique

### Les types des fours à arc :

#### 1. Four à arc d'après leur nature d'alimentation :

Compte tenu de la nature de la source d'énergie électrique, on distingue deux types de four à

arc électrique : les fours à arc électrique à courant alternatif et les fours à arc électrique à courant continu. En effet le premier type de four possède trois électrodes alors que le deuxième en possède un seul. Chacun ayant ses avantages et ses inconvénients.

## 2. Four à arc d'après leur nature d'arc :

- Four à arc sur charge
- Four à arc sur résistance
- Four à arc libre

### II.6.2 Fours à résistance électrique

Un four à résistances (**Figure II.3**) est essentiellement constitué : d'une enceinte réalisée à partir de matériaux à caractère isolant ou réfractaire dont le rôle est de réduire les pertes thermiques par transmission vers l'extérieur. Est sans doute le plus connu des appareils électrothermiques, Son utilisation industrielle remonte en effet au début des années 1920 et sa technique n'a cessé de se perfectionner depuis de cette date.



**Figure II.3** : Fours électriques à résistances

### II.6.3 Four à induction

C'est un four (**Figure II.4**) de fusion électrique dans lequel la chaleur nécessaire à la fusion est apportée par effet induction entre une bobine primaire et une bobine secondaire (**Figure II.5**). Dans les fours dits "à canal" la bobine secondaire est constituée par un canal du métal à fondre en forme de boucle [21]



**Figure II.4 :** Four à induction.



**Figure II.5 :** Isolation de bobine de four à induction.

Le four à induction se compose de deux grands types :

- Four à creuset.
- Four à canal.

## II.7 Principe de fonctionnement d'un four à induction

Ce type de four utilise le principe de l'induction électromagnétique (**Figure II.6**). 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. Les fours à induction utilisent des bobines dans lesquelles passe un courant électrique pour générer un champ magnétique intense. Il est orienté et concentré sur les charges métalliques, présentes dans le creuset réfractaire. La bobine inductrice placée autour du creuset est refroidie à l'eau afin d'éviter toute surchauffe et dégradation de cette dernière. Des écrans magnétiques sont disposés tout autour pour refermer le champ sur la zone de fusion. Un effet intéressant pour la métallurgie est le brassage dû aux courants induits. Il permet d'homogénéiser le bain ce qui rend très intéressant ce type de moyen de fusion pour l'élaboration d'alliages complexes. Il existe une variante du four à induction plutôt réservée au maintien du métal en fusion dans un four à canal. Ce dernier est destiné au stockage du métal liquide, souvent directement sur le chantier de moulage. La température est maintenue par le passage du métal dans un canal où l'on applique un courant induit. Cela produit un courant dans le bain qui homogénéise l'ensemble. Les fours à induction sont utilisés pour la fusion et le maintien de tous les types d'alliages : acier, fonte, non ferreux. [22]



**Figure II.6 :** Fonderie a la chauffe par induction



**Figure II.7 :** Chauffage par induction

## II.8 Types de four à induction

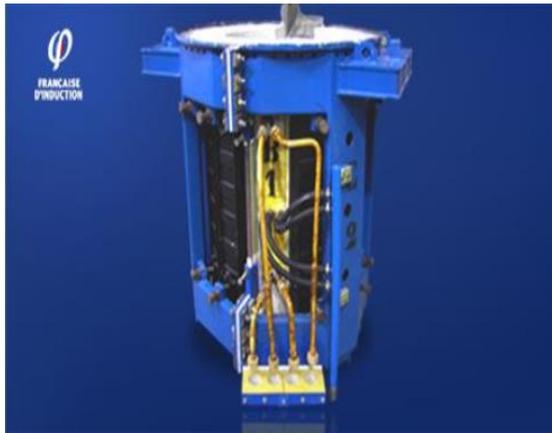
Les fours à induction se partagent en deux grands types qui se subdivisent eux-mêmes en fonction de leurs alimentations électriques. Il s'agit des fours à canal et des fours à creuset.

### II.8.1 Fours à creuset

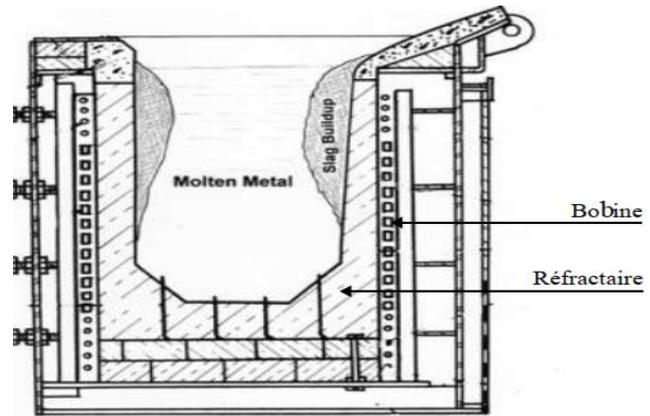
Les fours à induction à creuset sont appelés aussi fours à induction sans canal ou sans noyau. Ils se composent essentiellement d'une bobine inductrice entourant un creuset en réfractaire, leur forme facilite leur entretien. Le métal en fusion coule alors dans la lingotière située juste au-dessous du creuset. On peut leur appliquer des puissances élevées surtout en moyenne fréquence et ils sont des fours puissants et rapides bien adaptés pour la fusion (figure II.7 et II.8). [23]

Il existe deux groupes principaux de fours sans noyau, classés selon la fréquence du courant alternatif appliqué :

- Les fours de fréquence du secteur (ou ligne) qui sont normalement exploités à 50 Hz ;
- Les fours de fréquence moyenne qui peuvent être exploitées à partir de 150Hz jusqu'à 1500Hz.



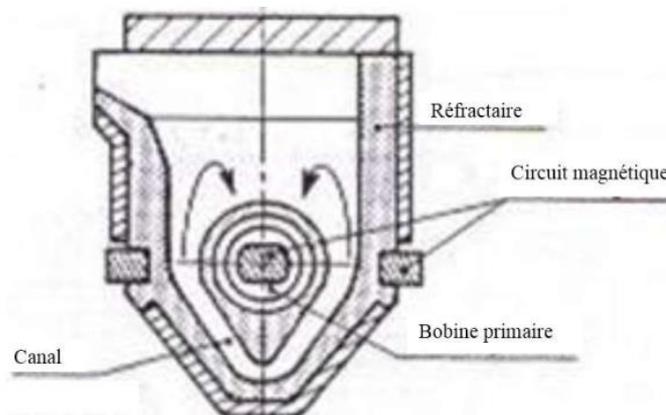
**Figure II.8 :** Fours à creuset.



**Figure II.9 :** Corps d'un four a creuset. [24]

## II.8.2 Four à canal

Le four à canal est le premier type de four à induction qui existe. Il est principalement utilisé comme four de maintien. Il est constitué par un réservoir en matériaux de réfractaire à la partie inférieure duquel se raccorde le canal (voir figure II.10). Le métal remplissant ce canal constitue ainsi une spire continue qui se trouve fermée par le métal du creuset. Le creuset est entièrement monté sur un mécanisme de basculement. Le couplage est bon. Le rôle du four n'est pas d'augmenter la température du métal, mais plutôt d'empêcher un refroidissement non souhaité. [25]



**Figure II.10:** Schéma d'un four à canal.

## II.9 Applications des fours à induction :

Dans l'industrie du fer et de l'acier :

- Echauffement de corps non conducteurs à l'état froid remplissant des canaux en matière conductrice.

- Echauffement d'un conducteur remplissant un canal construit en matière infusible non conductrice à l'état froid.
- Echauffement par le moyen d'un noyau en matière conductrice d'un corps non conducteur remplissant le canal de fusion.
- Echauffement de couches alternées de matières conductrices et non conductrices, remplissant le canal de fusion. [26]

### **Autres applications de l'induction**

On peut citer entre autres :

- ❖ Le brassage électromagnétique d'alliages métalliques ;
- ❖ Le confinement électromagnétique de plasma ;
- ❖ Le décapage de peinture;
- ❖ Les plaques de cuisson;
- ❖ La recharges d'accumulateurs.

### **II.10 Avantages et inconvénients 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 supprime 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.

De par leur principe, ces fours présentent une conception simple, un réglage précis de la composition du métal, un fonctionnement silencieux, une propreté et un entretien peu important. Il est possible d'automatiser le processus de chauffage par induction ; alors on n'a pas besoin de main d'œuvre qualifiée. Grâce à la régulation précise de la température et une homogénéité optimale de cette température dans l'enceinte du four, les risques d'oxydation sont réduits au maximum. Par contre, ils présentent des inconvénients sur les réfractaires minces nécessitant un personnel expérimenté et sur le circuit d'eau à surveiller.

Le tableau suivant montre ces avantages et ces inconvénients : [27]

**Tableau II.1** : les avantages et les inconvénients d'un four à induction

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La propreté de ce procédé, l'économie en énergie et permutaton de mieux contrôler la fusion des métaux.</li> <li>• 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.</li> <li>• Les capacités des fours à induction varient de moins d'un kilogramme à cent tonnes, 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.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'absence de raffinage dans le phénomène des matériaux de charge doivent être propres de produits d'oxydation et d'une composition connue.</li> <li>• Certains éléments d'alliage peuvent être perdus en raison de l'oxydation (et doivent être rajoutés après-coup à la fonte).</li> <li>• Le volume des matériaux à fondre est faible, plus la fréquence du four est élevée</li> </ul>

## II.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu général sur les fours en générales et en particulier les fours à induction, concernant leurs descriptions, types, avantages et inconvénients. Rappelons aussi les notions nécessaires à la compréhension du fonctionnement des fours à induction.

Dans ce qui suit, on va entamer une étude sur l'analyse FMD du four à induction.

***Chapitre III :***  
***Analyse FMD du four à induction***

## ***Chapitre III : Analyse FMD du four à induction.***

### **III.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. C'est l'objectif du dernier chapitre où on tente par l'exploitation de l'historique de panne de four à induction de faire face à l'étude expérimentale des indicateurs FMD de telle four tout en traçons les courbes de ces trois indicateurs.

