

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



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Parcours : Master

Spécialité : Maintenance Industrielle

Thème

Contribution à l'étude de maintenance d'un four électrique

Préparé par :

BAGHDAD Sahraoui & BENDEGHMICHE Abderrezak

Soutenu publiquement le : 15 / 07 / 2021, devant le jury composé de :

M. BOUREGUIG Kada	Maître Assistant "A"(Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. BEY Mohamed	Maître Assistant "B"(Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
Mm.ASRI Aicha	Maître Assistante "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M ^{lle} SLIMANI Halima	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur

Année universitaire : 2020 - 2021

Remerciements

En premier lieu, on remercie Allah le tout puissant qui nous a donné la force et la volonté d'arriver à terme pour achever nos études en master, et de soutenir notre mémoire de fin d'études dans de bonnes et meilleures conditions.

En second lieu nous remercions vivement notre encadreur Dr. SLIMANI HALIMA pour sa disponibilité, ses orientations, ses précieux conseils, ainsi que pour sa patience envers nous durant les longues séances de consultation tenues avec elle.

Nos vifs remerciements aux membres du jury, sans lesquels notre soutenance n'aurait pas pu avoir lieu, et aussi pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail, en acceptant d'examiner notre mémoire et de l'enrichir par leurs propositions.

*Nous tenons évidemment à remercier M. **Debush Ahmed** et les membres du groupe **ALFET** pour leur aide très précieuse et les nombreux conseils qu'ils nous ont donnés tout au long de ce travail.*

Nous exprimons notre gratitude à tous les enseignants du département de génie mécanique

Je ne peux oublier d'exprimer notre gratitude à nos amis pour leurs encouragements et leur soutien moral.

Notre gratitude aux parents pour leur soutien et leur aide inestimables

Qu'ils ont fourni au cours de nos nombreuses années d'études.

Dédicaces

Nous dédions ce mémoire à :

-Mes parents qui m'ont beaucoup aidé durant mes études, et m'ont tellement encouragé moralement et psychologiquement, ils se sont sacrifiés pour moi durant toute la période de mes études, que DIEU les protègent,

-toute ma famille sans exception,

-tous mes amis de la promotion du Maintenance industrielle sans citer les noms,

-tous ceux qui m'ont aidé durant ma vie universitaire.

Baghdad Sahraoui

-Mes parents qui m'ont beaucoup aidé durant mes études, et m'ont tellement encouragé moralement et psychologiquement, ils se sont sacrifiés pour moi durant toute la période de mes études, que DIEU les protègent,

-toute ma famille sans exception,

-tous mes amis de la promotion du Maintenance industrielle sans citer les noms,

-tous ceux qui m'ont aidé durant ma vie universitaire.

Bendeghmiche Abderezak

SOMMAIRE

Abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 02

Chapitre I : Présentation des fours électrique

I.1. Introduction.....04

I.2. Définition du four.....04

I.2.1. Principe des fours04

I.2.2. Structure des fours05

I.2.3. Classification des fours05

I.2.3.1. Classification par fonction05

I.2.3.2. Classification par groupe05

I.2.3.3. Classification selon le mode de chargement.....06

I.3. Définition de four électrique06

I.3.1. Différents types de fours électriques06

I.3.1.1. Fours électriques à résistance.....06

I.3.1.2. Four électrique à induction08

I.3.1.3. Four à micro onde11

I.3.1.3. Four á moufle de laboratoire13

I.3.1.4. Four á arc électrique14

I.4. Conclusion15

Chapitre II : Four a arc électrique

II.1. Introduction17

II.2. Présentation générale du four à arc17

II.3. Évolution du four électrique a arc depuis 1950.....18

II.4. Arc électrique.....19

II.4.1. Définition.....19

II.4.2. Propriétés19

II.4.3. Choix de puissance et longueur de l'arc.....20

II.5. Principe du four à arc électrique20

II.6. Les type des fours a arc22

II.6.1 Four à arc d'après leur nature d'arc	22
II.6.2. Four à arc d'après leur nature d'alimentation	23
II.6.2.1. Four alimenté en courant alternatif	23
II.6.2.2. Four alimenté en courant continu	24
II.7. Description technologique.....	25
II.7.1. Constitution du four a arc électrique	26
II.7.1.1. Système de basculement du four.....	27
II.7.1.2. Système de blocage de la plate-forme	27
II.7.1.3. Cuve et panneaux refroidis	27
II.7.1.4. Cuve inférieur	27
II.7.1.5. Cuve supérieur	27
II.7.1.6. Porte de décrassage	27
II.7.1.7. EBT (dispositif de coulée en poche à trou excentrique)	27
II.7.1.8. Lance d'ouverture EBT	28
II.7.1.9. Ensemble de levage et rotation de la voûte	28
II.7.1.10. Ensemble de levage des électrodes	28
II.7.1.11. Bras porte-électrodes conducteur.....	29
II.7.1.12. Circuit secondaire.....	29
II.7.1.13. Les électrodes.....	29
II.7.1.14. Système de graissage	30
II.7.1.15. Système de refroidissement	30
II.7.1.16. Système hydraulique	31
II.7.1.17. Chariot poche	31
II.8. Les matières premières utilisées dans le four à arc.....	31
II.9. L'énergie électrique	32
II.9.1. Utilisation d'autres sources d'énergie	32
II.10. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU FOUR A ARC	33
II.11. CONCLUSION.....	34

Chapitre III: Analyse FMD du four à arc électrique

III.1.Introduction	36
III.2.Présentation de l'application utilisé.....	36
III.2.1.Analyse FMDS	36
III.2.1.1. La Fiabilité	36

III.2.1.2. Maintenabilité	39
III.2.1.3. Disponibilité	40
III.2.1.4. Sécurité	41
III.2.2. Analyse de PARETO	42
III.3. Présentation d'historique des pannes du four à arc électrique	42
III.4. Méthode d'analyse prévisionnelle de Pareto	44
III.4.1. Cumul des causes d'arrêt	44
III.4.2. Diagramme de Pareto(ou méthode ABC)	46
III.5. L'analyse FMD	47
III.5.1. Calcul les paramètres de Weibull	47
III.5.2. Papier de Weibull	48
III.5.3. KOLMOGOROV SMIRNOV K-S.....	49
III.5.4. Exploitation les paramètres de Weibull	50
III.5.5. Étude du modèle de Weibull	51
III.6. La maintenabilité	55
III.7. La disponibilité	56
III.7.1. La disponibilité intrinsèque théorique	57
III.7.2. La disponibilité instantanée.....	57
III.8. Conclusion	59
Conclusion générale	61
Références bibliographiques	63
Annexes	67

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
MTTF	Temps moyen jusqu'à l'échec
γ	Paramètre de position
η	Paramètre d'échelle
β	Paramètre de forme
M(t)	La fonction de la maintenabilité
MTTR	La durée moyenne jusqu'à la réparation d'une entité réparable
$\mu(t)$	Taux de réparation
g(t)	Intensité de réparation
A(t)	La fonction de la disponibilité
D(t)	La fonction de la disponibilité instantanée prévisionnelle
MUT	Durée moyenne de fonctionnement après la réparation
MDT	Durée moyenne entre une défaillance et la remise en état suivante
$\overline{M(t)}$	La fonction de l'immaintenabilité

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1	fours électriques à résistances	07
Figure I.2	Four électrique à induction	08
Figure I.3	isolation de bobine de four à induction	08
Figure I.4	schéma de frittage par induction	09
Figure I.5	fonderie a lu chauffe par induction	09
Figure I.6	four à creuset	09
Figure I.7	isolation de bobine de four à creuset	09
Figure I.8	four à induction à canal	10
Figure I.9	Four à micro-onde	11
Figure I.10	les principaux composants de micro-onde	13
Figure I.11	four á moufle de laboratoire	13

Chapitre II

Figure II.1	Vue extérieure d'un four à arc à courant alternatif	18
Figure II.2	La courbe $U_a=f(I)$	20
Figure II.3	Four à arc à courant alternatif	21
Figure II.4	Alimentation de four à arc à courant alternatif	24
Figure II.5	Alimentation de four à courant continu	25
Figure II.6	Les équipements d'un four à arc	26
Figure II.7	circuits de refroidissement	30
Figure II.8	ferrailles	32

Chapitre III

Figure III.1	Représentation sur graphique à échelle fonctionnelle de la distribution de Weibull	39
Figure III.2	Relations entre les liens temporels en fiabilité, disponibilité et maintenabilité	40
Figure III.3	Diagramme de Pareto(ou méthode ABC)	46
Figure III.4	La représentation graphique de la fonction de répartition sur le papier de Weibull	48
Figure III.5	courbe de La fonction de la densité de probabilité	52
Figure III.6	courbe de la fonction de répartition $F(t)$	53
Figure III.7	courbe de la fiabilité $R(t)$	54
Figure III.8	courbe du taux de défaillance $\lambda(t)$	55
Figure III.9	courbe de la maintenabilité $M(t)$	56
Figure III.10	courbe de la disponibilité instantanée $D(t)$	58

Liste des tableaux

Tableau.III.1	Dossier historique de four à arc électrique	43
Tableau.III.2	Cumul causes d'arrêt du four à arc électrique	45
Tableau.III.3	Calcule la fonction de répartition	47
Tableau.III.4	Paramètres de calcul de fiabilité	48
Tableau.III.5	Paramètre de calcul le maximum en valeur absolue	49
Tableau.III.6	Calcul la fonction de la densité de probabilité	52
Tableau.III.7	Fonction de répartition F (t)	53
Tableau.III.8	Calcul de la fiabilité	54
Tableau.III.9	Calcul du taux de défaillance	55
Tableau.III.10	Calcul de la maintenabilité	56
Tableau.III.11	Calcul de la disponibilité	57

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

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

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

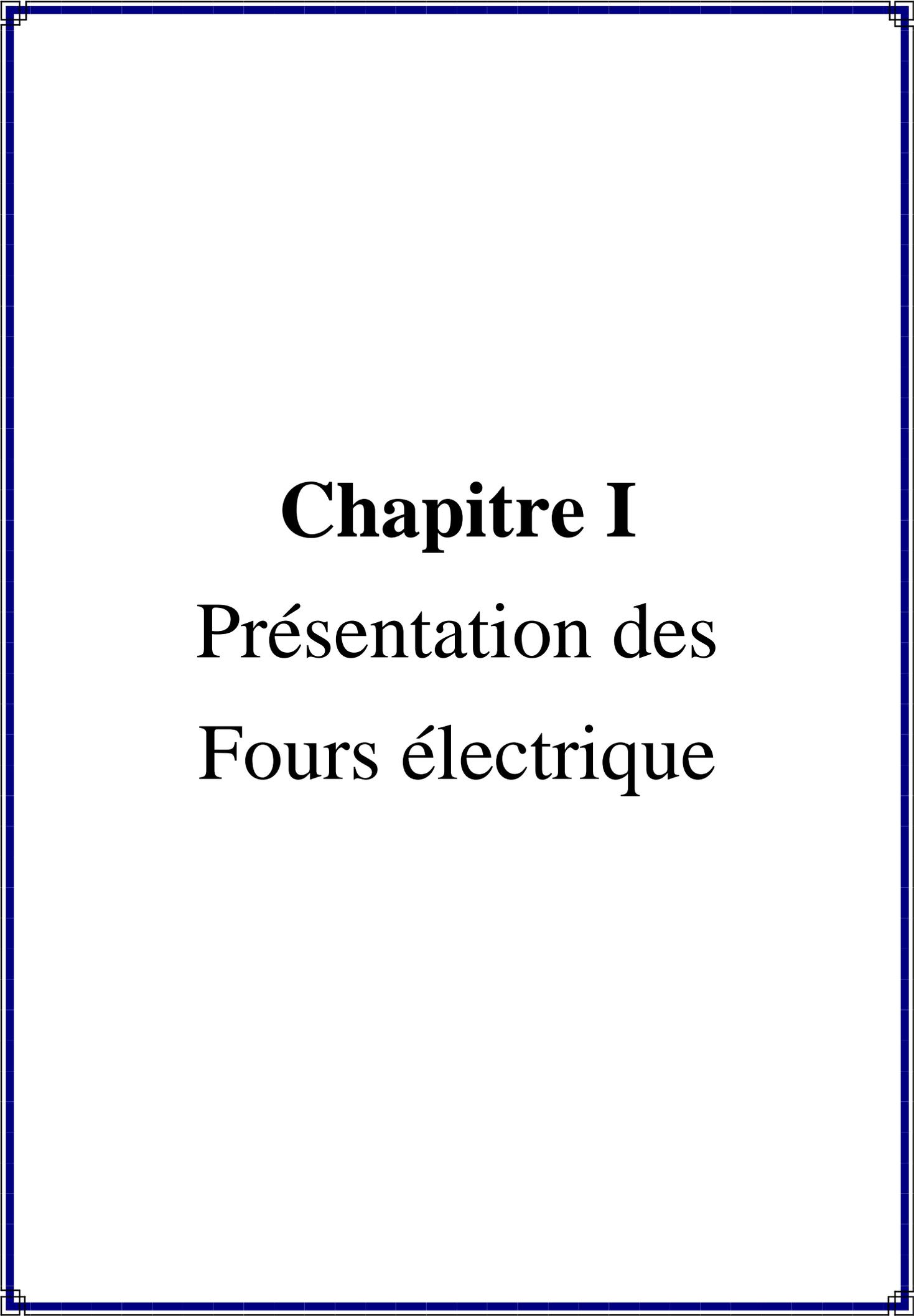
L'application des méthodes prévisionnelles de maintenance à des équipements de production est moins coûteuse que la perte de production due à un arrêt de l'équipement. L'arrêt d'une seule machine peut entraîner l'arrêt de toute la ligne de production.

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

Pour ce faire, notre manuscrit a été organisé en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à la "*Présentation des fours électrique*". Le deuxième chapitre présente une étude bibliographique sur « *les fours à arc électrique* ».

Le troisième chapitre sous l'intitulé : « *Analyse FMD du four à arc électrique* » expose l'application pratique de FMD sur l'équipement de Production étudiée (four à arc).

Et bien-sûr on clôture ce manuscrit par une conclusion qui donne un aperçu globale de tout le travail et des recommandations pour l'avancement de ce projet.



Chapitre I

Présentation des Fours électrique

I.1 Introduction

Les fours (étuves) se rencontrent dans un grand nombre de secteurs industriels mais principalement dans l'industrie des métaux, des matériaux et des céramiques. Le choix des équipements et des fonctions des fours et étuves dépend des applications et des besoins de l'utilisateur. Les aspects énergétiques et les modélisations avec un logiciel approprié permettent de les comprendre et de les maîtriser. Les modes de conduite de ces outils de production sont en rapport avec les besoins et les contraintes thermique [1].

Dans le domaine industriel, on trouve différents types de fours à titre d'exemple:

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

L'objectif de ce chapitre est de décrire les fours électriques en général et de définir leurs types.

I.2 Définition de four

C'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 [2].

I.2.1 Principe de fonctionnement général des fours

Principe de fonctionnement général du four est simple : l'objet à cuire y est enfermé pour être soumis à la chaleur interne du four. Cette chaleur provient d'une source de chaleur externe aux parois interne du four .la chaleur à l'intérieur du four peut être répartie par forçage de la circulation de l'air, ou par convection naturelle [2, 3].

