

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY-عنايةباجي مختارجامعة-  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



Année : 2017

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

## MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

## INTITULE

**Etude et optimisation de la maintenance de  
la COX du complexe Sider El-Hadjar**

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUE

FILIERE : MASTER

SPECIALITE : MAINTENANCE INDUSTRIELLE

ET FIABILITE MECANIQUE

PRESENTE PAR : TAHAR AHLAM

DIRECTEUR DU MEMOIRE : Dr.KHADRI YUCEF

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : PR. KHELIF R.

EXAMINATEURS :

- Dr. BOURENANE R
- Mr. KALOUCHE A
- Dr. BOUDECHICHE S

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail en guise de reconnaissance, d'amour et d'affection à **mes parents**, qu'ils veillent bien accepter ce travail comme témoignage de ma profonde gratitude pour toute la patience et les sacrifices qu'ils ont consentis pour l'éducation de leurs enfants, et dont je suis à jamais redevable.*

*A mon frère, A ma sœur*

*A tout les membres de ma famille*

*A mon ami*

*« K, Yacine »,*

*A toute ma promotion de master*

*Du long chemin avec tous mes vœux de succès*

*A tous ceux que j'aime*

*A tous ceux qui m'aiment.*

**TAHAR AHLAM**

## REMERCIEMENT

Grâce à **Dieu** le tout puissant qu'il m'a accordé la patience et la volonté pour terminer ce travail ; merci mon **Dieu**.

Pour ce biais, j'adresse mes reconnaissances particulières à mes très chers parents pour leur soutien et aide sans faille qu'ils m'ont apporté durant tout le cycle de ma scolarité.

Je tiens à remercier chaleureusement mon respectueux directeur de mémoire **Dr. Youcef Khadripour** sa patience, ses conseils et sa grande disponibilité à tout moment au cours de la réalisation de ce travail.

Je remercie également tous les Enseignants du Département de Génie Mécanique et notamment Mr. R. Khélif et Mr. N. Zeghib, et toute l'équipe de département de génie mécanique ainsi tous les étudiants de Promotion

Je remercie également mon ami **K. YACINE** pour son appréciable soutien au cours de ma formation de master qu'il trouve ici l'expression de ma respectueuse gratitude.

Je remercie également Mr **B. BACHIR** pour votre aide.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont participé de près ou de loin, à la réalisation de ce travail et que l'on pas pus les citer.

**TAHAH AHLAM**

# SOMMAIRE

Résumé

Liste des figures et des tableaux

Introduction générale

## Chapitre I : Présentation de l'entreprise

<b>I.1. Introduction .....</b>	<b>01</b>
<b>I.2. Historique de l'entreprise .....</b>	<b>02</b>
<b>I.3. Situation géographique du complexe .....</b>	<b>03</b>
<b>I.4. SIDER EL-HADJAR .....</b>	<b>03</b>
<b>I.5. Organigramme de l'entreprise .....</b>	<b>04</b>
<b>I.6. Processus de la production .....</b>	<b>05</b>
<b>I.7. Généralité sur les unités .....</b>	<b>06</b>
<b>I.7.1. Présentation de la centrale à oxygène .....</b>	<b>06</b>
<b>I.7.1.1. L'organigramme de la centrale à oxygène .....</b>	<b>07</b>
<b>I.7.1.2. Généralité sur la Cryogénie .....</b>	<b>07</b>
<b>I.7.1.3. Organisation technique des unités de la COX .....</b>	<b>08</b>
<b>I.7.1.4. Gamme des produits .....</b>	<b>13</b>
<b>I.7.1.5. Capacité de production .....</b>	<b>13</b>
<b>I.7.1.6. Clientèle de la centrale à oxygène .....</b>	<b>13</b>
<b>I.7.1.7. La maintenance au niveau de la centrale .....</b>	<b>13</b>
<b>I.7.1.8. Description du processus de production de l'unité .....</b>	<b>14</b>
<b>I.7.1.8.1. Production de l'Oxygène « O<sub>2</sub> » et l'Azote « N<sub>2</sub> ».....</b>	<b>14</b>
<b>I.7.1.8.2. Production de l'Argon « Ar » .....</b>	<b>17</b>
<b>I.8. Conclusion .....</b>	<b>17</b>