### **III.2 Analyse FMD**

#### **III.2.1 Le but de l'analyse FMDS**

L'analyse FMDS est une notion générique qui mesure la qualité de service délivré par un système, de manière à ce que l'utilisateur ait en lui une confiance justifiée. Cette confiance justifiée s'obtient à travers une analyse qualitative et quantitative des différentes propriétés du service délivré par le système, mesurée par les grandeurs probabilistes associées : fiabilité, maintenabilité, disponibilité, sécurité.

#### **III.2.2 La Fiabilité**

##### **III.2.2.1 Définition :**

La fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, durant un intervalle de temps donné. Le terme fiabilité est également utilisé pour désigner la valeur de la fiabilité et peut être défini comme une probabilité. C'est alors la probabilité pour qu'une entité puisse accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné. La notion de fiabilité est associée à celle de taux de défaillance. [28]

##### **III.2.2.2 Sortes de Fiabilités**

- ▲ **La fiabilité intrinsèque :** qui est propre à un matériel, selon un environnement donné, et ne dépend que de la qualité de ce matériel.

- ▲ **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.
- ▲ **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.
- ▲ **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.
- ▲ **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.
- ▲ **La fiabilité humaine** : Aptitude d'un opérateur humain à accomplir une mission requise dans des conditions données, pendant une durée donnée.

### III.2.2.3 Paramètres nécessaires à la mesure de la Fiabilité

- ✦ **Variable aléatoire (V.A)** : On appelle de variable aléatoire (**x**) celle à laquelle nous pouvons associer une probabilité pour chaque valeur de (**x**) :
  - ◆ **Variable aléatoire continue** : Intervalle de temps entre défaillance consécutive d'un matériel.
  - ◆ **Variable discrète** : Nombre de défaillance d'un matériel sur une période donnée.
- ✦ **Densité de probabilité f (t)** : Elle représente la probabilité de défaillance en un intervalle de temps (t).

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

Avec:

$\gamma$  : Paramètre de position

$\eta$  : Paramètre d'échelle

$\beta$  : Paramètre de forme

- ✦ **Fonction de répartition  $F(t)$**  : C'est la notation générale de la probabilité de défaillance dans l'intervalle de temps  $[0, t]$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{III-2})$$

- ✦ **La fonction de fiabilité  $R(t)$**  : représente la probabilité de fonctionnement sans défaillances pendant un temps  $(t)$ , ou la probabilité de survie jusqu'à un temps  $(t)$ .

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{III-3})$$

- ✦ **Moyenne des temps entre défaillances (M.T.B.F)** : 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.

$$MTBF = \int_0^{+\infty} R(t) dt \quad (\text{III-4})$$

$$MTBF = \frac{\Sigma \text{ temp de bon foctionnement}}{\text{nombre d'intervalles de temps de bon fonctionnement}} \quad (\text{III-5})$$

$$\text{Si } \lambda \text{ est constant : } MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{III-6})$$

$$\text{En fonction de la valeur de } \beta \text{ d'où } MTBF = A\eta + \gamma \quad (\text{III-7})$$

- ✦ **Taux de défaillance  $\lambda(t)$**  : C'est la probabilité de défaillance à l'instant  $(t+dt)$ , sachant que le dispositif était bon à l'instant  $t$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (\text{III-8})$$

Où :

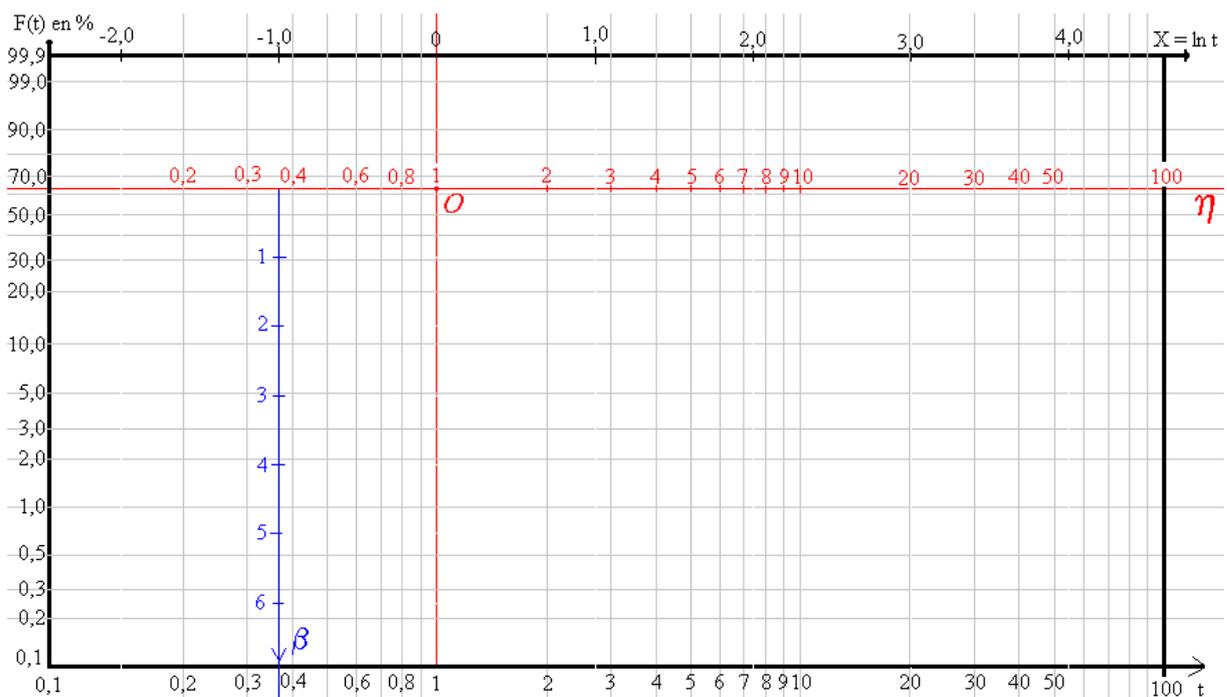
$$\lambda(t) = \frac{F(t)}{R(t)} \quad (\text{III-9})$$

#### III.2.2.4 Loi de WEIBULL

C'est une loi continue à trois paramètres, donc d'un emploi très souple. En fonction de la valeur de ses paramètres, elle peut s'ajuster à toutes sortes de résultats expérimentaux. Cette loi a été retenue pour représenter la durée de vie des pièces.

La loi de Weibull est une loi continue à trois paramètres :

- ❖ **Le paramètre de position  $\gamma$**  : Qui représente le décalage pouvant exister entre le début de l'observation (date à laquelle on commence à observer un échantillon) et le début du que l'on observe (date à laquelle s'est manifesté pour la première fois le processus observé).
- ❖ **Le paramètre d'échelle  $\eta$**  : Qui, comme son nom l'indique, nous renseigne sur l'étendue de la distribution.
- ❖ **Le paramètre de forme  $\beta$**  : Il est associé à la cinétique du processus observé. Suivant les valeurs de  $\beta$ , le taux de défaillance est :
  - Soit décroissant ( $\beta < 1$ ) ;
  - Soit constant ( $\beta = 1$ ) ;
  - Soit croissant ( $\beta > 1$ ).
- ❖ **Estimation des paramètres de la loi de Weibull :**
  - ▲ Si lors de la représentation des 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  $\eta$ .
  - ▲ **Recherche de  $\eta$**  : La droite de régression linéaire coupe l'axe A à l'abscisse  $t = \eta$ .
  - ▲ **Recherche de  $\beta$**  : est la pente de la droite de corrélation. On trace une droite parallèle à la droite de corrélation, et passant par  $\eta = 1$ . On lit ensuite béta sur l'axe B.



**Figure III-1** : Représentation sur graphique à échelle fonctionnelle de la distribution de Weibull (graphique d'Allan Plait). [29]

### III.2.3 Maintenabilité

#### III.2.3.1 Définition

La maintenabilité est « l'aptitude d'un dispositif à être requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions, avec des procédures et des moyens précis ». La maintenabilité caractérise la facilité de remettre ou de maintenir un bien en bon état de fonctionnement. [30]

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (\text{III-10})$$

La maintenabilité est caractérisée par la moyenne des temps techniques de réparation **MTTR** :

$$\text{MTTR} = \frac{\sum \text{temps d'interventions pour n pannes}}{\text{nombre de pannes (n)}} \quad (\text{III-11})$$

#### III.2.3.2 Taux de réparation

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 [31]

$$\mu = \frac{1}{\text{MTTR}} \quad (\text{III-12})$$

### III.2.4 Disponibilité

#### III.2.4.1 Définition

Selon la norme AFNOR X60 – 500, on peut définir la disponibilité comme aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires de maintenance soit assurée ». Pour qu'un équipement présente une bonne disponibilité, il doit :

- Avoir le moins possible d'arrêts de production.

- Être rapidement remis en état s'il est défaillant. La disponibilité relie donc les notions de fiabilité et de maintenabilité. [30]

### III.2.4.2 Les type de disponibilité

Il existe plusieurs types de disponibilités peuvent être utilisés :

- **Disponibilité intrinsèque** : cette disponibilité est évaluée en prenant en compte les moyennes de bon fonctionnement et les moyennes de réparation, ce qui donne :

$$D_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (III-13)$$

- **Disponibilité instantanée** : Pour un système avec l'hypothèse d'un taux de défaillance  $\lambda$  constante et d'un taux de réparation  $\mu$  constant, la disponibilité instantanée est :

$$D(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-t(\lambda + \mu)} \quad (III-14)$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \left( \frac{1}{h} \right) \text{ et } \lambda = \frac{1}{MTBF} \left( \frac{1}{h} \right) \quad (III-15)$$

### III.2.4.3 Amélioration de la disponibilité

Il est donc possible de jouer sur :

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

## III.3 Analyse de PARETO

A la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, un statisticien, Vilfredo PARETO, réalisa une étude sur la collecte des impôts en Italie. Pareto remarque en analysant la répartition des terres entre les différents propriétaires terriens que certains phénomènes sont caractéristiques. L'analyse ABC permet de limiter le problème, en sélectionnant sur un ensemble de donnée, l'importance du ou des critères qui justifient l'étude. Juran en tire l'idée que, pour un phénomène, 20% des causes produisent 80% des effets. Par exemple, pour un stock de produits en vente, 80% du chiffre d'affaires est généré par 20% des produits. Il utilisa ce modèle, en le détournant de sa première finalité, mais lui gardera le nom de son auteur initial. Pour Juran cette répartition s'applique pour représenter plusieurs points cruciaux de la démarche industrielle : [32]

- La répartition des défauts d'une production (les 20/80)
- La détermination des objectifs prioritaires de la politique
- L'approche critique du management de la qualité (boucle de contrôle)

### III.3.1 L'objectif de digramme de Pareto

La méthode « Pareto » a pour but de sélectionner, dans une population, les sujets les plus représentatifs en regard d'un critère chiffrable.