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

- Un combustible (bois, gaz naturel...)
- L'électricité dans des résistances
- Des micro-ondes encore avec l'électricité
- La lumière (four solaire)

I.2.2 Structure fours

Compte tenu des températures élevées impliquées, il est nécessaire que la structure du four soit faite de telle manière à ne pas se disperser en dehors de la chaleur produite pour chauffer le métal. Par conséquent, il est nécessaire que l'intérieur du four, contienne une isolation thermique, apte à retenir la chaleur à l'intérieur de la chambre. Les matériaux les plus utilisés sont des briques réfractaires préformés / ou des modules / panneaux de fibres de céramique; la structure externe du four est à la place du métal [4].

I.2.3 Classification des fours

I.2.3.1 Classification par fonction

Ils peuvent être classés selon leurs fonctions: la fusion, le traitement thermique, la cuisson, le séchage [5].

I.2.3.2 Classification par groupe

Ils peuvent être également séparés en deux groupes [5, 6] :

- Fours discontinus appelés aussi fours intermittents ou fours à charge.
- Fours continus appelés fours tunnels ou fours à passage.

a. Four continu

Un four continu fonctionne en régime thermique établi. La charge traverse le four et le cycle de température est réalisé sur la longueur du four au cours de l'avancement de la charge. Chaque section du four est à température constante dans le temps, température qui lui est propre pour un cycle de traitement donné. Les pertes globales du four sont constantes pour un cycle donné.

Les différents fours continus sont :

- Les fours à pousseuse (fours à rails intérieurs, fours à galets intérieurs).
- les fours à traction de feuillard.
- les fours à sole inclinée.
- les fours à sole vibranteetc.

b. Four discontinu :

Le produit à chauffer est immobile dans le four ; il est chargé et déchargé (enfourné et défourné) au même endroit [6]. C'est le cas :

- des fours à sole mobile de forge.
- des fours à soles fixes de traitement thermique.
- des fours à cloches mobiles et élévateurs.

I.2.3.3. Classification selon le mode de chargement :

Les différents modes de chargement ou de manutention sont les suivants [5] :

a. Chargement horizontal :

- fours à sole horizontale.
- fours à chargeuse.
- fours à sole mobile.

b. Chargement vertical :

- fours puits.
- fours à cloche.

c. Manutention discontinue :

- manuellement dans les fours à sole fixe.
- par pelles à roulettes, par fourches.
- par palans, par ponts roulants.
- par chargeuses à bras mobile.
- par sole mobile.

d. Manutention continue :

- par gravité ;
- par secousses ou par vibrations de la sole ;
- par pousseuse : fours à sole rainurée (métallique ou réfractaire), fours à tubes-moufles, fours à galets intérieurs ;
- par traction : fours à bandes, à fils ;
- par chaîne ;
- par convoyeur extérieur : fours à bain de sels ;
- par tablier sans fin, glissant sur le sol ou sur des rouleaux ;
- par longerons placés en sole

I.3 Définition de four électrique

Le four électrique 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. Cependant lorsque la chaleur est tirée de l'électricité on le qualifie de four électrique [2].

I.3.1 Différents types des fours électriques

I.3.1.1 Fours électriques à résistance

Un four à résistances (Figure I-1) 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 [7].

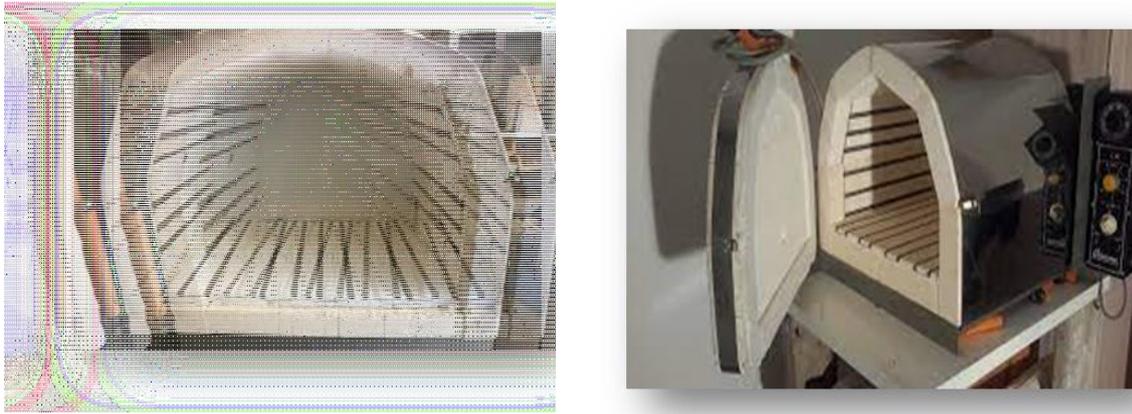


Figure I-1 : fours électriques à résistances [7].

a. Principe de fonctionnement

Il est extrêmement simple : le four est constitué d'une enceinte chauffée à l'aide de résistances électriques, très bien calorifugée pour réduire le plus possible les déperditions thermiques. La charge à chauffer est placée dans cette enceinte. Le four à résistances est un équipement à chauffage indirect, la chaleur produite par effet Joule par les résistances est transmise à la charge par rayonnement et convection [7].

b. Les différents types de fours à résistances

- Fours à sole
- Fours à cloche
- Fours à plateau tournant
- Fours à chaînes et à convoyeur
- Fours continus à tablier, à tapis ou à bande
- Fours à wagonnets
- Étuves électriques
- Fours spéciaux... [7].

c. La classification des fours à résistances

La classification des fours à résistances repose sur les critères suivants :

- *La nature des résistances* : Fours électriques à résistances Technologies de mise en œuvre et leur position par rapport à la charge (rayonnement direct ou indirect, convection forcée, ventilation de la chambre de chauffe).
- *Le mode d'utilisation du four* : continu ou chauffage au défilé, discontinu, utilisant des charges fixes ou statiques.
- *Le mode de manutention* : (tapis continu, vibrations, vis hélicoïdale, logerons mobiles...).

- *La nature de l'atmosphère et du milieu* : ambiance (air), atmosphère contrôlée, vide, milieu liquide, bain fluidisé.
- *Le mode de transmission de la chaleur* : rayonnement
- *L'utilisation du four dans le procédé industriel* : réchauffage, traitement thermique, cuisson, polymérisation, stabilisation, fusion, séchage, étuve... .
- *La forme du four* : (à chambre, à sole mobile, puits, creuset, élévateurs, à tambours, à cloche...) [7].

I.3.1.2 Four à induction

C'est un four de fusion électrique dans lequel la chaleur nécessaire à la fusion est apportée par effet induction entre une bobine primaire et une bobine secondaire. Dans les fours dits "à canal" la bobine secondaire est constituée par un canal du métal à fondre en forme de boucle (figure I- 2et I-3) [8].



Figure I-2 : four induction [8].



Figure I-3 : isolation de bobine de four à induction [8].

a. Principe

Un four à induction est un appareil doté d'un système de chauffage par induction, transformant l'état des objets métalliques solides en liquides, par la chaleur. A la limite, ce type de four est assimilable à un transformateur dont l'enroulement primaire est relié à une source de tension sinusoïdale et le secondaire est en court-circuit [9].comme il est présenté dans les deux figures (I- 4et I-5).

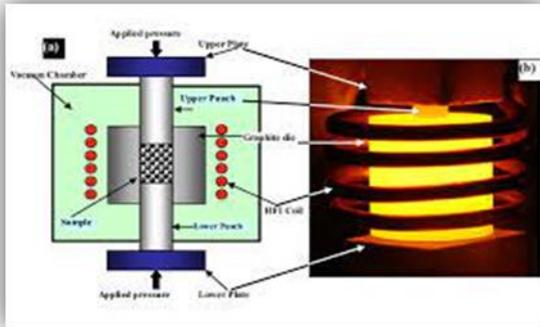


Figure I-4:schéma de frittage par induction [8]. **Figure I-5:**fonderie a lu chauffé par induction [8].

b. Types de four à induction

Le four à induction se compose de deux grands types, qui sont les suivants :

- **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 [9]. (figure I-6 et I-7)

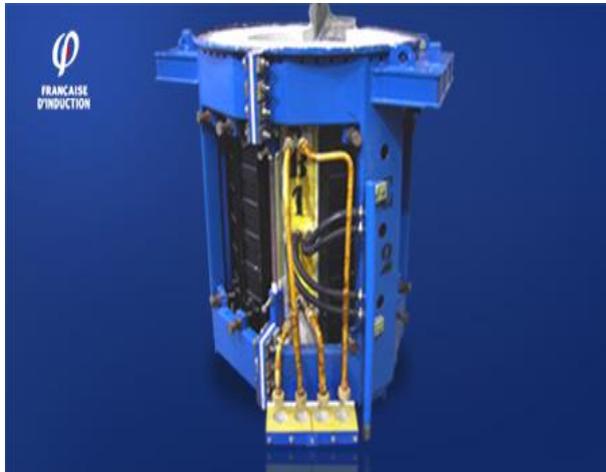


Figure I-6 : four à creuset [8].



Figure I-7:isolation de bobine de four à creuset [8].

- **Four à canal**

Dans les fonderies de métaux ferreux, le four à induction à canal est principalement utilisé comme four de maintien. Il s'agit du four préféré pour une double opération avec le cubilot à vent chaud. Dans ce cas, sa fonction consiste soit à maintenir soit à homogénéiser la composition chimique du métal, soit à servir de réservoir le métal fondu pour le coulée comme il est indiqué à la figure I-8. Le rôle du four n'est pas d'augmenter la température du métal, mais plutôt d'empêcher un refroidissement non souhaité [10].



Figure I-8 : four à induction à canal [8].

c. **Caractéristiques du four à induction**

Les propriétés physiques des matériaux surtout celles du corps à fondre et de la bobine jouent un rôle important sur la durée de temps de fonte. Plus le champ magnétique à l'intérieur de la masse métallique est intense, plus la densité de courant de Foucault et la température du métal sont élevés et le temps de fusion sera court. D'après l'étude de la distribution du champ magnétique et celle de la température, nous proposons quelques propriétés de matériaux :

- On doit utiliser des couches minces afin de maximiser la densité de flux magnétique arrivant au métal
- Ecran imperméable au champ magnétique mais robuste.
- Isolant perméable au champ magnétique, résistant à la chaleur et peut filtrer la chaleur de la bobine.
- Réfractaire perméable au champ magnétique, résistant à la chaleur
- Une bobine à température de fusion élevée [9].

d. 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 [11].

I.3.1.3 Four à micro-onde

C'est un appareil électroménager utilisé principalement pour le chauffage et la cuisson rapide d'aliments, par freinage de l'agitation des molécules d'eau qu'ils contiennent sous l'effet d'un rayonnement micro-onde (figurent I-9) [12].

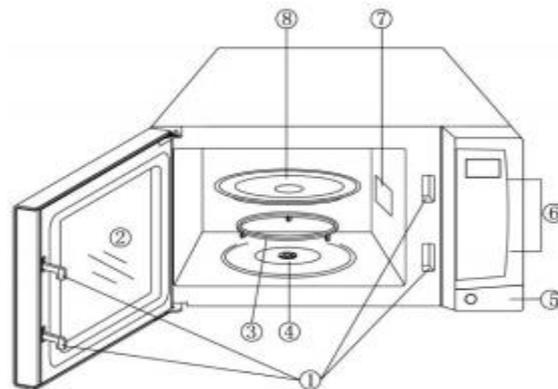


Figure I-9 : Four à micro-onde [12].

a. Fonctionnalités

1. Système de verrouillage de sécurité de la porte
2. Fenêtre du four
3. Anneau de roulement
4. Arbre
5. Bouton d'ouverture de la porte (Remarque: certains modèles peuvent avoir une poignée au lieu d'un bouton d'ouverture de porte.)
6. Panneau de configuration
7. Feuille de mica (ne pas retirer)
8. Plateau en verre ... [13].

b. Principe De Fonctionnement D'un Four À Micro-Ondes

L'élément principal du four à microondes est le magnétron, un dispositif qui transforme l'énergie électrique en énergie électromagnétique sous forme de micro-ondes. Un vaste champ d'ondes électromagnétiques est créé dans la cavité du four. Les micro-ondes font vibrer les molécules d'eau contenues dans les aliments et la friction entre ces molécules produit de la chaleur. Enfin, la chaleur se diffuse dans les aliments. Dans certains modèles un brasseur d'ondes participe à la répartition de l'énergie électromagnétique. Dans d'autres modèles un plateau tournant permet également cette répartition [14,15].

c. Les trois propriétés principales d'un Four À Micro-Ondes

Les micro-ondes ont 3 propriétés principales [14], à savoir :

- *Absorptivité* : Le chauffage s'effectue par agitation des molécules d'eau contenues dans les aliments.
- *Pénétrabilité* : Les micro-ondes peuvent pénétrer à travers la vitrocéramique, le verre et le plastique. Utilisez donc des plats et récipients laissant l'énergie des microondes les traverser pour une efficacité maximale.
- *Réfectivité* : Pour assurer une cuisson uniforme des aliments, les parois métalliques de la cavité du four font rebondir les micro-ondes et un plateau tournant permet une distribution homogène des micro-ondes aux aliments.

d. Les principaux composants

La figure I-10 présente les principaux composants d'un Four À Micro-ondes qui sont [12]:

- Transformateur
- Condensateur
- Magnétron
- Ventilateur
- Diode haut tension
- Fusible de puissance
- Mini-rupture
- Circuit de command

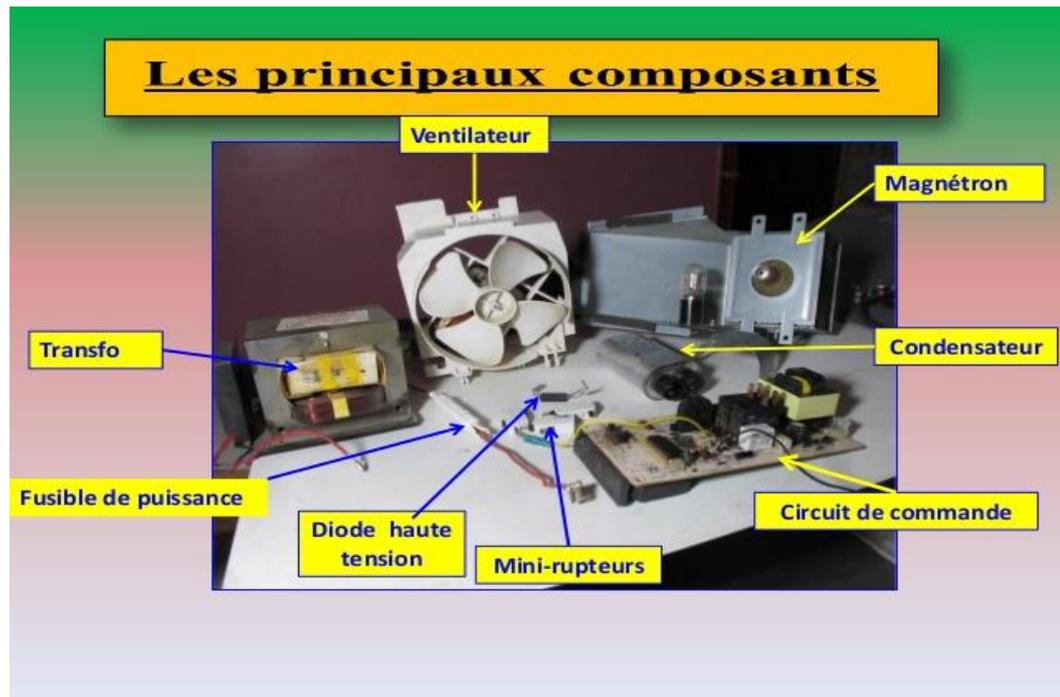


Figure I-10 : les principaux composants de micro-onde [12].