## Chapitre II : Généralités Sur La Maintenance

<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>18</b>
<b>II.2. Notions sur la maintenance .....</b>	<b>18</b>
<b>II.2.1. Définitions de la maintenance .....</b>	<b>18</b>
<b>II.2.2. Différents types de maintenance .....</b>	<b>18</b>
<b>II.2.2.1. Maintenance corrective .....</b>	<b>19</b>
<b>II.2.2.2. Maintenance préventive .....</b>	<b>20</b>
<b>II.2.3. Le rôle de la maintenance .....</b>	<b>23</b>
<b>II.2.4. Objectifs de la maintenance .....</b>	<b>24</b>
<b>II.3. Conclusion .....</b>	<b>25</b>
<b>Chapitre III :Théorie et application sur la FMD</b>	
<b>III.1. Théories sur la FMD .....</b>	<b>26</b>
<b>III.1.1. La fiabilité .....</b>	<b>26</b>
<b>III.1.1.1. Définitions .....</b>	<b>26</b>
<b>III.1.1.2. Les différentes sortes de fiabilité .....</b>	<b>26</b>
<b>III.1.1.3.les principales lois de probabilité utilisées en fiabilité .....</b>	<b>26</b>
<b>III.1.1.4. Terminologie .....</b>	<b>27</b>
<b>III.1.1.5. Modèle de WEIBULL .....</b>	<b>28</b>
<b>III.1.1.6. Test de Kolmogorov- Smirnov .....</b>	<b>30</b>
<b>III.1.2. La maintenabilité .....</b>	<b>30</b>
<b>III.1.2.1. Définition .....</b>	<b>30</b>
<b>III.1.2.2. Les facteurs liés à la maintenabilité .....</b>	<b>30</b>
<b>III.1.2.3. La fonction de maintenabilité .....</b>	<b>31</b>
<b>III.1.3. La disponibilité .....</b>	<b>31</b>
<b>III.1.3.1. DÉFINITIONS .....</b>	<b>31</b>
<b>III.1.3.2. Les différents types de disponibilité .....</b>	<b>32</b>
<b>III.2. Application FMD .....</b>	<b>33</b>
<b>III.2.1. Premier cas « la Pompe PP 2467 A » .....</b>	<b>33</b>
<b>III.2.1.1. La fonction de répartition théorique <math>F_e(t)</math> .....</b>	<b>33</b>
<b>III.2.1.2. Le calcul de la fiabilité <math>R(t)</math>.....</b>	<b>35</b>

III.2.1.3. La fonction de répartition réel $F(t)$ .....	36
III.2.1.4. Le taux de défaillance $\lambda(t)$ .....	37
III.2.1.5. La densité de probabilité $f(t)$ .....	38
III.2.1.6. Calcul de la maintenabilité $M(t)$ .....	38
III.2.1.7. Calcul de la disponibilité $D(t)$ .....	39
III.2.2. Deuxième cas la Turbine T1-1 .....	40
III.2.2.1. La fonction de répartition théorique $F_e(t)$ .....	40
III.2.2.2. Le calcul de la fiabilité $R(t)$ .....	42
III.2.2.3. La fonction de répartition réel $F(t)$ .....	43
III.2.2.4. Le taux de défaillance $\lambda(t)$ .....	43
III.2.2.5. La densité de probabilité $f(t)$ .....	44
III.2.2.6. Calcul de la maintenabilité $M(t)$ .....	45
III.2.2.7. Calcul de la disponibilité $D(t)$ .....	45
III.2.3. Troisième cas « Compresseur PC5 » .....	46
III.2.3.1. La fonction de répartition théorique $F_e(t)$ .....	46
III.2.3.2. Le calcul de la fiabilité $R(t)$ .....	48
III.2.3.3. La fonction de répartition réel $F(t)$ .....	49
III.2.3.4. Le taux de défaillance $\lambda(t)$ .....	50
III.2.3.5. La densité de probabilité $f(t)$ .....	50
III.2.3.6. Calcul de la maintenabilité $M(t)$ .....	51
III.2.3.7. Calcul de la disponibilité $D(t)$ .....	51
III.2.4. Comparaison de trois équipements .....	52
III.3. Conclusion .....	53
<b>Chapitre IV : Minimisation Du Cout De La Maintenance Préventive Par</b>	
<b>l'algorithme Génétique</b>	
IV.1. Introduction .....	54
IV.2. Politiques de maintenance pour systèmes élémentaires.....	54
IV.2.1. Politique de maintenance préventive périodique.....	54
IV.2.2. Politique de remplacement périodique avec réparation minimale	56