Le diagramme de Pareto est un moyen simple de classer les phénomènes par ordre d'importance.

Parmi les objectifs on cite :

- Faire apparaître les causes essentielles du phénomène.
- Hiérarchiser les causes du problème.
- Evaluer les effets d'une solution.
- Mieux cibler les actions à mettre en œuvre.

### III.3.2 L'objectif de l'analyse Pareto

La méthode ABC est un moyen objectif d'analyse, elle permet de classer les éléments qui représentent la fraction la plus importante du caractère étudié, en indiquant les pourcentages pour un caractère déterminé. La méthode ABC permet donc au gestionnaire d'identifier des cibles d'actions prioritaires, mais également de déterminer les éléments négligeables pour alléger l'étude [34]. On classe les événements (pannes par exemple) par ordre décroissant de coûts (temps d'arrêts, coût financier, nombre, etc.), chaque événement se rapportant à une entité.

### III.3.3 Représentation on graphique

Un diagramme de Pareto (Figure III.2) est mis en évidence lorsque 20 % des catégories produisent 80 % du nombre total d'effets. Cette méthode permet donc de déterminer rapidement quelles sont les priorités d'actions. Si on considère que 20 % des causes représentent 80% des occurrences, agir sur ces 20 % aide à solutionner un problème avec un maximum d'efficacité. Un diagramme de Pareto est généralement présenté sous forme d'histogramme en colonne. Les catégories sont affichées en abscisses, par ordre décroissant de fréquence. Le nombre d'apparition est indiqué sur l'axe des ordonnées. Une courbe en ligne contenant les valeurs cumulées complète le diagramme [34]

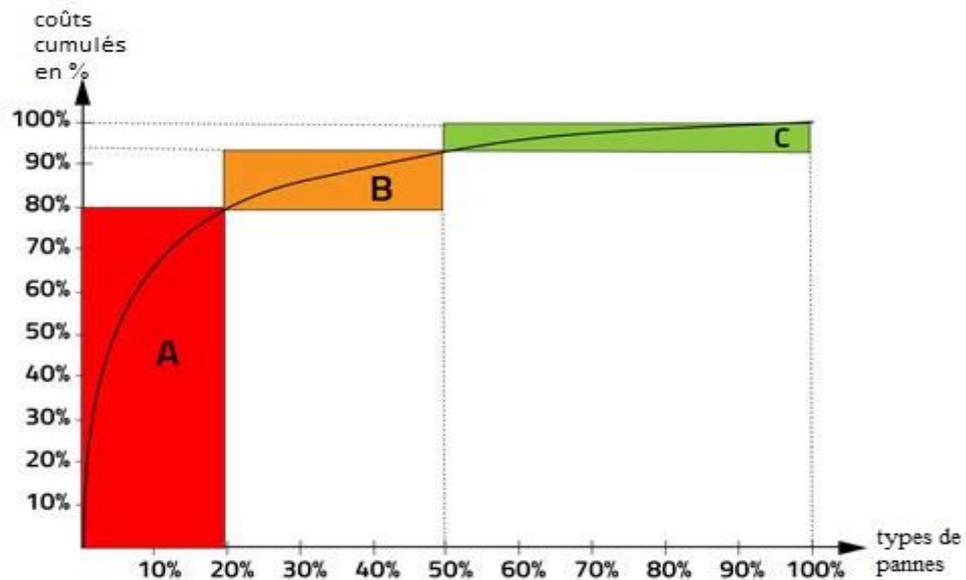


Figure III.2 : Diagramme de Pareto ou courbe ABC

### III.4 Présentation d'historique des pannes du four à induction

Suite à un suivi de l'historique des pannes du four à induction (donné à ALFET), de la période illustrée d'après les dates de démarrage et d'arrêt. On résume au tableau suivant les causes des arrêts, ainsi que, les pannes prises pour la remise en états de bon fonctionnement.

Le tableau (III.1) contient aussi les temps d'arrêt et les temps de bon fonctionnement.

Tableau III.1 : Dossier historique du Four à induction (donné à ALFET).

N°	Date de démarrage	Date D'arrêt	Pannes	TBF (h)	TTR (h)	Causes
1	01/03/2017	30/04/2017	Pas de débit.	1380	60	Moteur d'entraînement endommagé
2	03/11/2017	06/01/2018	Surintensité	980	460	Mauvaise équilibrage de phase
3	31/12/2018	10/02/2018	Permutation étoile /triangle	1240	200	Contacteur étoile/triangle défaillant a cause de durée de vie ou mauvais manipulation

4	01/03/2017	01/04/2018	Dégradation de la pompe. Débit d'huile insuffisant	400	320	Défaillance des distributeurs
5	01/01/2019	01/02/2019	Vibration de four	660	60	Culasse desserré
6	02/02/2019	04/04/2019	Echauffement	1130	300	Distribution défaillant mauvaise qualité d'huile
7	10/01/2019	13/02/2019	Bouchage de la bobine	680	40	Mauvaise refroidissement
8	18/03/2019	20/05/2019	Surintensité	926	511	Probleme de cable
9	25/03/2019	27/05/2019	Tension réduit	1320	120	Doit desserré
10	01/05/2019	03/07/2019	Echaufement de la bobine	764	676	Débit diminué
11	09/09/2019	11/10/2019	Bouchage de four	409	311	La crasse. Mauvaisalidité de métal
12	15/11/2019	03/01/2020	Four bloque	1203	150	Vérine bloqué
13	10/02/2019	13/03/2020	Echaufement d'huile	482	205	Viscosité d'huile diminuée
14	12/03/2020	15/05/2020	Surintensité	983	450	Condensateur défaillant
15	02/03/2020	06/06/2020	Niveau de tension baisse	1540	380	Position des doigts de transformateur
16	01/07/2020	30/08/2020	Blocage du vérin	1000	320	Usure de piston
17	30/12/2020	10/02/2021	Echauffement de la bobine	920	520	Pompe d'eau grippée
18	1/11/2020	10/02/2021	Echauffement de four	1773	360	Axe de distributeur grippé

### III.5 Méthode d'analyse de Pareto

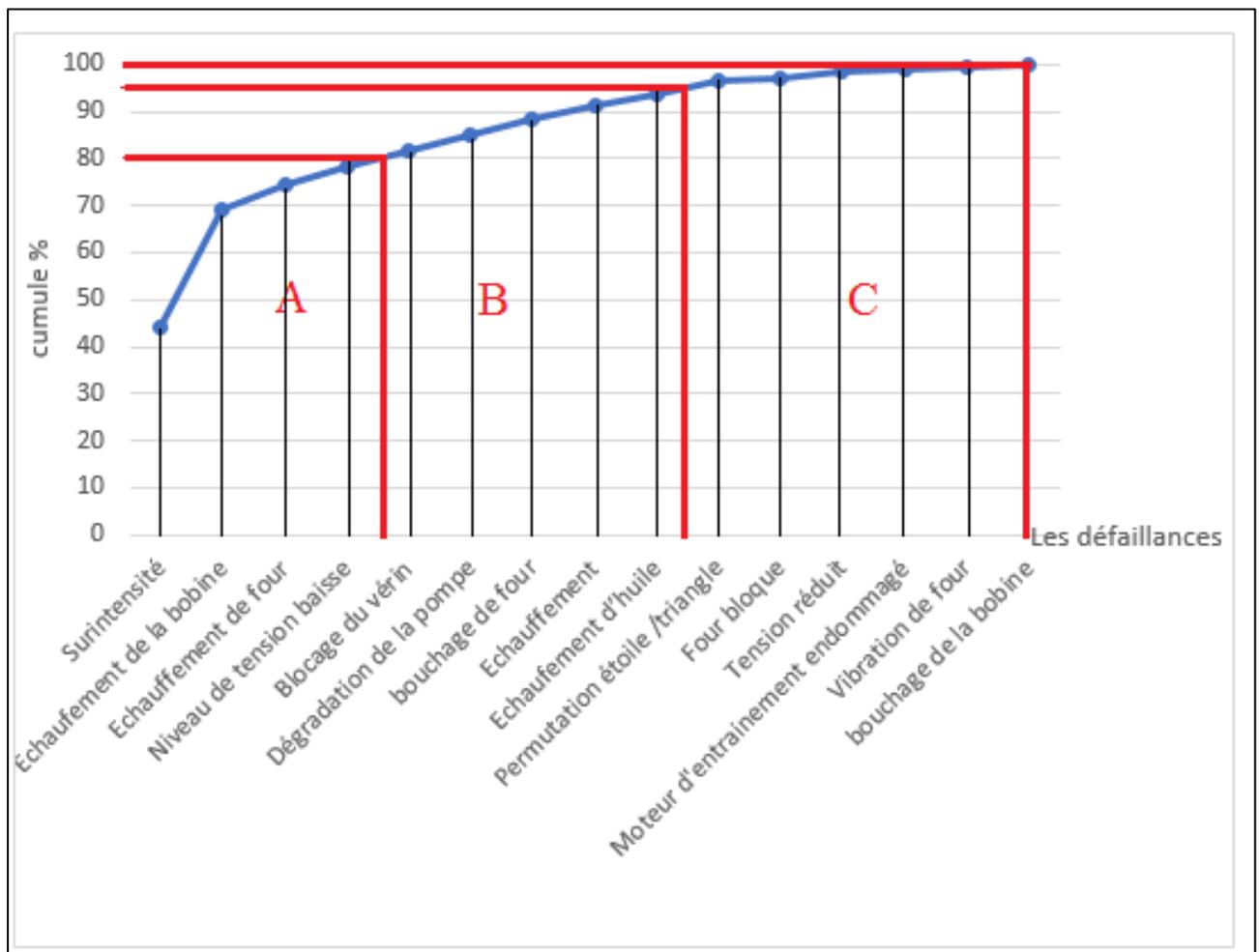
#### III.5.1 Cumul des causes d'arrêt

Pour l'application de la méthode d'analyse de Pareto dite aussi la méthode de la courbe ABC. Il faut en premier lieu revenir au tableau (III.1), pour faire un classement des causes par ordre décroissant selon les heures de pannes, ce qui va donner tableau (III.2), qui résume les causes d'arrêt en six causes. Ensuite on va procéder à la construction de la courbe de Pareto.