I.3.1.4 Four à moufle de laboratoire MF 1000°C, 1200°C, 1300°C ou 1400°

Ces fours on les trouve dans le domaine de la recherche et du laboratoire (figure I-11). Ils sont étudiés de façon optimale pour l'incinération et le traitement thermique. Grâce à leur excellente isolation ils sont particulièrement économes et le temps de chauffage est réduit en raison de la chaleur emmagasinée et la conductibilité thermique réduite. Les fours de laboratoire atteignent des températures de chambre de 1100 °C (2012 °F), 1200 °C (2192 °F) ou 1300 °C (2372 °F) max [16]



Figure I-11 : four à moufle de laboratoire [18].

a. Principe

Semblable à un four, un four à moufle repose sur une unité de contrôle qui introduit de la chaleur par voie électronique à des températures extrêmement élevées dans une zone fermée et isolée. L'appareil est généralement petit et peut être utilisé sur une table. Historiquement, un four à moufle était un four capable d'atteindre des températures élevées avec une chambre de chauffage isolée de la source de combustible et des sous-produits créés. Dans le passé, les sources de combustible pouvaient inclure du bois ou du combustible liquide. Les fours à moufle sont généralement utilisés dans des laboratoires artisanaux, industriels et scientifiques [17].

b. Caractéristiques standard

- Chauffage du moufle par 4 côtés
- Volumes de chambre
- Chauffage rapide
- Compact et léger
- Porte à action parallèle
- Briques réfractaires à faible densité et fibres isolantes
- Double isolation comprend une chambre à air
- Chambre intérieure en acier inoxydable
- Pertes de chaleur et température extérieure minimale... [18].

I.3.1.5 Four à arc électrique

Un four à arc électrique est utilisé dans la production d'acier pour fondre des ferrailles d'acier. Il utilise de l'énergie électrique pour faire fondre les ferrailles. Un arc électrique se forme entre la charge et les électrodes. La chaleur engendrée par l'arc fait fondre les ferrailles. 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.

I.4. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons dédié notre étude à ce que sont les fours en général, et en particulier les fours électrique, cependant ce chapitre est une présentation préliminaire du sujet et on va préciser et étudie notre type de four électrique dans le chapitre suivant.

Chapitre II

Four à arc électrique

II.1 Introduction

Le four à arc a été appliqué industriellement à la fabrication de l'acier au début du XX^e siècle. Sa flexibilité a permis de simplifier le processus de production des aciers courants grâce aux mini-usines. Le four à arc est aujourd'hui, dans beaucoup de cas, l'outil de fusion le mieux adapté. Aujourd'hui 35% des aciers dans le monde proviennent de fours à arc [19].

Initialement, le four comporte trois électrodes reliées chacune à une borne d'une source triphasé à courant continu ou alternatif. La capacité de fusion de ces fours était de l'ordre de quelques dizaines de tonnes.

En effet, la capacité de production des fours modernes avoisine les 200 tonnes avec une consommation énergétique comprise entre 400 et 500 kWh/t. ils représentent une part importante de la consommation d'énergie électrique dans le domaine industriel [20].

II.2 Présentation générale du four à arc

Le four à arc est constitué essentiellement d'une cuve garnie de matériaux réfractaires, basculante pour la coulée et le décrassage, et destinée à recevoir la charge métallique qui est fondue au moyen d'un ou plusieurs arcs électriques jaillissant entre les électrodes en graphite et la charge. **La figure II-1** présente la structure d'un four à arc à courant alternatif. A l'origine, le four à arc était utilisé essentiellement pour la production des aciers spéciaux, car il permet non seulement d'atteindre des températures élevées (supérieur à 1650°C), mais aussi de réaliser un affinage sur mesure en assurant au choix une atmosphère oxydante et/ou réductrice. Au fil des années, le four à arc a connu des perfectionnements spectaculaires et est devenu un réacteur métallurgique multi-énergies. La réduction des durées d'affinage de l'acier liquide et l'accroissement de la puissance massique, ont permis d'améliorer sa compétitivité en augmentant la productivité et en diminuant la consommation d'énergie.

Les fours à arc sont aujourd'hui largement utilisés et représentent, dans beaucoup de cas, l'outil de fusion le mieux adapté. Ainsi, la gamme de produits finis obtenus s'étend en nécessitant l'utilisation de nombreuses matières premières [19].

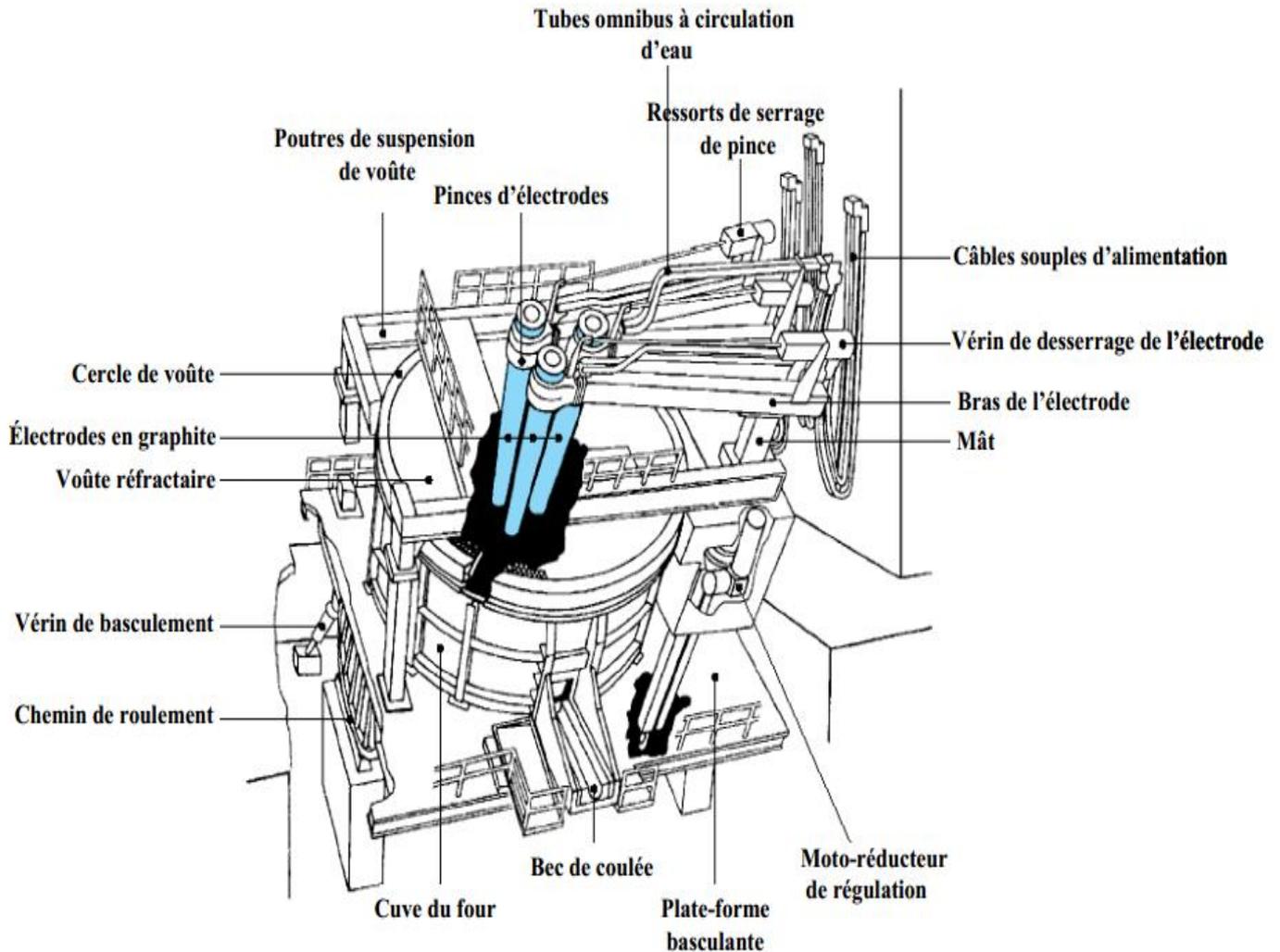


Figure II-1 : Vue extérieure d'un four à arc à courant alternatif [19].

II.3 Évolution du four électrique à arc de puis 1950

Avant la Seconde Guerre mondiale, le four électrique, par la lenteur même de l'opération, était réservé à l'élaboration d'aciers spéciaux. Les progrès réalisés pendant la guerre, en taille et puissance des unités, permirent, dès 1950, au four électrique de rivaliser avec le four Martin pour l'élaboration d'aciers au carbone à partir de ferrailles, avec la construction d'aciéries de 500 000 à 1 000 000 t/an, comportant des unités de 150 à 200 t (rapport 1953 du Battelle Memorial Institute).

Parallèlement, le four électrique de plus petite taille se développait dans les mini-aciéries (mini-Mills) américaines, puis italiennes, et surtout après que l'apparition de la coulée continue ait permis d'abandonner la coulée en petits lingots, dispendieuse et cause de défauts.

À partir du début des années 1960, et jusqu'au début du 21^e siècle, une série d'améliorations allaient faire du four électrique un outil hautement performant [21].

II.4 Arc électrique

II.4.1 Définition

L'arc électrique est la manifestation du passage du courant entre deux électrodes dans un milieu ionisé (air ou gaz particulier), il est caractérisé par une tension basse et un fort courant. Un arc électrique peut être obtenu entre deux électrodes de charbons soumises à une différence de potentiel convenable. Lorsque l'arc jaillit entre les électrodes, la différence de potentiel entre celle-ci devient faible : L'ionisation intense de l'espace inter- électrodes a rendu cette espace brutalement très conducteurs alors qu'il était isolant (ou presque) avant l'amorçage. On s'explique ainsi que :

- Un arc doit être préalablement amorcé pour amener à l'incandescence un point de la cathode ; le mode d'amorçage le plus simple consiste à mettre en contact l'électrodes. Ce contact, toujours imparfait, presque une résistance « R » appréciable et, si le courant qui la traverse a une intensité « I » suffisante (produit RI^2 assez grand), les surfaces en contact sont portées et l'incandescence. Cela explique qu'un arc ne puisse subsister avec une cathode froide ; par exemple, avec une cathode dans l'huile, surtout si celle-ci est en cuivre (bonne conductivité thermique), le maintien de l'arc est plus difficile.
- La décharge par arc exige un minimum de tension et un maximum de courant. Le minimum de tension est compris entre 10 et 20 V suivant le gaz et la distance entre les électrodes à courant égale, quand on écarte les électrodes, la tension de l'arc s'accroît.

II.4.2 Propriétés

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

$$U_a = R_a \cdot I \quad (\text{II-1})$$

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

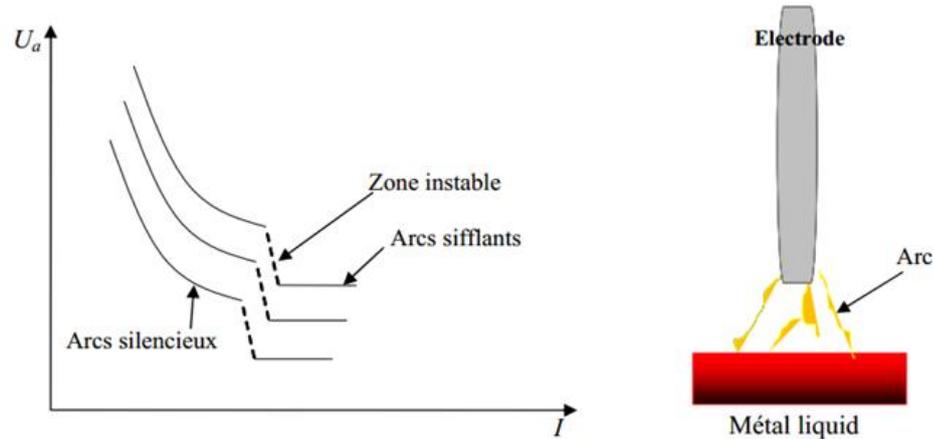


Figure II-2 : La courbe $U_a=f(I)$.

II.4.3 Choix de puissance et longueur de l'arc

- Démarrer la fusion par une faible puissance avec un arc court.
- Dès que les électrodes pénètrent dans la charge, mettre la pleine puissance.
- Lorsque les électrodes arrivent tout près de la sole du four, il faut réduire la longueur de l'arc.
- Remettre la pleine puissance jusqu'à la « fin » de la fusion.
- A la fin de fusion (marquée par la chute des ferrailles), il est recommandé de réduire la puissance (arcs courts) et de former un laitier protecteur [22].

II.5 Principe du four à arc électrique

En effet, l'arc électrique est la manifestation du passage du courant entre les électrodes dans un milieu gazeux ionisé à la pression atmosphérique ou à une pression différente. Il permet de mettre en œuvre des puissances très élevées et d'atteindre des températures de l'ordre de 4000°C. Un courant traversant un arc électrique est généralement intense et variable. C'est pourquoi un arc électrique cause de fortes perturbations électriques. Dans le modèle physique du four à arc **Figure II-3** il y'a trois électrodes qui se déplacent verticalement en haut et en bas à l'aide des vérins hydrauliques. Théoriquement, le minerai est fondu lorsque les électrodes subissent une puissance énorme. Puisque la densité du produit réel est plus grande que son résidu, le minerai se sédimente au fond du four en créant la matte. Au-dessus de la matte se trouve les scories ou les résidus. En revanche, c'est la chaleur énorme créée par les électrodes qui permet au minerai de se liquéfier et de se séparer. Toutefois, selon les mécanismes de conversion de la puissance en chaleur et selon le transfert de la chaleur libérée à la charge. Contrairement à un haut fourneau, un four à arc ne fonctionne pas en coulée continue. En fonction de la capacité de la cuve, une certaine quantité de ferraille est introduite dans la cuve puis est progressivement liquéfié avant d'être extraite de celle-ci.



Figure II-3 : Four à arc à courant alternatif.

Un tel cycle se fait en plusieurs étapes :

1^{ère} étape : Chargement du four :

A l'aide du panier à ferraille, on verse la matière première dans la cuve. Celle-ci est principalement composée de différents types de ferrailles préalablement mélangés afin d'avoir une qualité constante. Une fois la charge insérée, on ferme la cuve [23].

2^{ème} étape Phase de fonte :

Une fois le couvercle hermétiquement posé sur la cuve, on insère les électrodes dans celle-ci.