IV.2.3. Politique de maintenance périodique imparfaite avec réparation minimale .....	56
IV.2.4. Politique de maintenance préventive dépendant de l'âge.....	57
IV.2.5. Autres politiques de maintenance pour systèmes mono-composants .....	59
IV.3. Les algorithmes génétiques .....	59
IV.3.1. Le principe général du fonctionnement d'un algorithme génétique .....	60
IV.3.2. Optimisation de la périodicité à l'aide d'une dérivation simple ...	62
IV.4. Etude de cas .....	63
IV. Conclusion .....	65
Conclusion générale.....	66
Annexe .....	68
Référence bibliographique .....	77

## **Résumé :**

Dans ce travail, l'étude de la maintenance et l'évaluation de l'état des trois équipements plus critiques installées au niveau de la centrale à oxygène au sein de l'entreprise de SIDER EL HADJAR, à savoir la pompe, la turbine et le compresseur en utilisant le modèle de WEIBULL. Pour l'optimisation de la maintenance préventive on a proposé un modèle de coût qui correspond à la politique de maintenance préventive périodique avec réparation minimale. On a utilisé aussi la même technique des algorithmes génétiques pour optimiser la périodicité des révisions partielles tout en minimisant le coût global de maintenance. Les programmes réalisés pour l'optimisation de la politique proposée ont été validés par un outil d'optimisation fourni par Matlab.

**Mots clés :** Maintenance préventive, Optimisation, Algorithme Génétique, coût.



➤ *Liste des figures :*

<b>N° :</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Figure I.1</b>	Organisation de SIDER EL-HADJAR	1
<b>Figure I.2</b>	Vu générale du complexe el-Hadjar	3
<b>Figure I.3</b>	L'organigramme de l'entreprise	4
<b>Figure I.4</b>	Processus de la production de SIDER EL-HADJAR	5
<b>Figure I.5</b>	L'organigramme de la division COX	7
<b>Figure I.6</b>	Le turbocompresseur	8
<b>Figure I.7</b>	Les tamis moléculaires	9
<b>Figure I.8</b>	Les pompes à eau de refroidissement	9
<b>Figure I.9</b>	Les pompes à eau glacé	9
<b>Figure I.10</b>	Les tours de refroidissement	10
<b>Figure I.11</b>	La colonne de rectification d'air	11
<b>Figure I.12</b>	Turbine T 1-1	11
<b>Figure I.13</b>	Turbine T 2-1	11
<b>Figure I.14</b>	Les cigares	12
<b>Figure I.15</b>	Tank d'oxygène	12
<b>Figure I.16</b>	2 Tanks d'Azote et autre Argan	12
<b>Figure I.17</b>	L'organigramme de service maintenance de la COX	14
<b>Figure II.1</b>	Annexe A de la norme NF EN 13306 X 60-319 de juin 2001	18
<b>Figure II.2</b>	Schématisation de la maintenance corrective	19
<b>Figure II.3</b>	Schématisation de la maintenance préventive	20
<b>Figure II.4</b>	Cycle de maintenance préventive systématique	21
<b>Figure II.5</b>	<i>Schématisation de la maintenance préventive conditionnelle</i>	21
<b>Figure II.6</b>	Schématisation de la maintenance préventive prévisionnelle	22