Tableau III.2 : Cumul causes d'arrêt du four à induction.

Défaillance	Nbre de défaillance	TA(h)	N*TA	Cumul(N*TA)	Cumul(N*TA)%	ABC
Surintensité	3	1421	4263	4 263	42.54	A
Echauffement de la bobine	2	1196	2392	6 655	66.41	A
Echauffement de four	1	520	520	7 175	71.59	A
Niveau de tension baisse	1	380	380	7 555	75.39	A
Blocage du vérin	1	320	320	8 255	82.37	B
Dégradation de la pompe. Débit d'huile insuffisant	1	320	320	8 575	85.57	B
Bouchage de four	1	311	311	8 886	88.67	B
Echauffement	1	300	300	9 186	91.66	B
Echauffement d'huile	1	205	205	9 391	93.71	B
Permutation étoile /triangle	1	200	200	9 591	95.70	C
Four bloque	1	150	150	9 741	97.20	C
Tension réduit	1	120	120	9 861	98.40	C
Moteur d'entraînement endommagé	1	60	60	9 921	99.00	C
Vibration de four	1	60	60	9 981	99.60	C
Bouchage de la bobine	1	40	40	10 021	100	C

### III.5.2 Diagramme de Pareto (ou méthode ABC)



**Figure III-3** : Diagramme de Pareto (ou méthode ABC)

D'après le tableau précédent, (tableau III.2), Ce digramme à barres verticales particulier, connu aussi sous le nom de règle des **80/20** ou de méthode ABC (figure III-3), où il représente le pourcentage du (nombre de pannes **X** taux d'arrêt) en fonction du pourcentage de la défaillance. La forme de cette courbe est croissante, peut être répartie en trois zones selon lesquelles on va faire notre interprétation, tel-que :

**Zone "A"** : Cette zone est limitée à **20%** les défaillances. C'est la zone de priorité qui correspond à la maintenance préventive, causées par surintensité, échauffement de la bobine, échauffement de four et niveau de tension baisse.

**Zone "B"** : Cette zone est délimitée entre **20% et 60%** les défaillances, ce qui donne les **15%** du (nombre de pannes **X** taux d'arrêt). C'est une zone de pannes moins prioritaires que celles de la

zone A, causées par blocage du vérin, dégradation de la pompe. Débit d'huile insuffisant, bouchage de four, échauffement et échauffement d'huile.

**Zone "C"** : Dans cette zone les **5%** des pannes restantes ne représentent qu'ont **40%** de la défaillance. C'est généralement des pannes négligées. A travers cette analyse, on peut en conclure que les temps d'arrêt les plus importants sont causés le plus fréquemment par permutation étoile /triangle, four bloque, tension réduit, moteur d'entrainement en dommage, vibration de four et bouchage de la bobine.

### III.6 L'analyse FMD

#### III.6.1 Fiabilité opérationnelle

Le tableau suivant comporte les **TBF** classés par ordre croissant, et les calculés par la méthode des ranges médians (Dans notre cas  $N = 18 \leq 20$ ). Selon la relation :

$$F(t_i) = \frac{N_i - 0,3}{N_{tot} + 0,4} \quad (III-15)$$

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

$$\lambda(t) = \frac{F(t+\Delta t) - F(t)}{R(t)} \quad (III-16)$$

Avec :

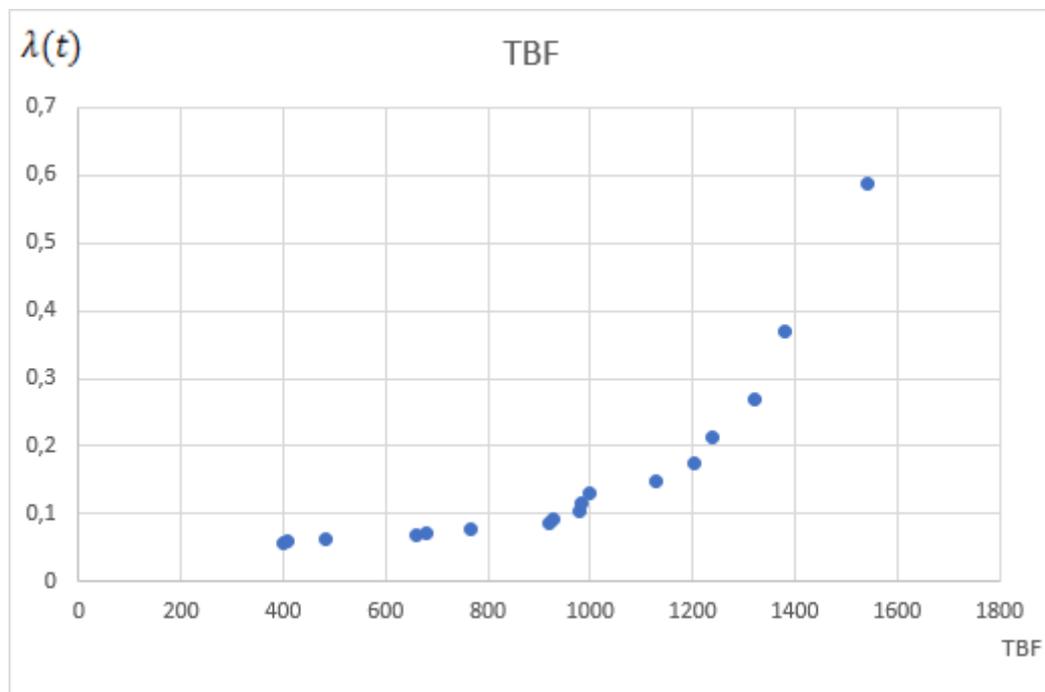
$$R(t) = 1 - F(t) \quad (III-17)$$

**Tableau III.3** : les valeurs de  $F(t)$ ,  $R(t)$  et  $\lambda(t)$ .

TBF(h)	Ni	F(t)	R(t)	$\lambda(t)$
400	1	0,038043	0,961956	0,056497
409	2	0,09239	0,907608	0,059880
482	3	0,146739	0,853260	0,063694
660	4	0,201086	0,798913	0,068027
680	5	0,255434	0,744565	0,072992
764	6	0,309782	0,690217	0,078740

920	7	0,364130	0,635869	0,085470
926	8	0,418478	0,581521	0,093457
980	9	0,472826	0,527173	0,103092
983	10	0,527173	0,472826	0,114942
1000	11	0,581521	0,418478	0,129870
1130	12	0,635869	0,364130	0,149253
1203	13	0,690217	0,309782	0,175438
1240	14	0,744565	0,255434	0,212765
1320	15	0,798913	0,201086	0,270270
1380	16	0,853260	0,146739	0,370370
1540	17	0,907608	0,092391	0,588235
1773	18	0,961956	0,038043	
	Ntot=18			

D'après les calculs précédents du tableau (III.3), nous avons réussi à tracer la courbe de taux de défaillance  $\lambda(t)$ .



**Figure III.4 :** 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.

### III.6.1.2 Calcul les indicateurs MTBF, MTTR :

Le calcul des indicateur MTBF, MTTR, Di se faire comme suite :

D'après les relations (III-5):

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

Et (III-11)

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

$$\text{A.N: } MTBF = \frac{\sum TBF}{NP+1} = \frac{17790}{19} = 936.31h$$

$$\text{A.N: } MTTR = \frac{\sum \text{Temps de réparation}}{NP} = \frac{26}{11} = 302.389h$$

### III.6.2 Fiabilité prévisionnelle

Dans cette partie on utilise la loi de Weibull comme modèle pour estime une loi de fiabilité.