Dès la mise sous tension, l'énergie thermique dégagée par les arcs électriques commence à faire fondre les ferrailles situées à proximité des électrodes. Au fur et à mesure de la fonte de la charge

située en surface, les électrodes sont abaissées afin de liquéfier progressivement toutes les ferrailles contenues dans le four .Lors de cette phase, différents éléments sont injectés dans le four :

- La chaux servant à la constitution du laitier en surface.
- Le laitier est un produit apparaissant lorsque l'on fait fondre de l'acier. Il rassemble les impuretés qui s'échappent lors de la fusion du carbone, nécessaire à la formation d'un laitier moussant et à la réduction partielle de l'oxyde de fer. Avec un laitier moussant, l'arc électrique est noyé dans le laitier, ce qui donne un fonctionnement électrique plus stable et surtout améliore le rendement thermique du four en évitant le rayonnement de l'énergie de l'arc vers les parois de l'oxygène qui a pour rôle d'accélérer la décarburation de la charge, en brûlant le carbone en monoxyde et en dioxyde de carbone du gaz naturel, dont le rôle est d'apporter une énergie thermique supplémentaire et de permettre une fusion plus régulière de la charge.
- Différents éléments d'addition en fonction du type d'acier que l'on veut produire. Ceux-ci sont injectés en fin de fusion, pendant la période d'affinage [23].

3^{ème} étape: Coulée :

Une fois que toute la charge est liquéfiée, le laitier qui se trouve en surface est extrait en faisant basculer le four d'un angle de quelques degrés. Enfin, on continue à basculer la cuve jusqu'à ce que l'ensemble de l'acier liquéfié se soit écoulé. Une fois cette opération effectuée, le four se remet dans sa position initiale, les électrodes sont extraites de la cuve et le couvercle est retiré afin de démarrer un nouveau cycle de fonte. La durée d'un cycle, appelé temps de coulé-à-coulé, varie entre 35 et 80 minutes et dépend de la taille du four, de l'acier à produire ou encore du type de ferrailles utilisé. On peut toutefois considérer qu'une telle opération dure en moyenne 45 à 50 minutes pour des fours de capacité standards, c'est-à-dire entre 80 et 150 tonnes par cycle [23].

II.6 Les type des fours à arc

II.6.1 Four à arc d'après leur nature d'arc

- **Four à arc libre :**

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

- **Four à arc sur résistance :**

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

- **Four à arc sur charge :**

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

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

Applications

Les fours à arc libre, dont la capacité s'échelonne entre 100 KVA et 500 KVA environ, sont surtout utilisés pour l'élaboration de métaux (fonte alliage, bronze, etc.,...) qui ne peuvent être obtenus dans des conditions économiquement satisfaisantes avec les autres types de fours. Jusqu'à une époque récente, les fours à arc sur charge étaient utilisés pour l'élaboration d'aciers spéciaux, mais depuis 1950, des travaux menés par sidérurgies et des électriciens ont permis des accroissements considérables des puissances. Ces fours, dites à ultra haute puissance ou productivité « U.H.P » peuvent fournir des dizaines de mégawatts ; ils sont alimentés à partir du réseau haute tension et permettent la production économique d'acier ordinaire à une cadence rapide [25 ; 26].

II.6.2 Four à arc d'après leur nature d'alimentation

II.6.2.1 Four alimenté en courant alternatif

Le four électrique de fusion type Héroult est triphasé. Il contient trois électrodes verticales en graphite. Les arcs se développent entre chacune des trois électrodes en graphite et le métal. Sa tension d'arc diminue quand le courant augmente ; un arc pour aurait une caractéristique hyperbolique. En fait, le système possède toujours une impédance non linéaire [27].

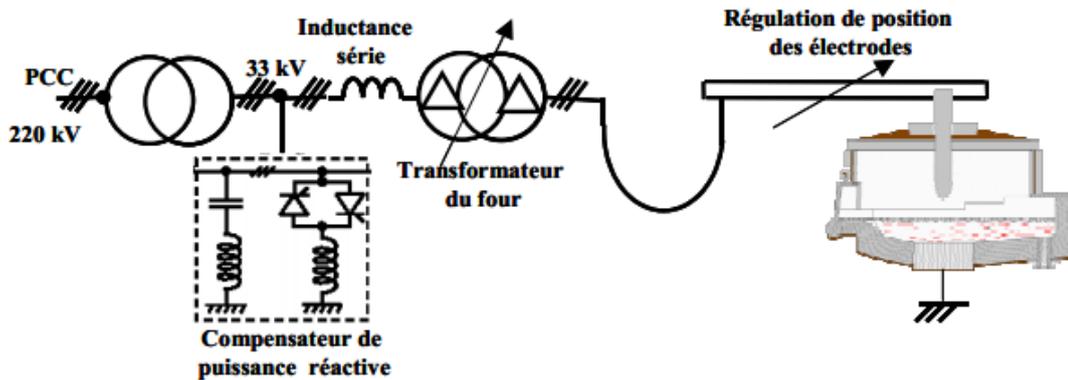


Figure II-4 : Alimentation de four à arc à courant alternatif [19].

Description de la partie électrique

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

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

II.6.2.2 Four alimenté en courant continu

Du point de vue descriptif, le four à courant continu est semblable au four à courant alternatif. ILS 'en distingue toutefois par son alimentation électrique et par présence d'une ou de plusieurs électrodes de sole. Autrefois, les fours à courant continu de grande puissance étaient équipés d'un système de trois électrodes alimentés chacune par un redresseur spécifique. Aujourd'hui, le système mono-électrode, alimenté par un ou plusieurs redresseurs en parallèle ou en série, équipé la grande majorité des fours à courant continue [28].

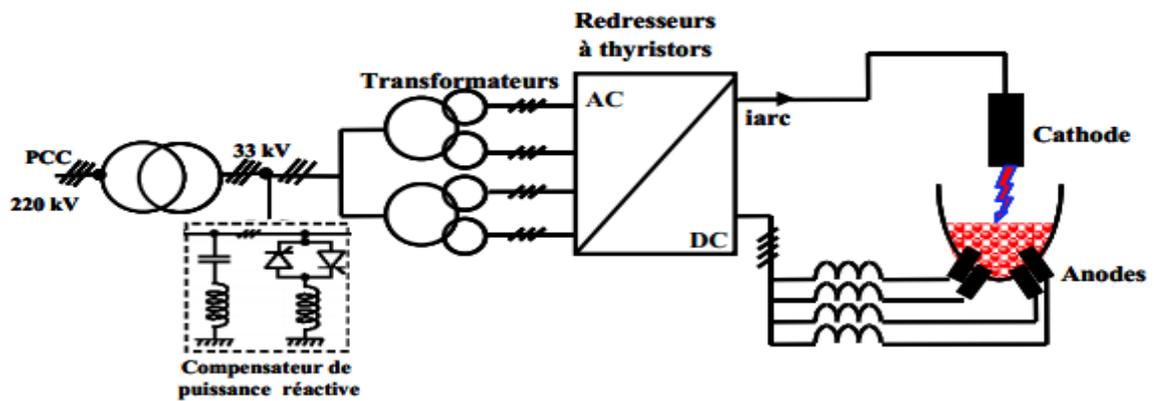


Figure II-5 : Alimentation de four à courant continu.

Description de la partie électrique

L'architecture d'alimentation électrique contient un redresseur entre le transformateur du four et les électrodes. L'architecture la plus couramment répandue comprend :

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

Les puissances mises en jeu dans les fours à arc étant relativement importantes, ils nécessitent donc des convertisseurs à courants élevés [27].

II.7 Description technologique

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

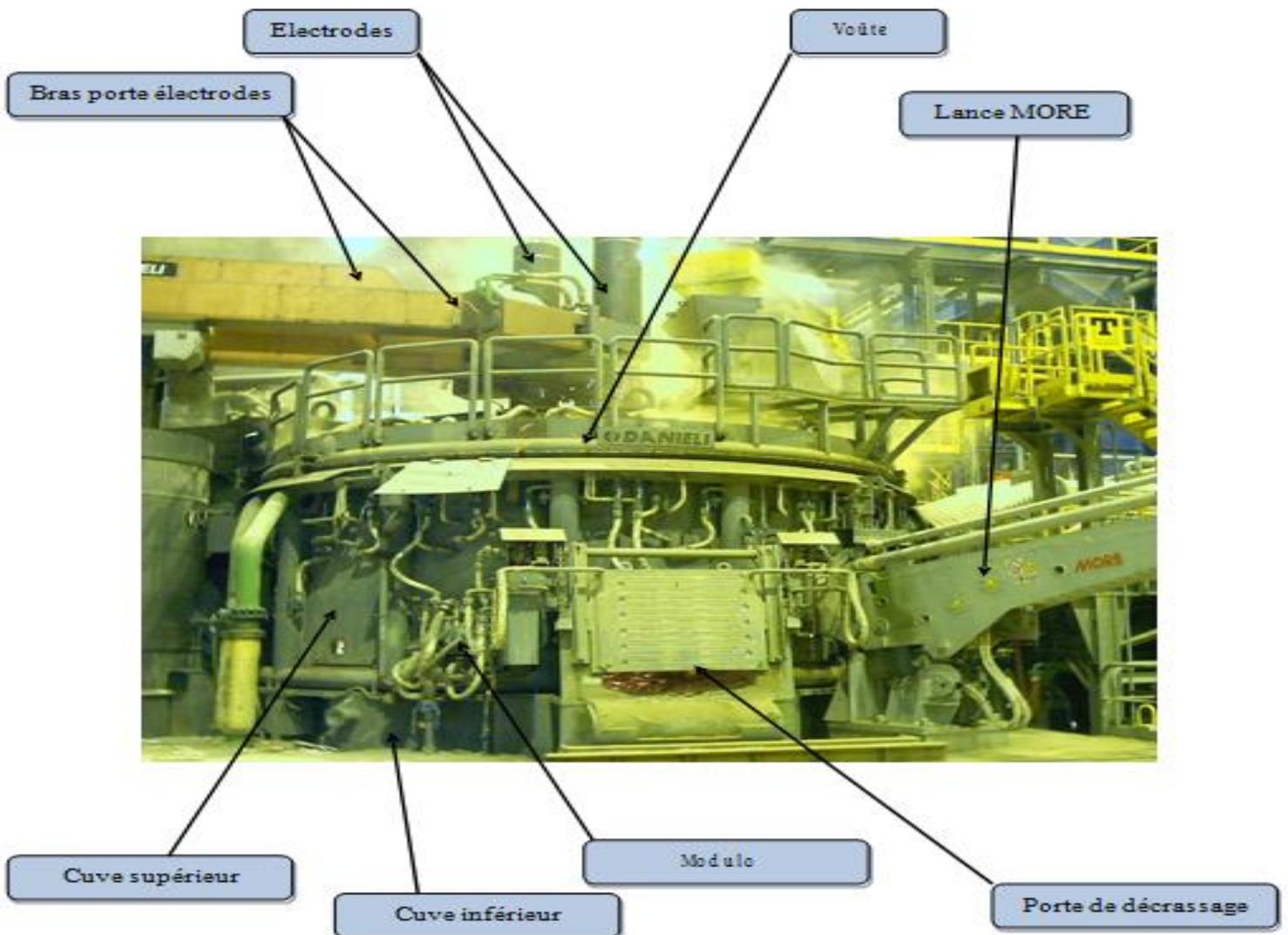


Figure II-6: Les équipements d'un four à arc.

II.7.1 Constitution du four à arc électrique

Le four électrique est formé par les composants [29] suivants :

- Système de basculement du four :
- Plateforme de support
- Système de blocage de la plateforme
- Cuve et panneaux refroidis à l'eau
- Porte de décrassage
- Coulée en poche à trou excentrique (EBT)
- Lance d'ouverture EBT
- Ensemble de levage/rotation de la voûte
- Voûte refroidie
- Ensemble de levage des électrodes

- Bras porte électrode
- Circuit secondaire
- Câbles souples refroidis

II.7.1.1 Système de basculement du four

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

II.7.1.2 Système de blocage de la plate-forme

Deux dispositifs de blocage sont installés sur la plate-forme de support pour empêcher que le four bascule pont anémie vers la position de décrassage pendant le chargement et la fusion de la ferraille. Ces dispositifs de blocage sont formés par deux le vers commandés par deux vérins hydrauliques à double effet. Le vérin sa absorbent les contraintes au choc Pen dont le chargement de la ferraille empêchant leur transmission au système de basculement.

II.7.1.3 Cuve et panneaux refroidis

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

II.7.1.4 Cuve inférieur

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

II.7.1.5 Cuve supérieur

La cuve supérieur est constituée de panne aux refroidis ayant des formes différentes, conçus pour obtenir le meilleur refroidissement de tous les composants du four. Les panneaux de refroidissement donnent à la cuve un est rupture mo du l'aire en remplaçant le revêtement réfractaire, ce qui fait augmenter la capacité de la cuve.

II.7.1.6 Porte de décrassage

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

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

II.7.1.7 EBT (dispositif de coulée en poche à trou excentrique)

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

hydraulique.

Généralement, chaque EBT est constitué de :

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

II.7.1.8 Lance d'ouverture EBT

La lance d'ouverture de l'EBT est utilisée seulement dans des situations d'urgence, c'est-à-dire lors que le système de coulée en poche à troue centrique est colmatée t'empêche que l'acier sorte. Dans une telle situation, la lance est placée en-dessous du trouet de l'oxygène est injecté jusqu'à ce que le trou s'ouvrée l'acier sorte.

II.7.1.9 Ensemble de levage et rotation de la voûte

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

II.7.1.10 Ensemble de levage des électrodes

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

II.7.1.11 Bras porte-électrodes conducteur

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

II.7.1.12 Circuit secondaire

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

II.7.1.13 Les électrodes

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

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

Régulation des électrodes :

- **Rôle de la régulation des électrodes :**
 - Respecter le plus précisément possible et automatiquement le point de fonctionnement nominal de l'arc.
 - Le point de fonctionnement nominal définit la puissance active et le facteur de puissance désirés.
 - La régulation des électrodes a une grande influence sur les caractéristiques d'exploitation et le coût de la fusion.

- **Les électrodes se consomment par :**
 - oxydation
 - Usure en pointe (dissolution dans le métal et sublimation)
 - Ruptures (casses dues à différentes causes : corps non conducteurs, chute de ferrailles lourdes en fin de fusion,...)
- **La consommation d'électrodes peut être réduite par :**
 - un traitement d'imprégnation
 - phosphatation superficielle
 - refroidissement de la colonne d'électrode par film d'eau
 - prévention contre les casses (qualité des ferrailles, préparation de la charge, surveillance des intensités de courant,...).

II.7.1.14 Système de graissage

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

II.7.1.15 Système de refroidissement

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



Figure II-7 : circuits de refroidissement [31].

II.7.1.16 Système hydraulique

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

II.7.1.17 Chariot poche

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

Le chariot est constitué essentiellement des éléments suivants :

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

II.8 Les matières premières utilisées dans le four à arc

Le four à arc n'étant pas capable de fondre directement du minerai de fer (Fe_2O_3), on ne peut enfourner que des ferrailles, du fer pré-réduit ou de la fonte. Ces trois matières premières ont des compositions et donc des propriétés d'usage différentes. Suivant les proportions utilisées, le sidérurgiste peut atteindre la qualité d'acier voulue, essentiellement déterminée par la teneur en produits résiduels présents dans les ferrailles.



Figure II-8 : ferrailles.

II.9 L'énergie électrique

L'énergie électrique est la principale source d'énergie utilisée par le four à arc pour la production de l'acier.

La productivité d'un four à arc dépend fortement de la façon dont l'énergie électrique est transmise au bain. Les puissances spécifiques couramment atteintes aujourd'hui sont de l'ordre de 800 KVA par tonne d'acier produit.