<b>FigureII.7</b>	Contenu de la fonction maintenance	23
<b>FigureII.8</b>	Schématisation des objectifs de la maintenance	24
<b>FigureIII.1</b>	Les principaux temps qui caractérisés les deux types de dispositif.	27
<b>FigureIII.2</b>	Variation de $f(t)$ , $R(t)$ et $\lambda(t)$ par les différentes valeurs de $\beta$	29
<b>FigureIII.3</b>	La fonction de répartition théorique $F_e(t)$ % sur le papier de WEIBULL	34
<b>FigureIII.4</b>	L'allure qui détermine la valeur de $\beta$ sur le papier WEIBULL	34
<b>FigureIII.5</b>	La courbe de fiabilité $R(t)$ de la Pompe PP 2467 A	36
<b>FigureIII.6</b>	La fonction de répartition réel $F(t)$ de la Pompe PP 2467 A	37
<b>FigureIII.7</b>	Le taux de défaillance de la Pompe PP 2467 A	37
<b>Figure III.8</b>	La densité de probabilité $f(t)$ de la Pompe PP 2467 A	38
<b>Figure III.9</b>	Courbe de maintenabilité $M(t)$ de la pompe PP 2467 A	39
<b>Figure III.10</b>	Courbe de disponibilité $D(t)$ de la pompe PP 2467 A	40
<b>Figure III.11</b>	La fonction de répartition théorique $F_e(t)$ % sur le papier de WEIBULL	41
<b>Figure III.12</b>	L'allure qui détermine la valeur de $\beta$ sur le papier WEIBULL	42
<b>Figure III.13</b>	La courbe de fiabilité $R(t)$ de la Turbine T1-1	43
<b>Figure III.14</b>	La courbe de répartition réelle $F(t)$ de la Turbine T1-1	44
<b>Figure III.15</b>	La courbe de taux de défaillance $\lambda(t)$ de la Turbine T1-1	44
<b>Figure III.16</b>	La courbe de densité de probabilité $f(t)$ de la Turbine T1-1	45
<b>Figure III.17</b>	La courbe de maintenabilité $M(t)$ de la Turbine T1-1	46
<b>Figure III.18</b>	La courbe de disponibilité $D(t)$ de la Turbine T1-1	47
<b>Figure III.19</b>	La fonction de répartition théorique $F_e(t)$ % sur le papier de WEIBULL	48
<b>Figure III.20</b>	L'allure qui détermine la valeur de $\beta$ sur le papier WEIBULL	48
<b>Figure III.21</b>	La courbe de fiabilité $R(t)$ de compresseur PC5	50

<b>Figure III.22</b>	La courbe de répartition $F(t)$ de compresseur PC5	50
<b>Figure III.22</b>	La courbe de taux de défaillance $\lambda(t)$ de compresseur PC5	51
<b>Figure III.23</b>	La courbe de densité de probabilité $f(t)$ de compresseur PC5	52
<b>Figure III.24</b>	La courbe de la maintenabilité $M(t)$ de compresseur PC5	53
<b>Figure III.25</b>	La courbe de disponibilité $D(t)$ de compresseur PC5	53
<b>Figure IV.1</b>	Principe général d'un algorithme génétique	61
<b>Figure IV.2</b>	L'évolution du coût $C$ en fonction du temps $T$ de la pompe PP 2467 A	64
<b>Figure IV.3</b>	L'évolution du coût $C$ en fonction du temps $T$ de la turbine T1-1	64
<b>Figure IV.4</b>	L'évolution du coût $C$ en fonction du temps $T$ du compresseur PC5	65

➤ **Liste des tableaux :**

<b>N° :</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau I.1</b>	les caractéristiques des pompes	10
<b>Tableau I.2</b>	la capacité de production de la COX	13
<b>Tableau I.3</b>	la composition de l'air	14
<b>Tableau III.1</b>	Les facteurs liés à la maintenabilité	31
<b>Tableau III.2</b>	Tableau de comparaison entre les trois équipement choisis	54
<b>Tableau IV.1</b>	Les données de l'application des équipements choisis	63
<b>Tableau IV.2</b>	$T_{\text{optimal}}$ et $C_{\text{minimal}}$ obtenus par la méthode de dérivation	63