#### III.6.2.1 Calcule les paramètres de weibull

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

On complète le tableau puis on trace la courbe de Weibull :

**Tableau III.4** : les valeurs de F(t) en %

TBF(h)	Ni	F(t)	F(t)%
400	1	0,03804348	3,95480226
409	2	0,0923913	9,60451977
482	3	0,14673913	15,2542373
660	4	0,20108696	20,9039548
680	5	0,25543478	26,5536723
764	6	0,30978261	32,2033898
920	7	0,36413043	37,8531073
926	8	0,41847826	43,5028249

980	9	0,47282609	49,1525424
983	10	0,52717391	54,8022599
1000	11	0,58152174	60,4519774
1130	12	0,63586957	66,1016949
1203	13	0,69021739	71,7514124
1240	14	0,74456522	77,4011299
1320	15	0,79891304	83,0508475
1380	16	0,85326087	88,700565
1540	17	0,9076087	94,3502825
1773	18	0,96195652	100
	Ntot=18		

D'après les calculs précédents du tableau (III.4), nous avons réussi à tracer la courbe de Weibull représentée ci-dessous :

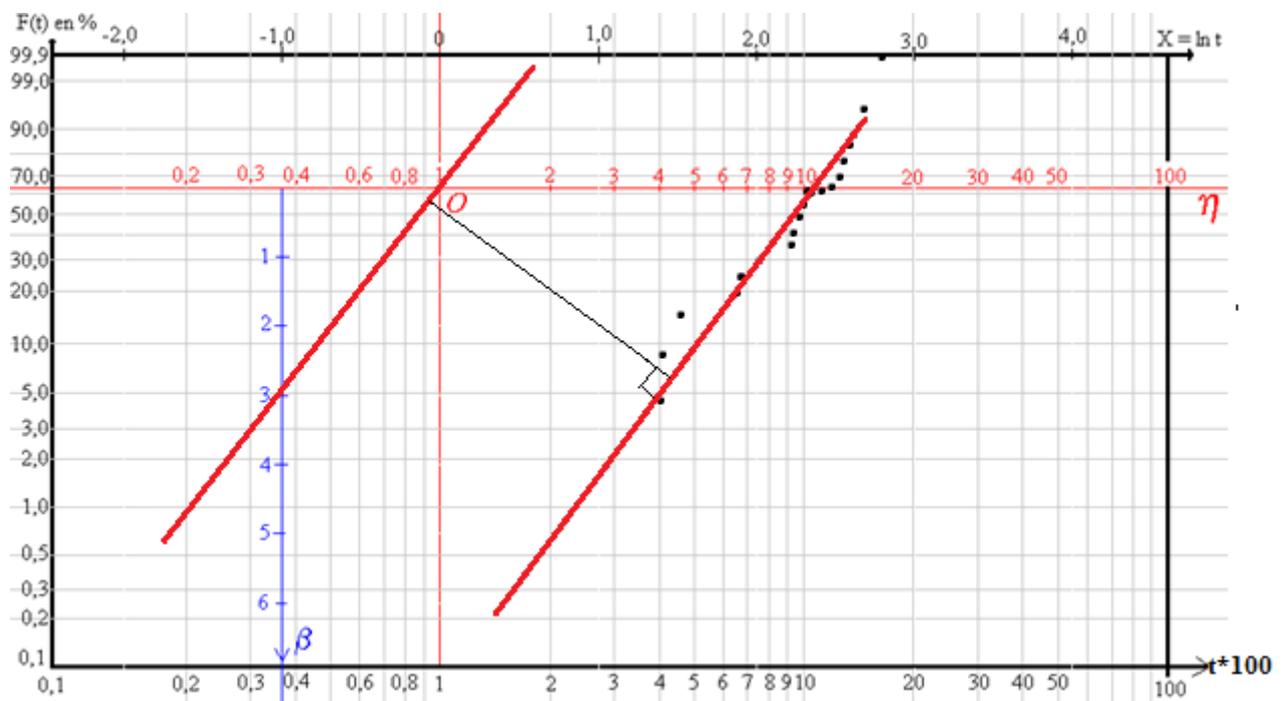


Figure III.5 : La représentation graphique de la fonction de répartition sur le papier de Weibull

A partir du papier de Weibull de la figure (III.5), nous pouvons tirer les trois paramètres nécessaires :

**Tableau III.5** : Paramètres de calcul de la fiabilité

Paramètres	Valeurs
Eta ( $\eta$ )	1 100
Beta ( $\beta$ )	2.9
Gamma ( $\gamma$ )	0

### III.6.2.2 Exploitation des paramètres de WEIBULL

On doit déterminer toute moyenne des temps de bon fonctionnement Pour bien exploiter les paramètres de Weibull

#### A. Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement :

D'après la relation :  $MTBF = A\eta + \gamma$  .

D'après les paramètres de calcul de fiabilité on a :  $\beta = 2.9$ .

On a :  $A = 0,89169$  ;  $B = 0,33408$  (voir annexe 1).

**A.N:**  $MTBF = 0.89169 * 1110 = 989.775$

Et donc :  $MTBF = 989.775$  heures.

#### B. La densité de probabilité en fonction de MTBF :

D'après l'équation de  $F(t)$  :  $F(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \times e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$  .

**A.N:**  $f(t = MTBF) = \frac{2.9}{1110} \left(\frac{989.775}{1110}\right)^{1.9} \times e^{-\left(\frac{989.775}{1110}\right)^{2.9}} = 0.103\%$  .

Alors :  $f(MTBF) = 0.103\%$

#### C. La fonction de défaillance en fonction de MTBF :

D'après l'équation de  $F(t)$  :  $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$  .

**A.N :**  $F(t = MTBF) = 1 - e^{-\left(\frac{989.775}{1110}\right)^{2.9}} = 0.5119 = 51.19\%$  .

Alors :  $F(MTBF) = 0.5119 = 51.19\%$ .

**D. La fiabilité en fonction de MTBF :**

D'après l'équation de  $R(t)$  :  $R(t) = 1 - F(t)$ .

**A.N:**  $R(t = \text{MTBF}) = 1 - F(t = \text{MTBF}) = 1 - 0.5119 = 0,4881$ .

Alors:  $R(\text{MTBF}) = 0,4881 = 48.81\%$ .

**E. Le taux de défaillance en fonction de MTBF :**

L'équation de  $\lambda(t)$  :  $\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$ .

**A.N:**  $\lambda(t = \text{MTBF}) = \frac{2.9}{1110} \left( \frac{989.775}{1110} \right)^{1.9} = 0.0021$  ;

Ce qui donne :  $\lambda(t) = 0.0021$  panne/heure .

**F. Calcul du temps souhaitable pour une intervention systématique :** Pour une fiabilité de 80% on va essayer de déterminer le temps souhaitable pour organiser une intervention systématique.

On peut exprimer cela comme suit :  $R(t) = 80\% \rightarrow t = ?$

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

$$\ln R(t) = -\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta = \ln(0.8) \Leftrightarrow -\left[\ln \frac{1}{R(t)}\right]^{\frac{1}{\beta}} = -\frac{t}{\eta} \Rightarrow t = \eta \left[\ln \left(\frac{1}{R(t)}\right)\right]^{\frac{1}{\beta}}$$

**A.N :**  $t = 1110 \left[\ln \left(\frac{1}{0.8}\right)\right]^{\frac{1}{2.9}} = 661.75$  heures

Pour garder la fiabilité du four à induction à 80% il faut intervenir chaque temps systématique égale à : 661.75 heures.

**III.6.2.3 Etude de modèle de weibull**

Pour le modèle de Weibull on a l'analyse suivante :

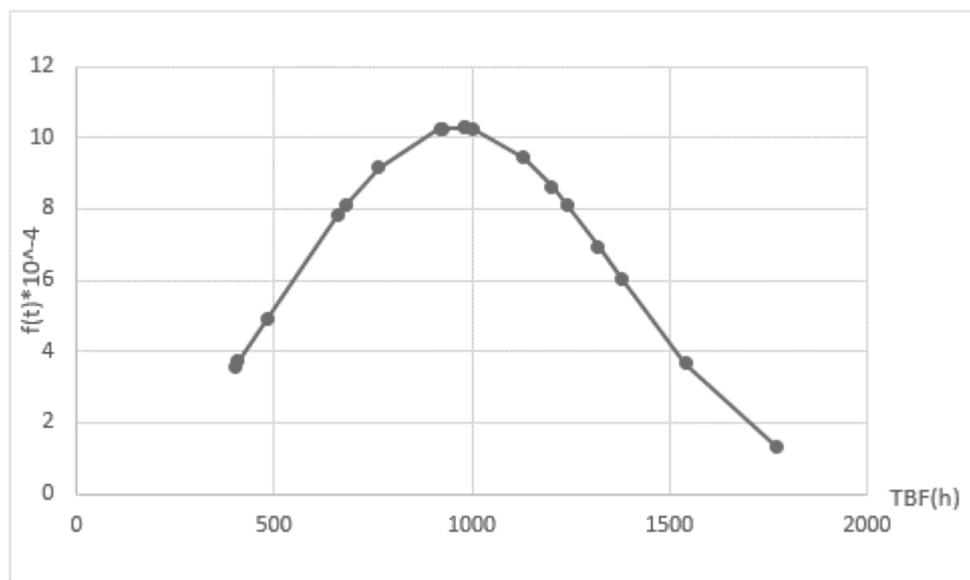
- **La fonction de la densité de probabilité :** La fonction de la densité de probabilité est donnée par la relation (III-1) :

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

**Tableau (III.6) :** Calcul de la fonction de la densité de probabilité.

TBF(h)	400	409	482	660	680	764
$f(t) * 10^{-4}$	3,5675	3,7087	4,8988	7,797	8,0884	9,1588
TBF(h)	920	926	980	983	1000	1130
$f(t) * 10^{-4}$	10,2375	10,251	10,2722	10,2682	10,2348	9,4283
TBF(h)	1203	1240	1320	1380	1540	1773
$f(t) * 10^{-4}$	8,6107	8,1223	6,954	6,0277	3,6713	1,302

A partir des calculs précédents du tableau (III.6), on a tracé la courbe suivante :

**Figure III.6:** La Courbe de La fonction de la densité de probabilité.

Le graphique de **la figure (III.6)** représente la variation de la fonction de la densité de probabilité en fonction du temps de bon fonctionnement.

**On remarque** que la courbe augmente jusqu'à atteindre **980 heures** puis elle s'effondre et diminue.

➤ **Fonction de défaillance F(t) :**

La fonction de répartition est donnée par la relation (III-2) :

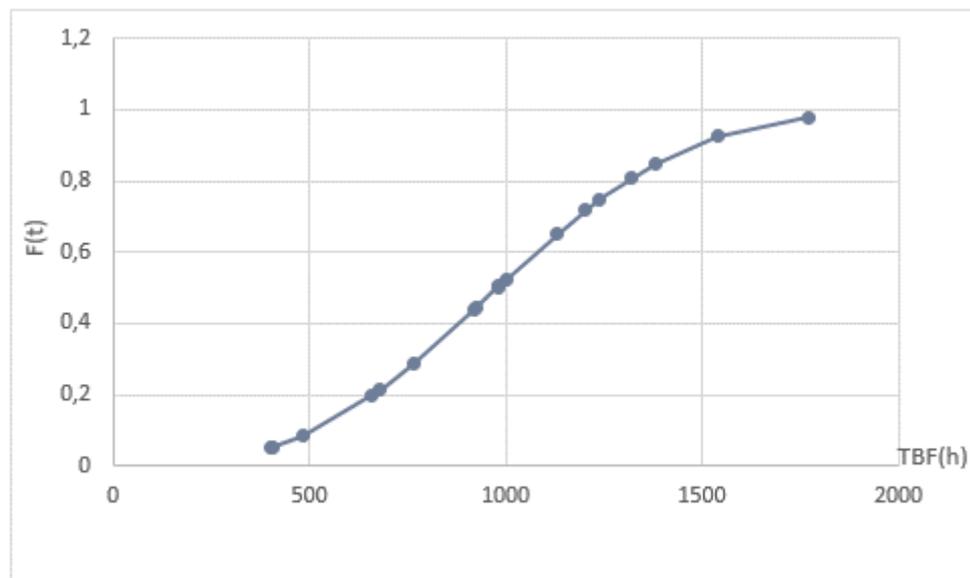
$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-y}{\eta}\right)^\beta}$$

De cette relation on obtient les résultats illustrés au tableau (III.7).