II.9.1 Utilisation d'autres sources d'énergie

Pour rester compétitifs, les sidérurgistes cherchent à réduire les coûts de fabrications en diminuant la consommation spécifique d'électricité. Cela a provoqué, dans les dernières années un accroissement de l'utilisation de l'énergie fossile. Ainsi, le four à arc est devenu un réacteur métallurgique multi énergies.

II.10 Avantages et inconvénients du four à arc

II.10.1 Avantages du four à arc

Le four à arc présente un certain nombre de qualités que n'ont pas les autres procédés :

- Souplesse et précision du réglage de la température.
- Choix et constance de l'atmosphère dans le four.
- Facilité dans la conduite et l'exploitation.
- Facilité d'automatisation.
- Minimum d'effluents gazeux.
- Températures élevées.
- Souplesse de conduite.
- Maîtrise indépendante de l'intensité et de la tension.
- Taille modulable.
- Grande rapidité de fusion.

Les fours à arc électrique sont utilisés pour produire une matière première de lux avec une production lourde. Cette production résulte l'amélioration des données économiques liées aux progrès techniques et aux fluctuations du marché ou à l'évolution d'un site sidérurgie [30].

II.10.2 Inconvénients

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

II.11 Conclusion

Les fours à arc sont surtout développés pour l'industrie métallurgique et pour l'élaboration d'électro fondus. Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu général sur les fours à arcs, concernant leurs descriptions, types, rôles, avantages et inconvénients. Rappelons aussi les notions nécessaires à la compréhension du fonctionnement des fours à arcs. Dans ce qui suit, on va entamer la maintenance de ce four au niveau de la société d'ALFET de la wilaya de Tiaret.

Chapitre III

Analyse FMD du four à arc électrique

III.1 Introduction

Chaque équipement industriel est soumis à divers types de contraintes, mais rares sont ceux qui supportent la chaleur comme un four à arc électrique. Un entretien régulier du four est essentiel pour en maximiser la durée de vie, réduire la fréquence des arrêts et maintenir la qualité des produits. Ce type de four est l'équipement le plus important de l'atelier de fusion d'acier au niveau d'ALFET (Algérienne des Fonderies de Tiaret filiale du groupe FONDAL).

Pour bien maintenir ce four nous avons suggéré l'application de l'analyse FMD qui sera le sujet de notre étude dans ce chapitre, elle est caractérisée à la fois par les études structurelles statiques et Dynamiques des systèmes, du point de vue prévisionnel mais aussi opérationnel et expérimental par l'analyse des essais et des accidents, en tenant compte des aspects probabilités et des conséquences induites par les défaillances techniques et humaines.

III.2 Présentation de l'application utilisée

III.2.1 Analyse FMDS

Est l'aptitude d'un système à remplir une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données. Elle englobe principalement quatre composantes : la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité.

III.2.1.1 La Fiabilité

D'après la norme AFNOR (X NF, 06-501) la fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions et pour une durée donnée. Les paramètres importants de la fiabilité sont donc les conditions d'utilisation du système, le temps ou le nombre de cycles. La fiabilité d'un dispositif dépend aussi de la fonction remplie par ce dispositif.

a. Les différents types de fiabilité

- **Fiabilité intrinsèque** : Elle est propre à un matériel et à un environnement donné et ne dépend que de ce matériel.
- **Fiabilité extrinsèque** : Elle résulte des conditions d'exploitation, de la qualité de la maintenance, d'une manière générale d'événement relatif à l'intervention humaine.
- **Fiabilité implicite** : Basée sur l'expérience et, dont le but est de réduire la fréquence et la durée des arrêts.
- **Fiabilité explicite** : Dont le concept est formé mathématiquement. Elle permet de déterminer rigoureusement le degré de confiance dans le matériel.

b. Paramètres nécessaires pour mesurer la fiabilité

• **Variable aléatoire** : 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** : Généralement en fiabilité, elle est notées f(t). Elle représente la probabilité de défaillance en un intervalle de temps (t).

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

• **La fonction de répartition** : Notée F(t). C'est la notation générale de la probabilité de défaillance dans l'intervalle de temps [0, t]

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

• **La fonction de fiabilité** : Nous appelons R(t) la fonction de fiabilité, qui représente la probabilité de fonctionnement sans défaillances pendant un temps (t), ou la probabilité de survie jusqu'à un temps (t).

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

• **Taux de défaillance** : La probabilité qu'elle tombe en panne entre l'âge t qu'elle a déjà et l'âge t + dt est représentée par la probabilité conditionnelle qu'elle tombe en panne entre t et t + dt.

Sachant qu'elle a survécu jusqu'à t. D'après le théorème des probabilités conditionnelles cette probabilité est égale à :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \text{ Ou } \lambda(t) = \frac{F(t)}{R(t)} \quad (\text{III-4})$$

Remarque :

Si $\beta=1$ et $\gamma=0 \implies \lambda(t) = \frac{1}{\eta} = \frac{1}{MTBF}$ (III-5)

• **La MTBF**: Le temps moyen jusqu'à défaillance, ou moyenne des temps de bon fonctionnement est donnée par les relations suivantes :

$$MTBF = \frac{\Sigma \text{Nombre de bon fonctionnement}}{\text{nombre d'interval de temps de bon fonctionnement}} \quad (\text{III-6})$$

En fonction de la valeur de β d'où $MTBF = A\eta + \gamma$ (III-7)

c. Loi de Weibull : La loi de Weibull est utilisée en fiabilité, en particulier dans le domaine de la mécanique. Cette loi a l'avantage d'être très souple et de pouvoir s'ajuster à différents résultats d'expérimentations.

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

- **Le paramètre de position γ** : 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 η** : Qui, comme son nom l'indique, nous renseigne sur l'étendue de la distribution.
- **Le paramètre de forme β** : Il est associé à la cinétique du processus observé

d. Application à la fiabilité : Suivant les valeurs de β , le taux de défaillance est :

- Soit décroissant ($\beta < 1$);
- soit constant ($\beta = 1$);
- soit croissant ($\beta > 1$).

e. Estimation des paramètres de la loi de Weibull : Un des problèmes essentiel est l'estimation des paramètres β , η et γ de cette loi, pour cela, nous disposons de la méthode suivante :

Graphique à échelle fonctionnelle : Pour la distribution de Weibull à 3 paramètres, on fait la transformation :

Recherche de γ : Si le nuage de points correspond à une droite, alors : $\gamma = 0$.

- Si le nuage de points correspond à une courbe, on la redresse par une
- Translation de tous les points en ajoutant ou en retranchant aux abscisses "t", une même valeur (gamma) afin d'obtenir une droite.

Recherche de η : La droite de régression linéaire coupe l'axe A à l'abscisse $t = \eta$.

Recherche de β : Béta 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.

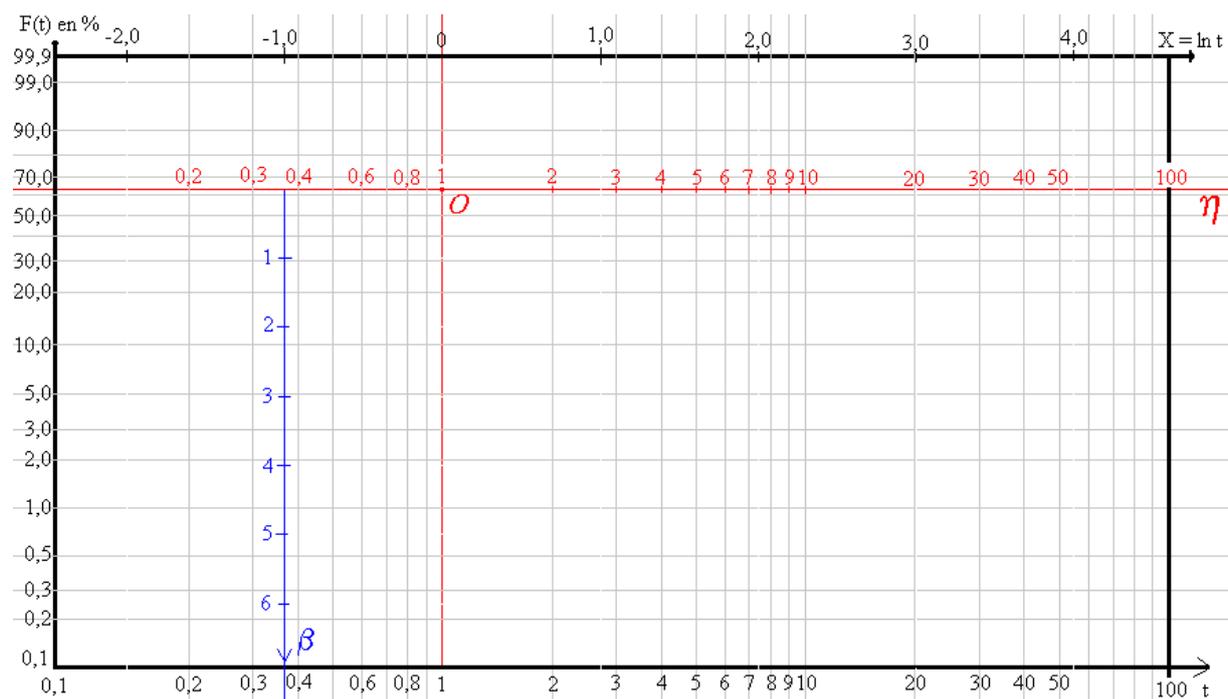


Figure III-1 : Représentation sur graphique à échelle fonctionnelle de la distribution de Weibull (graphique d'Allan Plait) [32].

III.2.1.2 Maintenabilité

D'après, norme (NF x 60- 010) La maintenabilité concerne l'action de maintenance comme telle. Par la maintenabilité, on recherche l'optimisation du temps d'intervention afin d'augmenter le temps de production en diminuant les délais dus au :

- temps pour l'attente de pièce de remplacement
- temps pour compléter les documents
- temps de préparation de l'action Son indice est la MTTR signifie moyenne des temps techniques de réparation. Il indique le temps moyen des différentes actions de maintenance prises pour un équipement. Il s'exprime de la façon suivante :

$$MTTR = \frac{\text{tempstotald'arrêts}}{\text{nombred'arrêts}} \quad (\text{III-8})$$

- **MTTR** : S'assimile ainsi à la durée moyenne jusqu'à la première réparation et requiert la connaissance de l'état initial de l'entité. Comme il y a en général plusieurs modes de défaillances, il faut définir plusieurs MTTR d'une entité, car à chaque mode de défaillance correspondra un MTTR spécifique.

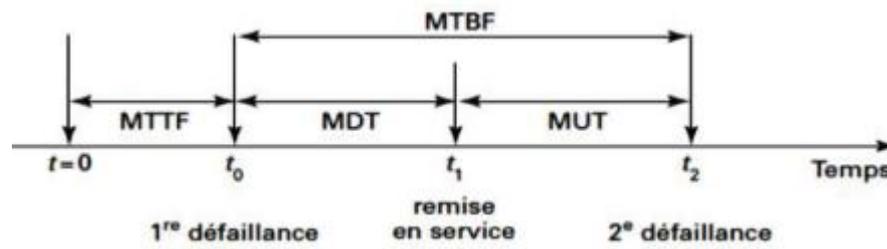


Figure III-2 : Relations entre les liens temporels en fiabilité, disponibilité et maintenabilité

a. Taux de réparation $\mu(t)$

$$\mu(t) = \frac{1}{MTTR} \quad (\text{III-9})$$

La probabilité de réparation d'un composant est principalement fonction du temps écoulé depuis l'instant de défaillance. Ce délai t comprend le temps de détection et le temps d'attente de l'équipe de réparation.

b. Intensité de réparation $g(t)$

$$g(t) = \frac{dM(t)}{dt} \quad (\text{III-10})$$

On peut définir l'intensité de réparation $g(t)$, qui représente la densité de probabilité de la variable aléatoire correspondante au temps de réparation

III.2.1.3 Disponibilité

D'après (cf. NF X 60-503) aptitude d'un dispositif, sous les aspects combinés de sa fiabilité, de sa maintenabilité et de la logistique de maintenance, à remplir ou à être en état de remplir une fonction à un instant donné ou dans un intervalle de temps donné.

L'aptitude contraire est appelée indisponibilité et est définie par :

$$A=1-A(t) \quad (\text{III-11})$$

La disponibilité $A(t)$ est une grandeur instantanée. L'entité peut donc avoir subi une panne puis une réparation avant l'instant t

$A(t)$ est donnée aussi par :

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (\text{III-12})$$

Il existe plusieurs types de disponibilités peuvent être utilisés :

a. La disponibilité moyenne

Une disponibilité moyenne sur un intervalle de temps donné $[t_1, t_2]$ de la disponibilité instantanée prévisionnelle, ou mesurée en phase opérationnelle par la durée de fonctionnement effectif divisée par durée donnée

b. La disponibilité instantanée

Pour un système avec l'hypothèse d'un taux de défaillance λ constant et d'un taux de réparation μ constant [33], on montre que la disponibilité instantanée a pour expression :

$$\lambda = 1 / \text{M.T.B.F (1/h)} \quad \text{et} \quad \mu = 1 / \text{M.T.T.R (1/h)} \quad (\text{III-13})$$

La disponibilité instantanée classique de l'équipement de production sera de la forme :

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

III.2.1.4 Sécurité

C'est l'aptitude d'un système à ne pas connaître de pannes considérées comme catastrophiques pendant une durée donnée [34].

a. Mesures de sécurité

Nous pouvons distinguer les mesures de sécurité par leur mode d'action : les sécurités passives et les sécurités actives [34].

b. Sécurités passives

La sécurité passive désigne tous les éléments mis en jeu afin de réduire les conséquences d'un accident lorsque celui-ci n'a pu être évité. Elle agit par sa seule présence, sans intervention humaine ni besoin en énergie [34]. (exemple : bâtiment de confinement, cuvette de rétention, etc.).

c. Sécurités actives

La sécurité active désigne tous les éléments mis en jeu afin d'éviter les accidents. Elle nécessite une action, une énergie et un entretien [34]. (Exemple : détecteur, vannes, etc.).

III.2.2 Analyse de PARETO

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

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 [35].

a. Représentation on graphique

Généralement, (20%) du nombre des éléments représentent (80%) du critère étudié : C'est la classe A. Les (30%) suivant du nombre des éléments représentent (15%) du critère étudié : C'est la classe B et les (50%) restant du nombre des éléments représentent seulement (5%) du critère étudié : C'est la classe C.

En cumulant les valeurs décroissantes du critère étudié, la courbe ABC fait apparaître trois zones d'où l'appellation de "courbe ABC [36].

III.3 Présentation d'historique des pannes du four à arc électrique (donne à ALFET)

Suite à un suivie de l'historique des pannes du four à arc électrique, 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 actions 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 arc électrique.