# INTRODUCTION GENERALE

---

Au fil du développement de la concurrence, qui entraîne la recherche de la qualité totale pour un coût le plus réduit possible, la maintenance est devenue une des fonctions stratégiques de l'entreprise. Les tâches de maintenance, en garantissant le bon fonctionnement des outils de production, ont ainsi pris une importance non négligeable dans la «bonne marche » des entreprises. Nous verrons alors que la maintenance est devenue un des facteurs majeurs de la maîtrise des outils de production et qu'elle a désormais un rôle préventif dans le maintien de l'état de bon fonctionnement des systèmes de production.

La gestion de la maintenance des équipements est devenue un enjeu de taille et représente aujourd'hui une préoccupation industrielle majeure. En effet, les systèmes industriels sont de plus en plus complexes, hautement automatisés et robotisés.

Ces équipements sont soumis à des mécanismes de dégradation dus aux conditions de fonctionnement et/ou d'environnement: usure, fatigue, vieillissement et altérations physico-chimiques diverses. En conséquence, ces divers dysfonctionnements exigent une maintenance accrue, afin de garantir un niveau de service optimal en termes de fiabilité et de disponibilité. Pour remédier aux défaillances de ces systèmes, il est possible de se contenter de pratiquer une maintenance corrective, mais cela n'empêcherait pas de subir les conséquences des pannes. Une attitude plus "défensive" consiste à mettre en œuvre une maintenance préventive systématique destinée à limiter, voire à empêcher, ces défaillances. On court alors le risque de dépenses excessives et d'indisponibilités inutiles si les périodes d'intervention ne sont pas correctement calibrées. Devant cette situation, l'équipe de maintenance ne doit plus se contenter de surveiller et de réparer les pannes, mais elle doit aussi envisager des stratégies de maintenance préventives. Ces dernières doivent réaliser un compromis acceptable entre la disponibilité du système et les coûts associés à son entretien et à son fonctionnement. C'est dans ce contexte que se situe l'optimisation de la maintenance préventive.

La mise en place d'un plan de maintenance préventive permet d'optimiser les opérations de maintenance et surtout de les effectuer au bon moment, l'objectif final étant d'assurer la qualité du produit et d'améliorer le taux de disponibilité des équipements pour augmenter la productivité.

Le but de ce travail est de réaliser l'optimisation de la maintenance préventive des équipements installés au niveau de la centrale à oxygène(COX) l'unité COX 03 du complexe sidérurgique SIDER EL-HADJAR, en minimisant le coût globale de la maintenance.

# INTRODUCTION GENERALE

---

Cette optimisation est faite par la méthode des algorithmes génétique qui est une technique parmi les méthodes stochastiques d'optimisation. Cette méthode appartient à la classe d'algorithme évolutionnaire, qui produise des solutions de problèmes d'optimisation.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres.

Dans **le premier chapitre**, on a donné une présentation générale du complexe SIDER EL-HADJAR situé dans la zone industrielle d'Annaba, dans lequel la centrale à oxygène (COX), les installations liées au procédé de fabrication de l'Oxygène, l'Azote et l'Argon (liquide et gaz).

**Le second chapitre**, contient une généralité sur la maintenance, dans ce chapitre on a présenté les différentes définitions de la maintenance préventive, types de maintenance, leurs rôles et ainsi que leurs objectifs.

**Le troisième chapitre**, consiste un à présenter quelques rappels théoriques sur la FMD, l'application est faite sur les trois équipement de l'unité COX, turbine, pompe et compresseur en utilisant la loi de WEILBULL.

**Le dernier chapitre**, on a utilisé les algorithmes génétiques pour l'optimisation de la périodicité des interventions en minimisant selon l'état des équipements en minimisant le coût engendré par la maintenance.

## I.1. Introduction :

SIDER EL HADJAR est le seul producteur offrant et développant une gamme complète de produits et services acier, des produits de base aux produits à valeur ajoutée, des produits longs aux produits plats, des produits standards aux produits spécialisés, et de l'acier au carbone à l'acier inoxydable et alliages.