**Tableau III.7:** les valeurs de F(t).

TBF(h)	400	409	482	660	680	764
F(t)	0,0505	0,0538	0,0852	0,1986	0,2145	0,2871
TBF(h)	920	926	980	983	1000	1130
F(t)	0,4401	0,4463	0,5018	0,5049	0,5223	0,6512
TBF(h)	1203	1240	1320	1380	1540	1773
F(t)	0,7171	0,7481	0,8085	0,8474	0,9246	0,9795

A partir les calculs précédents du tableau (III.7), on a pu tracer la courbe suivante :



**Figure III.7:** La Courbe de Fonction Répartition.

La courbe de la figure (III.7), donne la présentation graphique de la fonction de répartition en fonction du temps de bon fonctionnement en heure. On remarque que l'évolution du graphique est croissant sous une forme non linéaire. Cette allure nous fait dire que la défaillance augmente avec l'évolution du temps.

➤ **La fiabilité :**

La fiabilité peut être calculée à partir de la relation (III-3) :

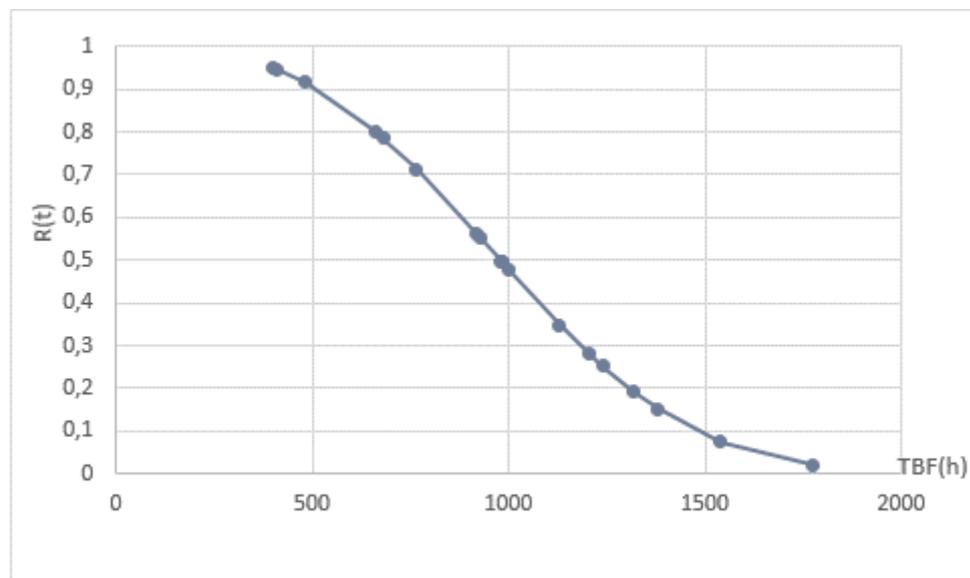
$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}$$

Selon les calculs obtenus on trace le tableau suivant :

**Tableau III.8 :** Calcul de la fiabilité.

TBF(h)	400	409	482	660	680	764
R(t)	0,9495	0,9462	0,9148	0,8014	0,7855	0,7129
920	926	980	983	1000	1130	1203
0,5598	0,5537	0,4982	0,4951	0,4777	0,3488	0,2829
1240	1320	1380	1540	1773		
0,2519	0,1915	0,1526	0,0754	0,0205		

A partir les calculs précédents du **tableau (III.8)**, on a tracé la courbe suivant :



**Figure III.8:** La Courbe de la fonction de Fiabilité.

La figure III.8 présente l'évolution de la fonction de Fiabilité. Le graphe décroissant en fonction de temps ce qui fait expliquer par le phénomène de dégradation

➤ **Le taux de défaillance :**

Le taux de défaillance peut être calculé selon la formule **(III-8)** :

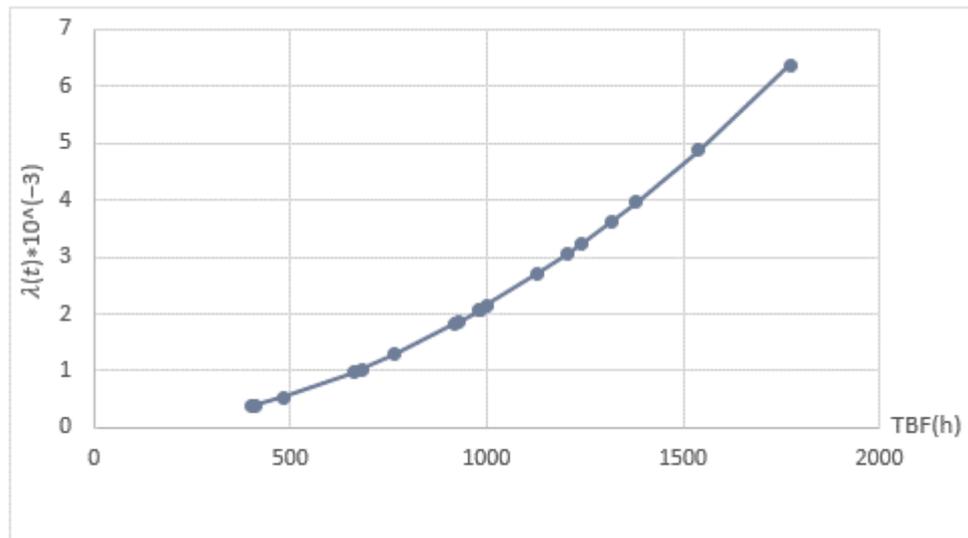
$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

Après calcul, on trace les résultats obtenus sur le tableau suivant :

**Tableau III.9.** Calcul du taux de défaillance.

TBF(h)	400	409	482	660	680	764
$\lambda(t) * 10^{-3}$	0,3757	0,392	0,5355	0,973	1,0297	1,2848
920	926	980	983	1000	1130	1203
1,8288	1,8515	2,062	2,074	2,1427	2,70278	3,0442
1240	1320	1380	1540	1773		
3,2245	3,6312	3,9512	4,8669	6,3607		

A partir les calculs précédents du tableau **(III.9)**, on a tracé la courbe suivante :



**Figure III.9 :** courbe du taux de défaillance  $\lambda(t)$ .

La figure (III.9) présente l'évolution de la fonction de taux de défaillance. On remarque que la courbe croît rapidement.

### III.6.3 La maintenabilité :

La fonction de la maintenabilité est donnée par la relation (III-10) :

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

Avec (III-12)

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

Et (III-11)

$$MTTR = \frac{\sum_{N=1}^{N=18} TTR}{N}$$

**Avec : TTR** : est le temps technique de réparation et N est le nombre de panne.

D'après l'historique des pannes de four :

$$A \ N : \quad MTTR = \frac{5443}{18} = 302.3889$$

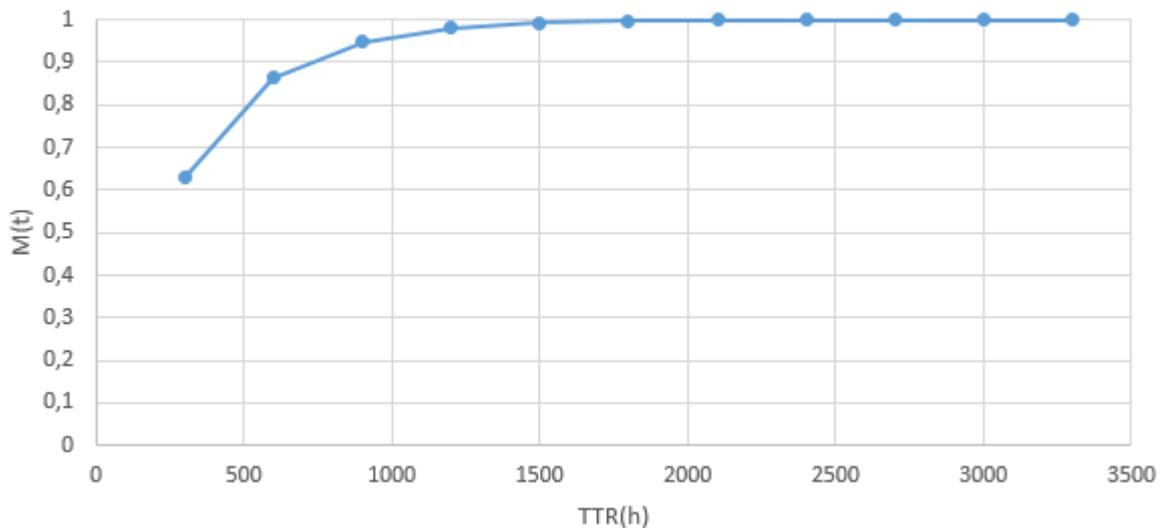
$$\mu = \frac{1}{302.3889} = 3.307 * 10^{-3} \text{ Intervention / heure}$$

Le tableau ci-après résume le calcul de la maintenabilité selon l'historique déjà cité au paravent :

**Tableau III.10** : les valeurs de la maintenabilité du four.

M(t)	300	600	900	1200	1500	1800
TTR(h)	0,6292	0,8625	0,9490	0,9811	0,9930	0,9974
M(t)	2100	2400	2700	3000	3300	
TTR(h)	0,9990	0,9996	0,9999	0,9999	0,9999	

A partir les calculs précédents du **tableau (III.10)**, on a pu tracer la courbe suivant :



**Figure III.10:** courbe de la maintenabilité  $M(t)$ .

La figure (III.10) présente l'évolution de la fonction de maintenabilité en fonction du temps de technique de réparation mesuré en heure. On remarque que le graphique résultant est croissant puis se stabilise vers  $TTR = 2400$ heures. Donc la maintenabilité est croissante en fonction du temps technique de réparation puis devient constante avec une valeur égale à **99,99%**.