N°	Date de démarrage	Date D'arrêt	TBF (h)	TTR (h)	Causes	Actions
1	01/01/2017	31/03/2017	931	733	Bouchage des bras des électrodes PM/PE	Débouchage des bras du électrodes+dressage du bras défectifs +montage des câbles
2	01/04/2017	30/05/2017	1103	337	Bouchage de la mâchoire	Débouchage de la mâchoire au niveau du bras de four +serrage des Collins de serrage au niveau des mâchoires et flexible de refroidissement
3	01/02/2018	30/04/2018	1764	396	Bouchage de la mâchoire	Débouchage de la mâchoire au niveau du bras de four +serrage des Collins de serrage au niveau des mâchoires et flexible de refroidissement
4	01/10/2018	30/11/2018	1411	29	Couvercle du four cassé (PM)	Montage du couvercle renouvelé et réglage et serrer de la Chain et serrage de boulon
5	01/09/2019	30/10/2019	1448	16	Une fuite se produit lors de la fusion de ferraille (PM)	Démontage du couvercle au niveau du four+démontage de la porte du four
6	01/11/2019	31/12/2019	271	24	Couvercle du four cassé (PM)	Montage du couvercle renouvelé et réglage et serrer de la Chain et serrage de boulon

7	01/01/2020	31/03/2020	366	74	Vannes bouchées (PM)	Réparation des vannes et serrage de raccord
8	01/05/2020	31/07/2020	395	35	Augmentation de la température du four au-dessus de nécessaire	Remplissage d'huile au niveau du bassin de la pompe hydraulique Quantité 10 litres
9	01/02/2021	31/03/2021	1099	341	Bouchage de la mâchoire	Débouchage de la mâchoire au niveau du bras de four +serrage des Collins de serrage au niveau des mâchoires et flexible de refroidissement
10	31/03/2021	30/04/2021	117	30	Augmentation de la température du four au-dessus de nécessaire (PM)	Remplissage d'huile au niveau du bassin de la pompe hydraulique Quantité 10 litres
11	30/04/2021	31/05/2021	500	220	Défectives des vannes et bouchage des mâchoires (PM)	Changement les deux vannes et débouchage des mâchoires et montage de flexible de la porte du four

III.4 Méthode d'analyse prévisionnelle de Pareto

III.4.1 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 arc électrique

Défaillance	Nbre de défaillance	TA(h)	N*TA	Cumul (N*TA)	Cumul (N*TA)%	ABC
Bouchage de la mâchoire	3	1074	3 222	3222	71.58	A
Bouchage des bras des électrodes PM/PE	1	733	733	3 955	87.86	B
Défectives des vannes et bouchage des mâchoires (PM)	1	220	220	4 175	92.76	B
Vannes bouchées (PM)	1	74	74	4 249	94.40	B
Augmentation de la température du four au-dessus de nécessaire	2	65	130	4 379	97.29	C
Couvercle du four cassé (PM)	2	53	106	4 485	99.64	C
Une fuite se produit lors de la fusion de ferraille (PM)	1	16	16	4 501	100.00	C

III.4.2 Diagramme de Pareto(ou méthode ABC)

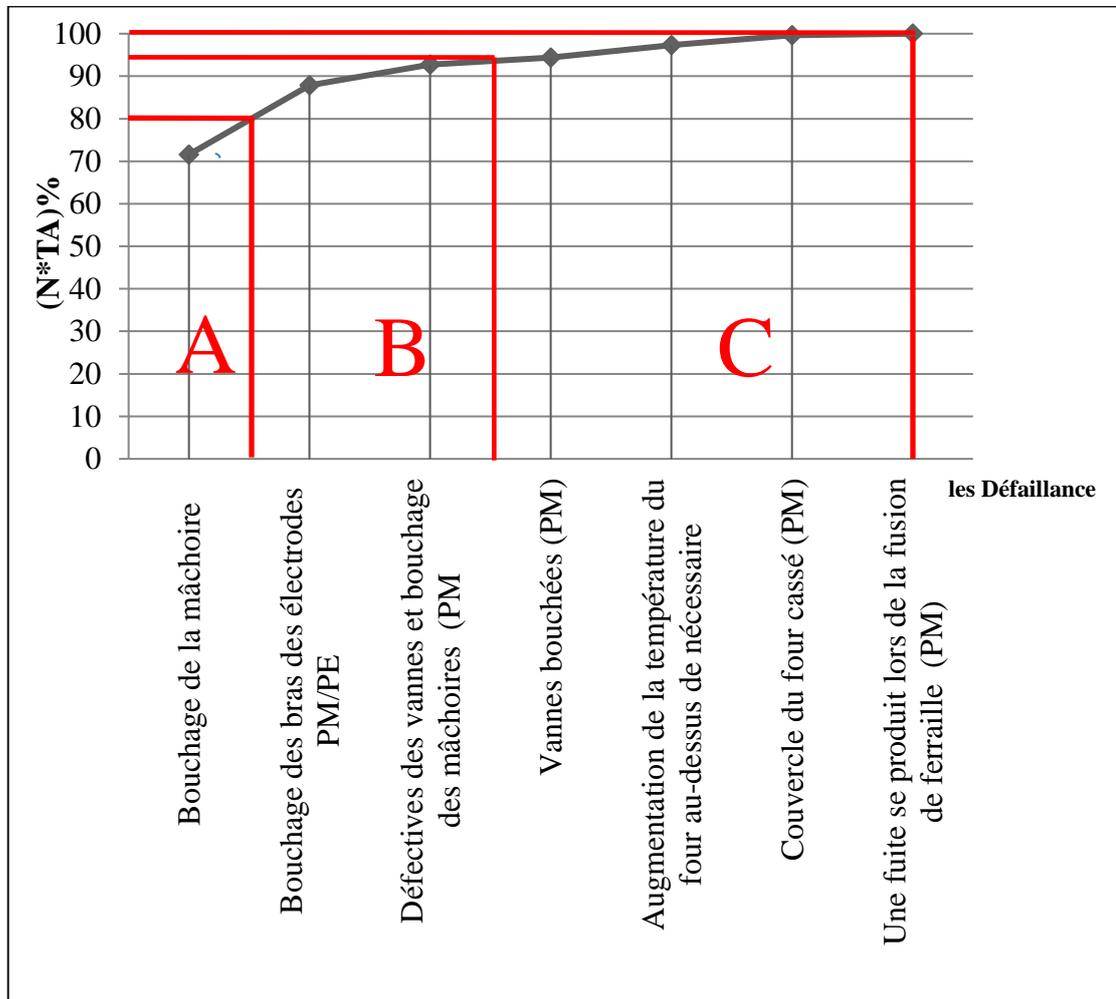


Figure III-3:Diagramme de Pareto(ou méthode ABC)

D'après le tableau précédant, (tableau III.2), Ce diagramme 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 temps 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 Bouchage de la mâchoire des électrodes.

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 Défectives des vannes et bouchage des mâchoires et Bouchage des bras des électrodes et Vannes bouchées.

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 Bouchage de la mâchoire des électrodes

III.5 L'analyse FMD

III.5.1 Calcul les paramètres de Weibull

Le tableau suivant comporte les Temps de Bon Fonctionnement classés par ordre croissant, et les fonctions de répartition calculés par la méthode des ranges médians selon la relation :

$$F(i) = \frac{\sum ni - 0,3}{N + 0,4} \quad (\text{III-15})$$

Dans notre cas $N = 11$

Donc $N \leq 20$

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

Tableau III.3. Calcul de la fonction de répartition.

N	TBF	$\sum ni$	F(i)	F(i)%
1	117	1	0.0614	6.14
2	271	2	0.1491	14.91
3	366	3	0.2368	23.68
4	395	4	0.3246	32.46
5	500	5	0.4123	41.23
6	931	6	0.5	50.00
7	1099	7	0.5877	58.77
8	1103	8	0.6754	67.54
9	1411	9	0.7632	76.32
10	1448	10	0.8509	85.09
11	1764	11	0.9386	93.86

III.5.2 Papier de Weibull

D'après les calculs précédents du tableau (III.3), nous avons réussi à tracer la courbe de Weibull représentée ci-dessous :

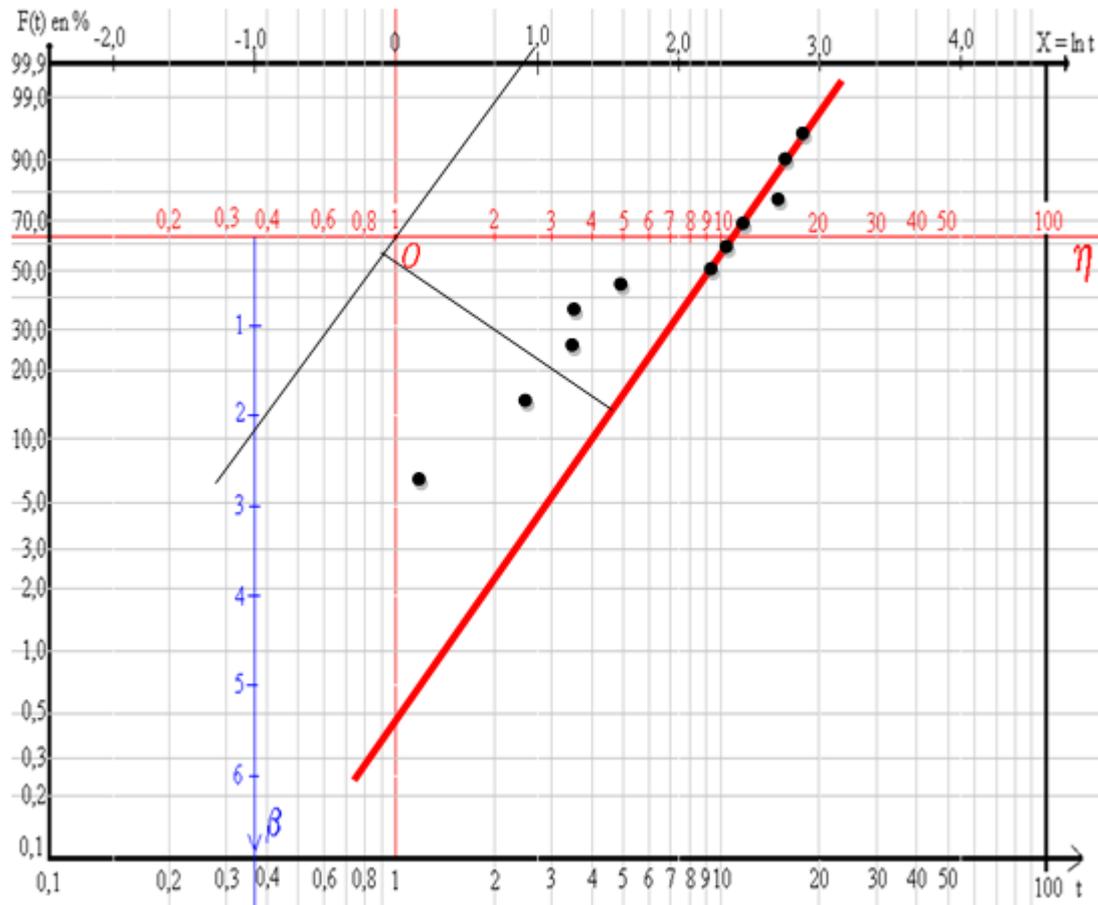


Figure III-4 : La représentation graphique de la fonction de répartition sur le papier de Weibull

On analyse le papier de Weibull de la figure (III.4), nous pouvons tirer les trois paramètres nécessaires pour calculer la fonction de répartition théorique $F(t)$. Le calcul de $F(t)$ a pour but de choisir le modèle adéquat. On a alors :

Tableau III.4. Paramètres de calcul de la fiabilité

Paramètres	Valeurs
Eta (η)	1100
Beta (β)	2.2
Gamma (γ)	0

III.5.3 KOLMOGOROV SMIRNOV K-S

Avant la validation de toutes les lois de fiabilité, il est nécessaire de tester l'hypothèse pour savoir si nous devons accepter ou rejeter le modèle proposé par le test de K-S avec un seuil de confiance de $\alpha = 5\%$.

Ce test consiste à calculer l'écart entre la fonction théorique $F(i)$ et la fonction réelle $F(t)$. Puis prendre le maximum en valeur absolue DN_{\max} . Cette valeur est comparée avec DN_{α} . D'après le tableau de K-S (voir annexe), $DN_{\max} < DN_{\alpha}$, ce qui veut dire que le modèle de Weibull est accepté. Nous avons pris la valeur maximale $DN_{\max} = |F(i) - F(t)|$.

Tableau III.5. Paramètre de calcul le maximum en valeur absolue

N	TBF(h)	F(i)	F(t)	$DN_{\max} = F(i) - F(t) $
1	117	0.0614	0.0072	0.0542
2	271	0.1491	0.0448	0.1043
3	366	0.2368	0.0850	0.1518
4	395	0.3246	0.0997	0.2249
5	500	0.4123	0.1618	0.2505
6	931	0.5	0.4998	0.0002
7	1099	0.5877	0.6314	0.0437
8	1103	0.6754	0.6343	0.0411
9	1411	0.7632	0.8226	0.0594
10	1448	0.8509	0.8397	0.0112
11	1764	0.9386	0.9408	0.0022

D'après la table de K-S, on peut tirer la conclusion suivante : $DN_{\max} < DN_{\alpha}$

Ce qui veut dire que le modèle de Weibull est **acceptable**.

Nous avons pris la valeur maximale : $DN_{\max} = |F(i) - F(t)| = 0.2505$

Sachant que : $DN_{\alpha} = D_{5,5} = 0.565$ (d'après la table 1 de l'annexe)

Donc : $0.2505 < 0.565$

D'après l'hypothèse du modèle de Weibull est **acceptable**

III.5.4 Exploitation les paramètres de Weibull

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 : $\beta = 2.2$

à la table 2 de l'annexe on obtient : $A = 0.8856$

A N : $MTBF = 0.8856 * 1100 + 0$

Et donc : $MTBF = 974.16$ heures.

b. La densité de probabilité en fonction de MTBF

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

A N : $f(MTBF) = \frac{2.2}{1100} * \left(\frac{974.16-0}{1100}\right)^{2.2-1} * e^{-\left(\frac{974.16-0}{1100}\right)^{2.2}}$

Alors : $f(MTBF) = 8.04 * 10^{-4}$

c. La fonction de répartition en fonction de MTBF

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

A N : $F(MTBF) = 1 - e^{-\left(\frac{974.16-0}{1100}\right)^{2.2}}$

Alors : $F(MTBF) = 0.5349 = 53.49\%$

d. La fiabilité en fonction de MTBF

L'équation de $R(t)$: $R(t = MTBF) = 1 - F(t = MTBF)$

A N : $R(MTBF) = R(974.16) = 1 - 0.5349$

Alors : $R(MTBF) = 0.4651 = 46.51\%$

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 : $\lambda(t = MTBF) = \frac{2.2}{1100} * \left(\frac{974.16-0}{1100}\right)^{2.2-1}$

Ce qui donne : $\lambda(t) = 1.73 \cdot 10^{-3}$ Pannes/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 :

$$R(t) = 80\% \Leftrightarrow t = ?$$

Pour déterminer le temps souhaitable pour une intervention systématique on se réfère à la relation de la fiabilité suivante :

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

Après développement on obtient :

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

$$\text{A N : } t = 1100 * \left[\ln\left(\frac{1}{0.8}\right)\right]^{\frac{1}{2.2}}$$

On aura alors : $t_{\text{sys}} = 556.28$ heures.