Le complexe sidérurgique d'El hadjar est constitué d'un ensemble d'atelier ayant pour objectif la production de l'acier et sa transformation.

C'est un ensemble qui se vent intégrer de part sa taille et son long processus de fabrication.

Le complexe a été inauguré en juin 1969.

En effet, le complexe sidérurgique s'étend sur plus de 800 Ha c'est à constater aussi que les activités sont extrêmement étendues, devant encourir à tous les corps de métier existant dans le pays et faisant appels à des équipements aussi nombreux que varies.

La fonte est la matière première qui se trouve au niveau de l'Ouenza « Tébessa », en option la fonte et l'acier qui par la suite sont transformés en produit demi finis dans différentes ateliers ou secteur ; l'aciérie à oxygène « ACO<sub>1</sub>/ACO<sub>2</sub> », le laminoir à chaud et à froid « LAC/LAF », les tubes soudés « TUS », a turbine sans soudure « TSS », le laminoir à fil et rond « LFR », le laminoir rond à béton « LRB ». [1]

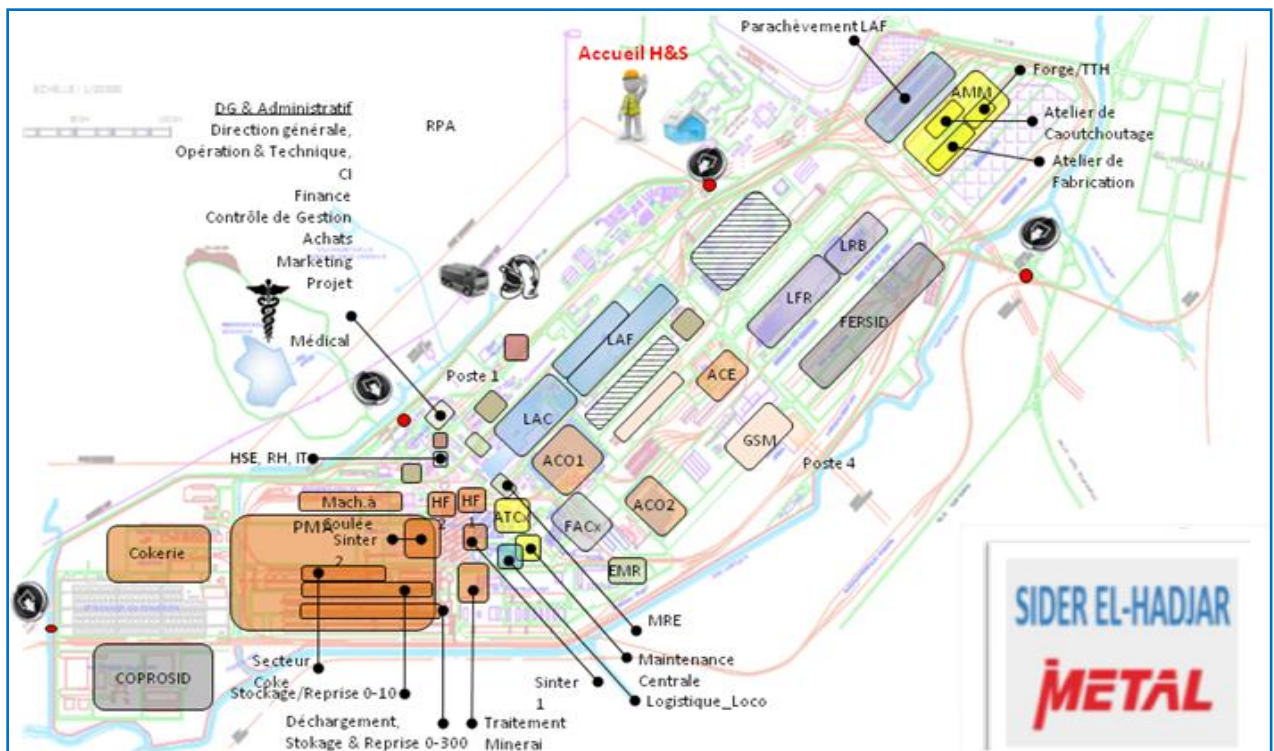
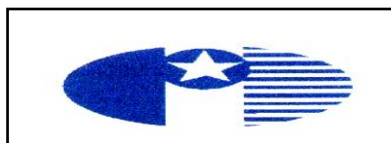
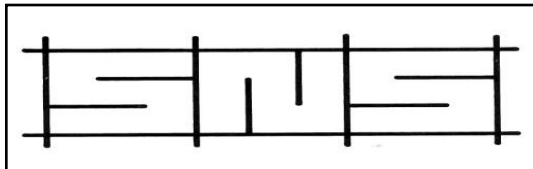