### III.6.4 La disponibilité

Pour la disponibilité, on doit déterminer les deux volets de ce paramètre théorique et instantané, qui se lie directement au temps de réparation.

#### 1. Disponibilité intrinsèque :

La disponibilité intrinsèque théorique est déterminée en fonction de la moyenne de bon fonctionnement et de la moyenne de réparation. Elle est donnée par la relation (III-13) :

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

A.N:

$$D_i = \frac{936.31}{936.31 + 302.389} = 0,7558$$

Donc la disponibilité intrinsèque :  $D_i = 0,7558$

#### 2. Disponibilité instantanée :

La disponibilité instantanée en fonction du taux de défaillance et du taux de réparation est exprimée comme suit (III-14):

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

On a  $MTBF = \frac{1}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{1}{MTBF} = 0,001068$

Et  $MTTR = \frac{1}{\mu} \Rightarrow \mu = \frac{1}{MTTR} = 0,003307$

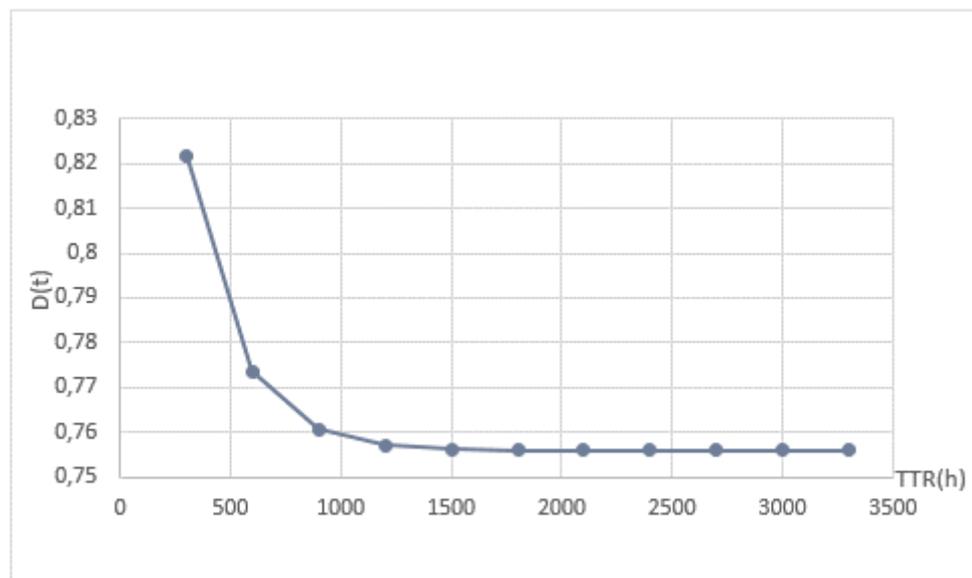
$$D(t) = \frac{0.003307}{0.001068 + 0.003307} + \frac{0.001068}{0.001068 + 0.003307} e^{-(0.001068 + 0.003307)t}$$

Les résultats des calculs sont illustrés sur le tableau (III.11).

**Tableau III.11:** les valeurs de la disponibilité instantée.

TTR(h)	300	600	900	1200	1500	1800
D(t)	0,82159	0,77357	0,76065	0,75717	0,75623	0,75598
M(t)	2100	2400	2700	3000	3300	
TTR(h)	0,75591	0,75589	0,75589	0,75589	0,75588	

A partir les calculs précédents du **tableau (III.11)**, on a pu tracer la courbe suivante :



**Figure III.11 :** courbe de la disponibilité instantée **D(t)**

La courbe de la figure (III.11) représente la variation de la disponibilité en fonction du temps de réparation mesurée en heure. On remarque que la disponibilité est décroissante en fonction de temps nécessaire à la réparation. On peut conclure que pour augmenter la disponibilité du four il faut diminuer le temps des arrêts, en réduisant leur nombre. C'est à dire augmenter sa fiabilité en réduisant le temps nécessaire pour la résolution des causes de ces arrêts et le nombre de pannes en améliorant sa maintenabilité.

### III.7 Conclusion

Ce chapitre porte sur la mise en œuvre du concept FMD appliqué aux fours à induction, Il s'agit d'évaluer statistiquement la fiabilité opérationnelle en utilisant les données du fichier historiques fournies 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, l'analyse FMD permettra au gestionnaire de la fonction maintenance de déterminer une stratégie de maintenance basé sur l'étude graphique à travers un exemple pratique qui permet d'obtenir des analyses profondes pour mieux planifier une politique de gestion de la maintenance.

# Conclusion générale

## *Conclusion générale*

Le Maintien en condition opérationnelle de l'outil de production, joue un rôle clé dans le développement de l'entreprise. Il ne s'agit pas que les activités d'entretien et de réparation d'un équipement, lorsqu'il est en service, c'est beaucoup plus que cette courte vision. Il s'agit en fait de toutes les activités qu'il faut déployer, pendant la totalité du cycle vie de l'équipement, pour garantir à tout moment que le service qu'on attende sera obtenue, et ceci dans les meilleures conditions de performance coût/efficacité.

Dans ce mémoire nous avons présenté une validation expérimentale des indicateurs FMD en maintenance des fours à induction. La problématique relative à la prise en compte de la fiabilité de la maintenabilité et de la disponibilité de l'équipement étudiée.

Premièrement on a commencé notre travail par une présentation de l'état de l'art de la maintenance, ou on a donnée plus de détail sur ces différents types ainsi que leurs niveaux dans le domaine industriel.

Deuxièmement on a procédé et défini les différents types de notre four et leurs composants, son démarrage et son principe de fonctionnement, cette définition nous à faciliter le maintien de notre système et d'avoir une durée de vie maximum à l'aide des actions de sécurité qu'il faut prévoir.

Troisième partie a été consacré à une étude sur l'analyse des concepts F.M.D, pour le four à induction, d'après cette analyse on peut confirmer que la disponibilité varie avec la variation de la fiabilité et de la maintenabilité.

Au terme de cette étude, on peut constater et conclure qu'il est très important de connaître la méthode de calcul de tous les équipements des fours à induction avec une étude détaillée des problèmes qu'on peut rencontrer. Ainsi de connaître les comportements avec une étude détaillée de La F.M.D qui permet de choisir une meilleure politique de maintenance, ce qui donne la possibilité de réduire les temps d'arrêts, l'indisponibilité.

En fin, ce travail simple reste une source d'espoir pour augmenter d'avantage la production et d'améliorer la qualité et l'efficacité du service maintenance.

# Références Bibliographiques

**BIBLIOGRAPHIEQUES**

- [1] ALHOUIJ, Ahmad Alali. *Contribution à l'optimisation de la maintenance dans un contexte distribué*. 2010. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- [2] MOUBRAY, John. *Reliability-centered maintenance*. Industrial Press Inc., 2001.
- [3] FLEURQUIN, Guillaume, HOU, Guanglin, DEHOMBREUX, Pierre, *et al.* OPTIMAIN : Plateforme d'élaboration de stratégies de maintenance de systèmes complexes. In : *MOSIM*. 2006.
- [4]. BOUCHE, Michel, PLAUCHU, V., et RETOUR, D. Où va la maintenance industrielle ? *Revue Française de Gestion Industrielle*, 1989, vol. 8, no 2.
- [5] Dr. DJAMEL FRIHI « *Cours de Maintenance Industrielle* », Faculté Des Sciences, Université du 8 mai 1945 – Guelma, Juin 2015.
- [6] Mohamed SOUSSAN & Tarik DIB, « *Etude critique et propositions d'amélioration de la gestion de la maintenance - cas de l'adduction EL KANSERA* » Mémoire de Master en ELECTROMECHANIQUE, Ecole Nationale de l'Industrie Minérale (E.N.I.M.), 2012-2011.
- [7] ADZAKPA, Pelope. *Maintenance des systèmes distribués : méthodes d'aide à la décision temps-réel*. 2004. Thèse de doctorat. Université de Technologie de Troyes.
- [8] GHOSH, Devarun et ROY, Sandip. Maintenance optimization using probabilistic cost-benefit analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2009, vol. 22, no 4, p. 403-407.
- [9] E GARCIA, H GUYENNET, J.C LAPAYRE, N ZERHOUNI « *A new industrial cooperative tele maintenance platform. Computers & Industrial Engineering*, » Volume 46, Issue 4, July 2004, Pages 851-864
- [10] GOGUELIN, Pierre. *La prévention des risques professionnels*. Presses universitaires de France, 1996.
- [11] ADZAKPA, Pelope. *Maintenance des systèmes distribués : méthodes d'aide à la décision temps-réel*. 2004. Thèse de doctorat. Université de Technologie de Troyes.