Pour garder la fiabilité du four à arc électrique à **80%** il faut faire des interventions à chaque temps systématique égal à : **556.28 heures**

III.5.5 Étude du modèle de Weibull

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

a. La fonction de la densité de probabilité Selon la relation suivante

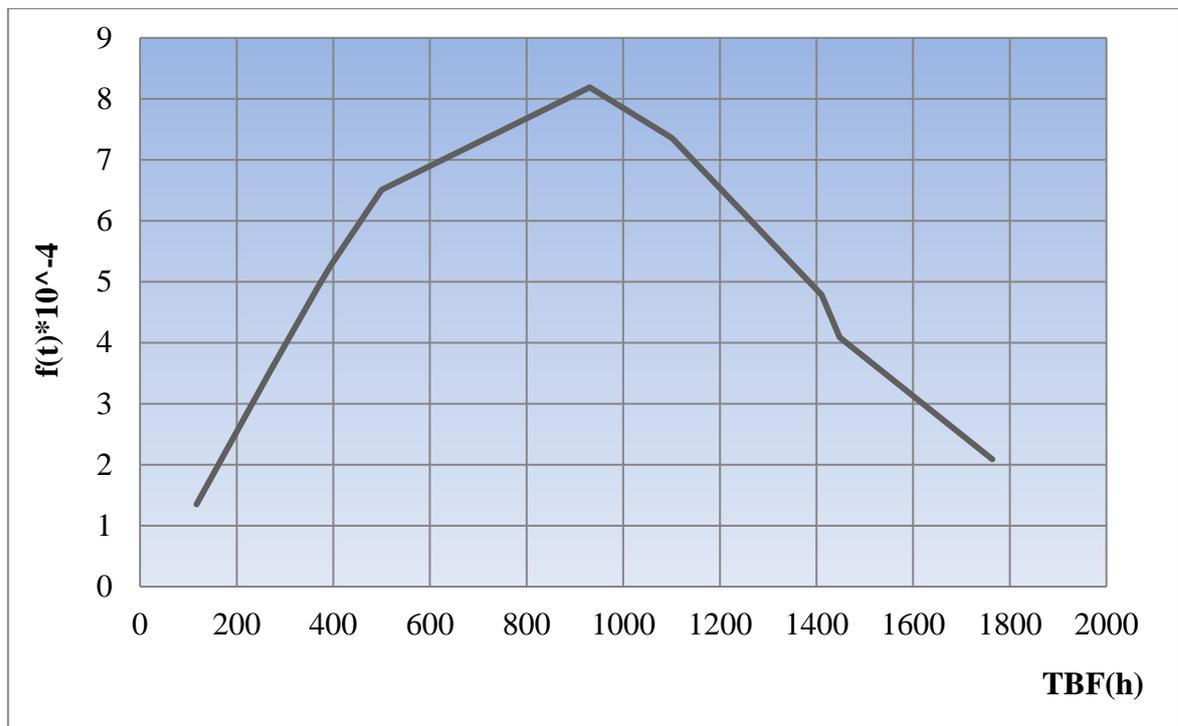
$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

Déduit le **tableau(III.6)** suivant : Calcul de la fonction de la densité de probabilité.

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

TBF(h)	117	271	366	395	500	931
$f(t)*10^{-4}$	1.3491	3.5563	4.8860	5.2680	6.5085	8.1886
TBF(h)	1099	1103	1411	1448	1764	
$f(t)*10^{-4}$	7.3643	7.3374	4.7832	4.4586	2.0877	

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

**Figure III-5 : courbe de La fonction de la densité de probabilité**

Le graphique de la figure (III.5) représente la variation de la fonction de la densité de probabilité figurant en ordonnées en fonction du temps de bon fonctionnement figurant en abscisses.

On remarque que la courbe augmente jusqu'à atteindre 931 heures puis elle s'effondre et diminue rapidement

Donc on peut conclure que la densité de probabilité diminue lorsque le temps de bon fonctionnement augment est dépassé 1400 heures

b. Fonction de répartition F(t) :

La fonction de répartition est donnée par la relation suivante :

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

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

Tableau III.7 : Fonction de répartition F(t).

TBF(h)	117	271	366	395	500	931
F(T)	0.0072	0.0448	0.0850	0.0997	0.1618	0.4999
TBF(h)	1099	1103	1411	1448	1764	
F(T)	0.6314	0.6343	0.8226	0.8397	0.9408	

A partir les calculs précédents du **tableau (III.7)**, on a tracé la courbe suivant :

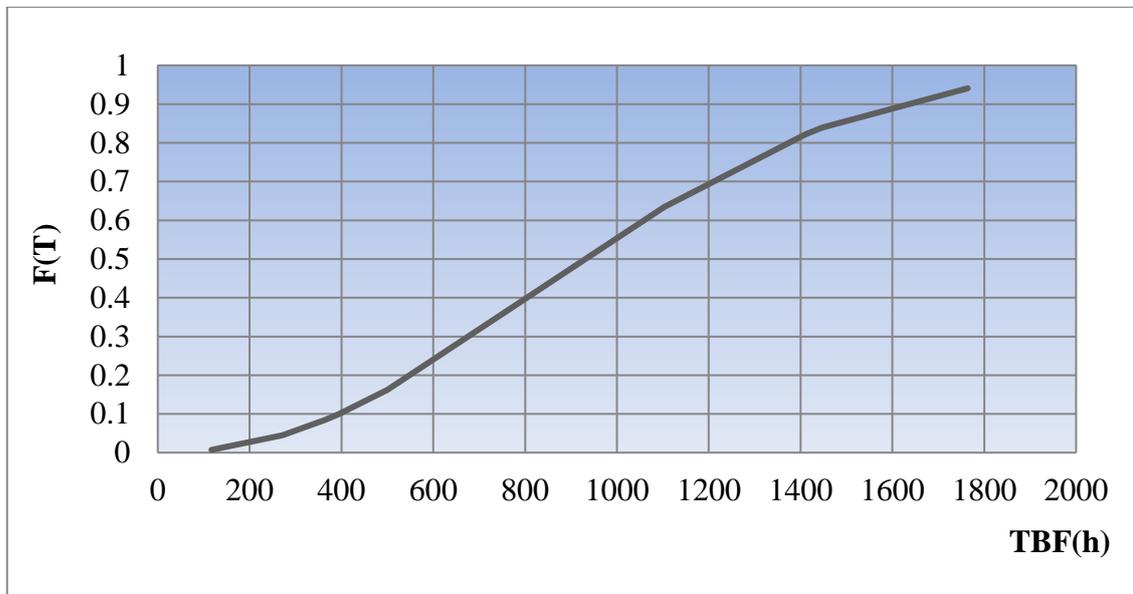


Figure III-6: courbe de la fonction de répartition F(t)

La courbe de la figure (III.6), donne la présentation graphique de la fonction de répartition en ordonnée en fonction du temps de bon fonctionnement en heure placé en abscisse. 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

c. La fiabilité R(t)

La fiabilité peut être calculée à partir de la relation suivante :

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

Selon les calculs obtenus on trace le tableau suivant :

Tableau III.8 : Calcul de la fiabilité.

TBF(h)	117	271	366	395	500	931
R(t)	0.9928	0.9552	0.9150	0.9002	0.8382	0.5002
TBF(h)	1099	1103	1411	1448	1764	
R(t)	0.3686	0.3657	0.1774	0.1603	0.0592	

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

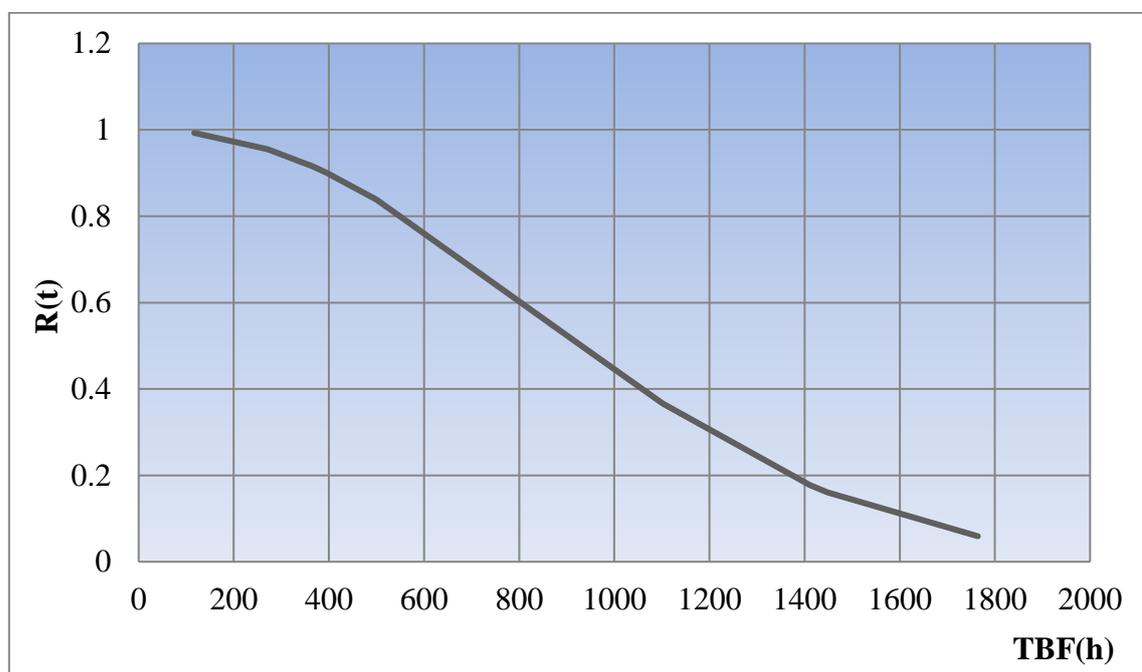


Figure III-7. Courbe de la fiabilité R(t)

Le graphique de la figure (III.7), représente l'évolution de la fiabilité en fonction du temps de bon fonctionnement. On remarque que l'allure de la courbe est décroissante. Ce qui signifie que la fiabilité diminue avec le temps, suite à des phénomènes qu'on peut généralement localiser en dégradation et usure de l'équipement.

d. Le taux de défaillance $\lambda(t)$

Le taux de défaillance peut être calculé selon la formule suivant :

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

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

Tableau III.9. Calcul du taux de défaillance.

TBF(h)	117	271	366	395	500	931
$\lambda(t) * 10^{-3}$	0.1359	0.3723	0.5340	0.5852	0.7765	1.6372
TBF(h)	1099	1103	1411	1448	1764	
$\lambda(t) * 10^{-3}$	1.9978	2.0065	2.6964	2.7815	3.5250	

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

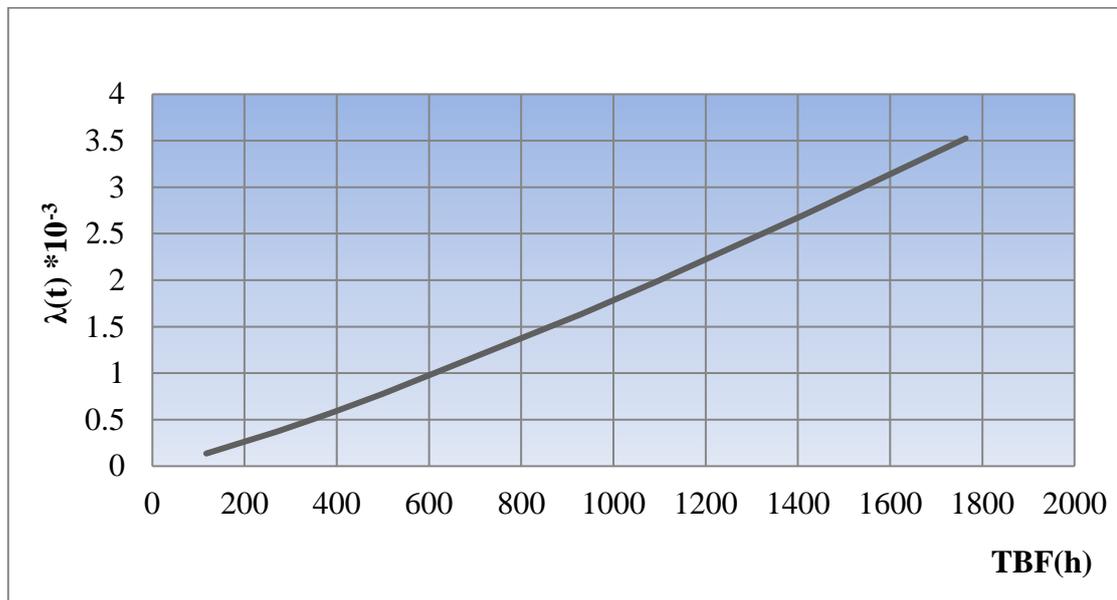


Figure III-8 : courbe du taux de défaillance $\lambda(t)$

La figure (III.8) représente la variance du taux de défaillance en fonction de bonne performance. On remarque que la courbe croît rapidement

III.6 La maintenabilité

La fonction de maintenabilité est donnée par la relation suivante :

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

Le taux de réparation est exprimé par la relation suivante :

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

$$MTTR = \frac{\sum_{N=1}^{N=11} TTR}{N}$$

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

$$A N : MTTR = \frac{2235}{11} = 203.182 \text{ heure}$$

$$\mu = \frac{1}{203.182} = 4.9217 * 10^{-3} \text{ Intervention/heure}$$

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

Tableau III.10. Calcul de la maintenabilité

TTR(h)	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200
M(t)	0.6263	0.8604	0.9478	0.9805	0.9927	0.9973	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 :

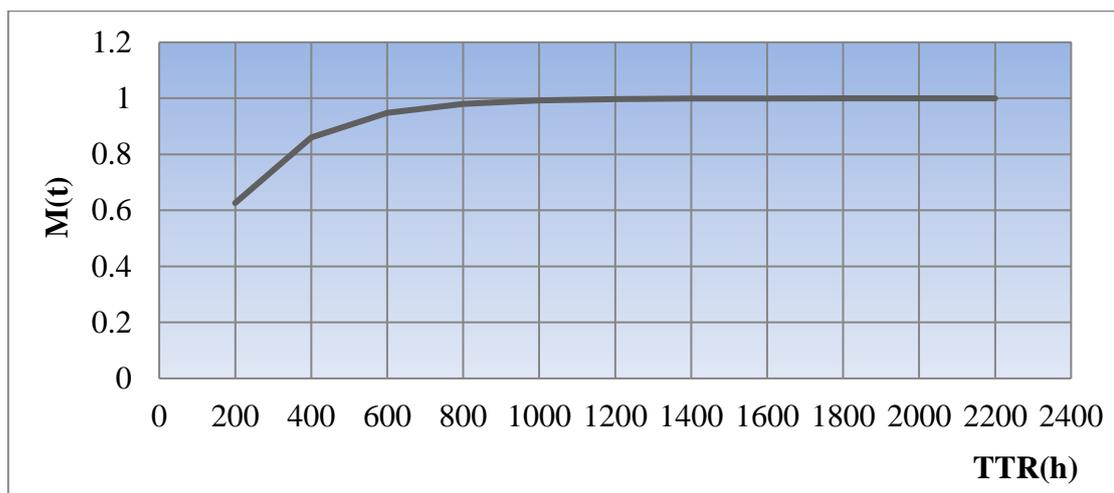


Figure III-9: courbe de la maintenabilité M(t)

La figure (III.9) schématise la 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 = 1400 heures. Donc la maintenabilité est croissante en fonction du temps technique de réparation puis devient constante avec une valeur égale à 99,99%.

III.7 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.

III.7.1 La disponibilité intrinsèque théorique

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 suivante :

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

$$D_i = \frac{974.16}{974.16 + 203.1818} = 0.8274$$

Donc la disponibilité intrinsèque : **Di = 0,8274**

La valeur de la disponibilité théorique est satisfaisante

La valeur de la disponibilité intrinsèque théorique D_i est reliée aussi au temps de bon fonctionnement. Pour améliorer la disponibilité on doit en contrepartie améliorer le temps de bon fonctionnement.

III.7.2 La disponibilité instantanée

La disponibilité instantanée en fonction du taux de défaillance et du taux de réparation est exprimée comme suit :

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

$$\text{On a : } MTBF = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{974.16} = 0.0010 \text{ h}^{-1}$$

$$D(t) = \frac{0.0049}{0.0010 + 0.0049} + \frac{0.0010}{0.0010 + 0.0049} e^{-(0.0010 + 0.0049)t}$$

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

Tableau III.11. Calcul de la disponibilité instantanée

TTR(h)	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200
D(t)	0.8827	0.8466	0.8355	0.8321	0.8311	0.8307	0.8306	0.8306	0.8306	0.8306	0.8306

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

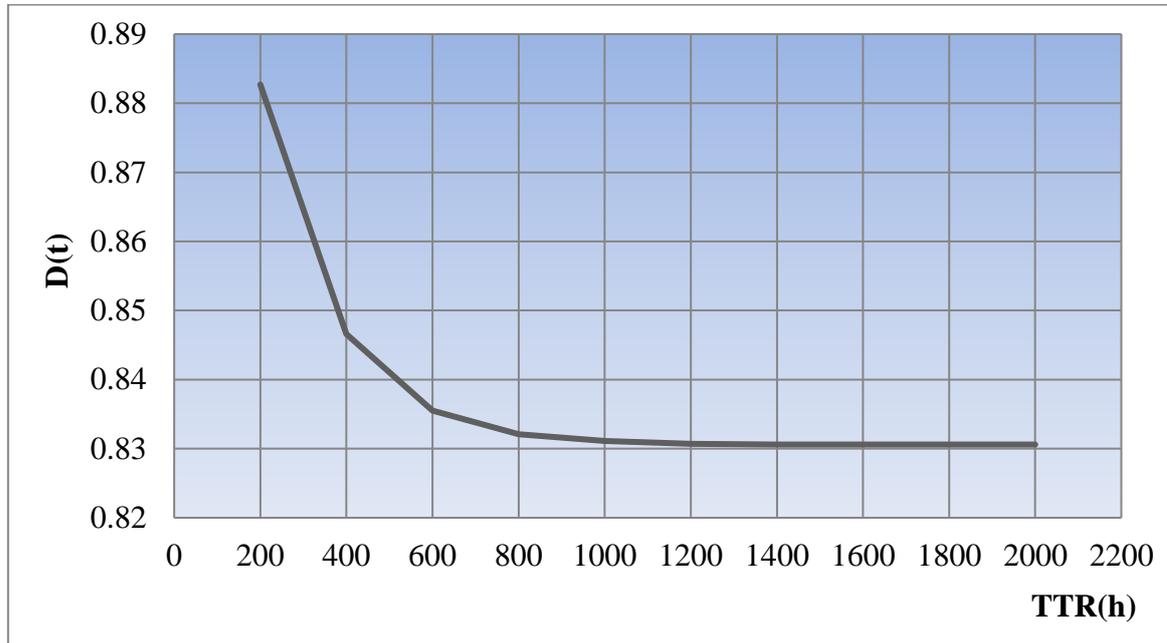


Figure III-10: courbe de la disponibilité instantanée $D(t)$

La courbe de la figure (III.10) représente la variation de la disponibilité en fonction du temps de réparation mesuré en heure. La courbe débute à une disponibilité égale à un lorsque on a un temps de réparation nul. Donc on constate que la disponibilité à une valeur maximum égale à un

Le graphique est décroissant jusqu'à un temps de réparation s'approchant de 1400 heures.

Au-delà de cette valeur la courbe prend une forme asymptotique pour une valeur de disponibilité égale à 0,8306

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.8 Conclusion

Le contexte de ce chapitre a été une analyse FMD appliquée à un four arc électrique, il a été question d'évaluer sa fiabilité opérationnelle à travers son aspect statistique en exploitant les données du fichier historique fourni par l'entreprise ALFET, en suite de prédire sa fiabilité prévisionnelle à travers son aspect probabiliste pour dégager l'expression du taux de défaillance, la fonction fiabilité et la fonction de défaillance en utilisant la loi de Weibull.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de notre projet de fin d'études établi pour l'obtention du diplôme de master en électromécanique spécialité maintenance industrielle, nous sommes penchés sur une entreprise mécanique en ALFET (algérienne des fonderies de Tiaret) pour l'étude de la maintenance d'un four à arc électrique. En étudiant sont historique de pannes sur une période de fonctionnement bien déterminé.

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

Dans ce mémoire nous avons présenté une validation expérimentale des indicateurs FMD en maintenance d'un four à arc. La problématique relative à la prise en compte de la fiabilité de la maintenabilité et de la disponibilité de l'équipement étudiée. Au cours de notre étude nous avons constaté que l'amélioration de la Fiabilité- Maintenabilité- Disponibilité de four à arc joue un grand rôle dans la baisse régulière des dépenses internes et externes de la maintenance ramenées au chiffre d'affaires de l'entreprise.

On a obtenir comme résultats :

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

Nous avons dégagé comme recommandations ce qui suit:

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

En fin, ce travail simple reste une source d'espoir pour la mise en œuvre formelle de ces étapes dans la future.

Références Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BOUMAZA ABD ERRAHMANE « *étude et réalisation d'un système de régulation de température* » mémoire de master de l'université badjimokhtar-annaba. année 2019
- [2] DOTOU SAMUEL & ALLI MAKSSOUD « *conception dimensionnement et réalisation d'un four multi combustible* » mémoire de licence professionnelle en génie Energétique de institut universitaire de technologie de lokossa-bénin de juillet 2012
- [3] <https://www.techno-science.net/definition/2256.html> four-définition et explications, visité le 25/04/2021 à 12 h30
- [4] <https://boowiki.info/art/fours-metallurgiques/four-metallurgique.html> four Métallurgique, visité le 25/04/2021 à 13h30
- [5] Gérard PANIEZ « *Thermique des fours* » Ingénieur des Arts et Métiers Ingénieur à la Société française d'études énergétiques, avril 2005
- [6] Isidore JACUBOWIEZ « *fours industriels* » Ingénieur du Conservatoire National des Arts et Métiers Ingénieur Conseil en énergie et environnement au groupe Elf Aquitaine et à l'Association Technique Énergie Environnement (ATEE), janvier 1998
- [7] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/electrothermie-industrielle-42270210/fours-electriques-a-resistances-d5910/les-differents-types-de-fours-a-resistances-d5910niv10004.html> Fours électriques à résistances - Présentation générale, visité le 22/04/2021 à 13h00
- [8] <http://www.fonderie-vincent.com/n/Lexique-de-la-fonderie/Four-a-induction-i51.html> fonderie Vincent, visite le 26/04/2021 à 10h00
- [9] RINDRA HARIVÉLO 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 de 21 août 2018
- [10] Commission européenne « *document de référence sur les meilleures techniques disponibles forges et fonderies* » mai 2005
- [11] <https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/pdf/1920/01/lhb1920003.pdf> houille blanche, visite le 26/04/2021 à 14h10
- [12] <http://www.utl-morlaix.org/wp-content/uploads/2017/06/UTL-6-FOUR-MICRO-ONDE.pdf>, visite le 25/04/2021 à 14h30
- [13] Danby product limited, ontario, canada n1h 6z9, danby product inc, Findlay, ohio, usa 45840 -24/07/2017

- [14]CONTINENTAL EDISON « *four à micro-ondes manuel d'instructions* » février 2011
- [15]Bac Pro SEN -Micro-onde « *Section Bac Pro Système Electronique Numérique Etude Fonctionnelle et Structurelle* » septembre 2009
- [16]Nabertherm« *Four de laboratoire (four à moufle)* »Manuel d'utilisation, octobre.2005
- [17]<https://www.netinbag.com/fr/science/what-is-a-muffle-furnace.html>, visite le 29/04/2021 à 12h00
- [18]HOBERSAL FURNACES & OVENS TECHNOLOGY « *fours à chambre / à moufle et étuves est disponible pour votre laboratoire* » janvier 2021
- [19]GianlucaPostiglione«*Nouvellealimentationpourlesfoursàarcàcourantalternatif*»THESE de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse 20 décembre2006.
- [20]DJEGHADERYacine«*Étudedelapropagationetcaractéristiquesdesharmoniquesstochastiquesgénéréesparunfouràarc*»thèsededoctoratdeL'universitéBadjiMokhtar– Annaba, année2010.
- [21]<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-elaboration-et-recyclage-metiaux-tiame/archive-1/acieries-m7600/evolution-du-four-electrique-a-arc-depuis-1950-m7600niv10004.html>, visité le 16/4/2021 à 15h00.
- [22]<https://fr.slideshare.net/boujneh/p2-cours-fa-2013-a>, visité le 11/4/ 2021 à 11h00.
- [23]B.Gros (ARCELOR) «*Charging tires in the EAF as a substitute for carbon*», BLIC meeting, 13 November 2003.
- [24]La Sidérurgie ; « *Guide pour l'estimation des gaz à effet de serre produits par des systèmes de combustion et des procédés industriels* ». Division des gaz à effet de serre Environnement Canada Mars 2004.
- [25]B.Bowman, L. Camagna ; « *Les fours à arcs rapides en Europe* ».La Revue de Métallurgie Janvier 1995.
- [26]G.Dolle ; « *Historique du four à arc* ». Revue de métallurgie 1995.
- [27]M. Kratz ; « *Four à arc* » Techniques de l'ingénieur, Traité Génie électrique, D 5 920, pp.5-99.
- [28]H. Sticker, S.E. Stenkvist (ABB); «*The DC Arc Furnace: An important tool in modern Steelmaking* ». 4th European Electric Steel Congress, Madrid, 3-6 November. 1992.

[29] Dossier technique de four à arc.

[30] P. Bianchi & al ; « *Optimisation de la technologie et de l'environnement du four UHP de l'usine de CAMPI de la Nuova ITALSIDER* ». La Revue de Métallurgie, Août - Septembre 1985.

[31] <https://www.ifm.com/ca/fr/applications/040/1010/2050/3010/surveillance-des-circuits-de-refroidissement-du-four-a-arelectrique.html>, visité le 29/4/ 2021 à 9h30

[32] https://papier_de_weibull-homeomath2.immingo.net/index.php, visité le 30/06/2021 à 11h07.

[33] Abdallah KABOUCHE « *Techniques de Maintenance Prédicative pour l'Amélioration de la disponibilité des Installations* » THESE de DOCTORAT. UNIVERSITE MOKHTAR BADJI – ANNABA.

[34] Dr. Belhadj Djilali Abdelkadir « *Maintenance et sûreté de fonctionnement* » photocopié UNIVERSITE DE HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF. Année 2020

[35] François Monchy Jean-Pierre Vernier « *Maintenanceméthodes et organisations* ».l'usine nouvelle dunod.Paris, 2000, 2003, 2010

[36] Dossier technique du four EGES, ALFET.

Annexes

Table 01 : Tableau de loi Kolmogorov-Smirnov

$n \setminus \alpha$	0.01	0.05	0.1	0.15	0.2
1	0.995	0.975	0.950	0.925	0.900
2	0.929	0.842	0.776	0.726	0.684
3	0.828	0.708	0.642	0.597	0.565
4	0.733	0.624	0.564	0.525	0.494
5	0.669	0.565	0.510	0.474	0.446
6	0.618	0.521	0.470	0.436	0.410
7	0.577	0.486	0.438	0.405	0.381
8	0.543	0.457	0.411	0.381	0.358
9	0.514	0.432	0.388	0.360	0.339
10	0.490	0.410	0.368	0.342	0.322
11	0.468	0.391	0.352	0.326	0.307
12	0.450	0.375	0.338	0.313	0.295
13	0.433	0.361	0.325	0.302	0.284
14	0.418	0.349	0.314	0.292	0.274
15	0.404	0.338	0.304	0.283	0.266
16	0.392	0.328	0.295	0.274	0.258
17	0.381	0.318	0.286	0.266	0.250
18	0.371	0.309	0.278	0.259	0.244
19	0.363	0.301	0.272	0.252	0.237
20	0.356	0.294	0.264	0.246	0.231
25	0.320	0.270	0.240	0.220	0.210
30	0.290	0.240	0.220	0.200	0.190
35	0.270	0.230	0.210	0.190	0.180
40	0.250	0.210	0.190	0.180	0.170
45	0.240	0.200	0.180	0.170	0.160
50	0.230	0.190	0.170	0.160	0.150
OVER 50	<u>1.63</u>	<u>1.36</u>	<u>1.22</u>	<u>1.14</u>	<u>1.07</u>
	\sqrt{n}	\sqrt{n}	\sqrt{n}	\sqrt{n}	\sqrt{n}

Table 02 : Distribution de Weibull (valeurs des coefficients A et B en fonction du paramètre de forme).

β	A	B	β	A	B	β	A	B	β	A	B
0,05	2,43290E+18	9,03280E+23	1,75	0,89062	0,52523	3,45	0,89907	0,28822	5,15	0,91974	0,20505
0,1	3,62880E+06	1,55977E+09	1,8	0,88929	0,51123	3,5	0,89975	0,28473	5,2	0,92025	0,20336
0,15	2,59357E+03	1,21993E+05	1,85	0,88821	0,49811	3,55	0,90043	0,28133	5,25	0,92075	0,20170
0,2	1,20000E+02	1,90116E+03	1,9	0,88736	0,48579	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	0,92368	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 :

Dans ce travail nous avons présenté une validation expérimentale des indicateurs FMD en maintenance d'un four à arc. La problématique relative à la prise en compte de la fiabilité de la maintenabilité et de la disponibilité de l'équipement étudiée.

Au cours de notre étude nous avons constaté que l'amélioration de la Fiabilité- Maintenabilité- Disponibilité de four à arc joue un grand rôle dans la baisse régulière des dépenses internes et externes de la maintenance ramenées au chiffre d'affaires de l'entreprise.

Mots clés : Maintenance, four électrique à arc, FMD

Abstract :

In this work we presented an experimental validation of FMD indicators in maintenance of an arc furnace.

The issue of taking into account the reliability of maintainability and the availability of the equipment studied.

During our study we found that the improvement of the Reliability-Maintainability-Availability of arc furnaces plays a big role in the regular decrease of internal and external maintenance expenses reduced to the turnover of the company.

Keywords: Maintenance, electric arc furnace, FMD

ملخص :

قدمنا في هذا العمل التحقق التجريبي من مؤشرات FMD في صيانة فرن القوس.

مسألة مراعاة موثوقية قابلية الصيانة وتوافر المعدات المدروسة.

خلال دراستنا وجدنا أن تحسين الموثوقية - الصيانة - توافر أفران القوس يلعب دورًا كبيرًا في التخفيض المنتظم لنفقات الصيانة الداخلية والخارجية التي تنخفض إلى معدل دوران الشركة.

الكلمات المفتاحية: الصيانة ، فرن القوس الكهربائي ، FMD