- [12] ALAIN, Villemeur. Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. *Editions Eyrolles*, 1988.
- [13]. OUERTANI, Amine. *Effets des stratégies de maintenance sur la performance d'une ligne de production avec zones de stockage à capacité finie*. 2010. Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières.
- [14] DEGHBODJ SAMIR « *Maintenance des Moteurs Diesel* » May 2006 Mémoire Master Université de Tébessa
- [15] LLAURENS JÉRÉMY, « *Mise en place d'un plan de maintenance préventive sur un site de production pharmaceutique* » Thèse présentée pour l'obtention du titre de docteur en pharmacie diplôme d'état, université Joseph Fourier, faculté de pharmacie de Grenoble, 16 Février 2011.
- [16] M. YACINE, « *Alimentation des systèmes de chauffage par induction par un convertisseur à résonance* », Magistère en Electrotechnique, Université Constantine I, Juin 2014.
- [17] S. WANSER, « *Simulation des phénomènes de chauffage par induction. Application à la trempe superficielle* », Thèse doctorat, Edition de l'école doctorale de Lyon des sciences pour l'ingénieur, 1995
- [18] DOTOU SAMUEL & ALLI MAKSSOUD « *conception dimensionnement et réalisation d'un four multi combustible* » mémoire de licence professionnelle en génie Energétique d'institut universitaire de technologie de Iokossa-bénin de juillet 2012
- [19] <https://fr.scribd.com/document/374673951/Generalites-Sur-Les-Fours> visité le 26/03/2022 à 10h30
- [20] <https://carbosystem.com/fr/types-de-fours-industriels/> visité le 22/04/2022 à 13h00
- [21] <http://www.fonderie-vincent.com/n/Lexique-de-la-fonderie/Four-a-induction-i51.html> visité le 28/03/2022 à 14h15
- [22] <http://www.fonderie-ardennes.fr/four-a-induction-17.html>
- [23] RINDRA HARIVELO Nicole « *étude de champ magnétique et de température créés par un four à induction* » mémoire de master de l'université d'Antananarivo sciences et Technologies physique et applications laboratoire de thermodynamique thermique et combustion Madagascar 2018.

- [24] M. Toufik « *Contribution à l'étude théorique d'un four à induction* », Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Université de Batna, 2012
- [25] Commission européenne « *document de référence sur les meilleures techniques disponibles forges et fonderies* » mai 2005
- [26] <https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/pdf/1920/01/lhb1920003.pdf> visité le 29/03/2022 à 16h48
- [27] FOUAGUIG D, DAIS O « *Evaluation du FMD d'un four à arc électrique au niveau l'entreprise d'ALFET Tiaret* », Mémoire Master Université Ibn Khaldoun de Tiaret 2017
- [28] Dr M. Rezig « *Cours Sûreté de Fonctionnement et maintenance* », Faculté Des Sciences et de la Technologie, Université Mohamed Khider de Biskra 2019/2020
- [29] <https://bit.ly/3GKwjgs> visite le 25/05/2022 à 16h45
- [30] M. KADI « *Etude et amélioration FMD d'une motopompe centrifuge* », Mémoire de master professionnel, Université de Ouargla, 2014
- [31] Dr. Belhadj Djilali Abdelkadir « *Maintenance et sûreté de fonctionnement* » polycopié UNIVERSITE DE HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF 2020.
- [32] <https://d1n7iqsz6ob2ad.cloudfront.net/document/pdf/539723b7226b3.pdf> visite le 27/05/2022 à 18h22
- [33] [https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%BBret%C3%A9\\_de\\_fonctionnement](https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%BBret%C3%A9_de_fonctionnement) visite le 21/05/2022 à 14h20
- [34] François Monchy Jean-Pierre Vernier « *Maintenance méthodes et organisations* ». L'usine nouvelle Dunod. Paris, 2000, 2003, 2010.

# Annexes

**Table 01** : Distribution de Weibull (valeurs des coefficients A et B en fonction du paramètre de forme).

$\beta$	A	B	$\beta$	A	B	$\beta$	A	B	$\beta$	A	B
0,05	2,43290E+18	9,03280E+23	1,75	0,89062	0,52523	3,45	0,89907	0,28822	5,15	0,91974	0,20505
0,1	3,62880E+06	1,55977E+09	1,8	0,88929	0,51123	3,5	0,89975	0,28473	5,2	0,92025	0,20336
0,15	2,59357E+03	1,21993E+05	1,85	0,88821	0,49811	3,55	0,90043	0,28133	5,25	0,92075	0,20170
0,2	1,20000E+02	1,90116E+03	1,9	0,88736	0,48579	3,6	0,90111	0,27802	5,3	0,92125	0,20006
0,25	2,40000E+01	1,99359E+02	1,95	0,88671	0,47419	3,65	0,90178	0,27479	5,35	0,92175	0,19846
0,3	9,26053E+00	5,00780E+01	2	0,88623	0,46325	3,7	0,90245	0,27164	5,4	0,92224	0,19688
0,35	5,02914E+00	1,99761E+01	2,05	0,88589	0,45291	3,75	0,90312	0,26857	5,45	0,92272	0,19532
0,4	3,32335E+00	1,04382E+01	2,1	0,88569	0,44310	3,8	0,90379	0,26558	5,5	0,92320	0,19379
0,45	2,47859E+00	6,46009E+00	2,15	0,88561	0,43380	3,85	0,90445	0,26266	5,55	0,92368	0,19229
0,5	2,00000E+00	4,47214E+00	2,2	0,88562	0,42495	3,9	0,90510	0,25980	5,6	0,92414	0,19081
0,55	1,70243E+00	3,34530E+00	2,25	0,88573	0,41652	3,95	0,90576	0,25701	5,65	0,92461	0,18935
0,6	1,50458E+00	2,64514E+00	2,3	0,88591	0,40848	4	0,90640	0,25429	5,7	0,92507	0,18792
0,65	1,36627E+00	2,17887E+00	2,35	0,88617	0,40080	4,05	0,90704	0,25162	5,75	0,92552	0,18651
0,7	1,26582E+00	1,85117E+00	2,4	0,88648	0,39345	4,1	0,90768	0,24902	5,8	0,92597	0,18512
0,75	1,19064	1,61077	2,45	0,88685	0,38642	4,15	0,90831	0,24647	5,85	0,92641	0,18375
0,8	1,13300	1,42816	2,5	0,88726	0,37967	4,2	0,90894	0,24398	5,9	0,92685	0,18240
0,85	1,08796	1,28542	2,55	0,88772	0,37319	4,25	0,90956	0,24154	5,95	0,92729	0,18107
0,9	1,05218	1,17111	2,6	0,88821	0,36696	4,3	0,91017	0,23915	6	0,92772	0,17977
0,95	1,02341	1,07769	2,65	0,88873	0,36097	4,35	0,91078	0,23682	6,05	0,92815	0,17848
1	1,00000	1,00000	2,7	0,88928	0,35520	4,4	0,91138	0,23453	6,1	0,92857	0,17721
1,05	0,98079	0,93440	2,75	0,88986	0,34963	4,45	0,91198	0,23229	6,15	0,92898	0,17596
1,1	0,96491	0,87828	2,8	0,89045	0,34427	4,5	0,91257	0,23009	6,2	0,92940	0,17473
1,15	0,95170	0,82971	2,85	0,89106	0,33909	4,55	0,91316	0,22793	6,25	0,92980	0,17351
1,2	0,94066	0,78724	2,9	0,89169	0,33408	4,6	0,91374	0,22582	6,3	0,93021	0,17232
1,25	0,93138	0,74977	2,95	0,89233	0,32924	4,65	0,91431	0,22375	6,35	0,93061	0,17113
1,3	0,92358	0,71644	3	0,89298	0,32455	4,7	0,91488	0,22172	6,4	0,93100	0,16997
1,35	0,91699	0,68657	3,05	0,89364	0,32001	4,75	0,91544	0,21973	6,45	0,93139	0,16882
1,4	0,91142	0,65964	3,1	0,89431	0,31561	4,8	0,91600	0,21778	6,5	0,93178	0,16769
1,45	0,90672	0,63522	3,15	0,89498	0,31135	4,85	0,91655	0,21586	6,55	0,93216	0,16657
1,5	0,90275	0,61294	3,2	0,89565	0,30721	4,9	0,91710	0,21397	6,6	0,93254	0,16547
1,55	0,89939	0,59252	3,25	0,89633	0,30319	4,95	0,91764	0,21212	6,65	0,93292	0,16439
1,6	0,89657	0,57372	3,3	0,89702	0,29929	5	0,91817	0,21031	6,7	0,93329	0,16332
1,65	0,89421	0,55635	3,35	0,89770	0,29550	5,05	0,91870	0,20853	6,75	0,93366	0,16226
1,7	0,89224	0,54024	3,4	0,89838	0,29181	5,1	0,91922	0,20677	6,8	0,93402	0,16121

## **Résumé**

La maintenance des systèmes industriels est devenue un élément nécessaire pour le développement des entreprises cherchant à conquérir de plus en plus de marchés. Dans notre cas d'étude, on s'intéresse à Les fours à induction qu'ils sont grossièrement utilisés dans la fabrication d'acier à partir de ferraille ou de fer recyclé. Une étude de maintenance de cet outil de production ainsi que l'exploitation des données relatives aux échéances des interventions correctives et préventives nous a permis d'extraire les indicateurs de fiabilité et de calculer les temps optimaux de la maintenance préventive.

Mots clés : les fours à induction, fiabilité, disponibilité, maintenabilité,

الخلاصة :-

أصبحت صيانة النظم الصناعية عنصراً ضرورياً لتنمية الشركات التي تسعى إلى غزو المزيد والمزيد من الأسواق. في دراستنا الإفرادية، نحن مهتمون بأفران الحث التي تستخدم تقريباً في تصنيع الفولاذ من الخردة المعدنية أو الحديد المعاد تدويره. سمحت لنا دراسة صيانة لأداة الإنتاج هذه وكذلك استغلال البيانات المتعلقة بالمواعيد النهائية للإجراءات التصحيحية والوقائية باستخراج مؤشرات الموثوقية وحساب الأوقات المثلى للصيانة الوقائية.

الكلمات الرئيسية: أفران الحث، الموثوقية، التوافر، الصيانة.

## **Abstract**

The industrial maintenance systems have become a necessary element for the development of companies seeking to conquer more and more markets. In our case study, we are interested in the induction furnaces that they are roughly used in the manufacture of steel from scrap metal or recycled iron. A maintenance study of this production tool as well as the exploitation of the data relating to the deadlines of the corrective and preventive actions allowed us to extract the indicators of reliability and to calculate the optimal times of the preventive maintenance.

Key words: the induction furnaces, reliability, availability, maintainability.