Figure I.1 : Organisation de SIDER EL-HADJAR

## I.2. Historique de l'entreprise :

## Chapitre I : Présentation de l'entreprise

Le complexe sidérurgique d'El Hadjar situé à Annaba est le plus grand complexe industriel en Afrique. Il joue un rôle primordial pour l'économie algérienne.



- L'entreprise nationale de sidérurgie a été créée par la société française SBS en 1959 suite à la mise en application de plan de Constantine 1950
- Après l'indépendance en 1964 celle-ci devient SNS et ceci dans le cadre de la récupération des richesses du pays. Le SNS a bénéficié des différents plans de développement pour s'étendre aux fils des nécessités et devient enfin «entreprise nationale de sidérurgie»
- L'ensemble a développé en 1969 un point sidérurgique à El-Hadjar pouvant répondre à une gamme de produits très variés et enfin devenir «SIDER» De 1977 à 1980 c'est l'extension du complexe, et la création d'autres secteurs : ACO2, HF2, PMA, Cokerie et Centrale thermique.
- Le 18 octobre 2001, un contrat de partenariat a été signé entre SIDER représenté par holding SIDMME et ISAPAT (groupe LNM)
- Le 01/01/2005 l'entreprise ISPAT fusionne avec le groupe LNM pour engendrer une nouvelle entreprise qui sera classé leader mondial dans l'industrie devient MITTAL STEEL ANNABA
- En 2007 le groupe s'est constitué en plus de MITTAL d'une entreprise internationale française dite ARCELOR. En 2013 le groupe SIDER détient 51% des actions.
- Mars 2016 IMETAL l'Algérie a récupéré les parts du partenaire étranger et devient propriétaire à 100%.
- **En 2017 cette date historique a coïncidé avec notre stage l'entreprise le nom de l'entreprise devenue SIDER EL-HADJAR. [1]**

### I.3. Situation géographique du complexe :

## Chapitre I : Présentation de l'entreprise

---

Le complexe sidérurgique d'EL-HADJAR est situé à l'Est du pays dans la zone industrielle d'ANNABA. Il est implanté à 15Km au sud de la ville et occupe une superficie plus de 800ha. La superficie se répartie approximativement en trois zones :

- ◆ Les ateliers de la production « 300ha ».
- ◆ Les zones de stockage « 300ha ».
- ◆ Les surfaces des services « 200ha ». [1]



Figure I.2 :Vu générale du complexe el-Hadjar

### I.4.SIDER EL-HADJAR :

- Capacité de production nominale : **1.8 Million** de tonnes de produits sidérurgiques.
- Gamme de produit : Bobines et tôles laminées à chaud, Tôles fines et bobines laminées a froid, Tôles nervurées, Tubes, Fil machine et rond lisse, Rond a béton ...
- Effectifs : 5000.
- **SIDER EL-HADJAR** dispose de ses propres installations maritimes reliées au réseau ferroviaires pour le transport des matières premières et les expéditions des produits finis.
- **SIDER EL-HADJAR** dispose d'un réseau commercial à travers le pays de 12 points de vente.
- Deux mines de fer d'une capacité totale de 3 millions de tonnes/an situées à 200km d'Annaba gérées par **SIDER EL-HADJAR** Tébéssa sont reliées à l'usine par une ligne ferroviaire. Réserves minières exploitables de 86 millions de tonnes. [1]

### I.5.Organigramme de l'entreprise :



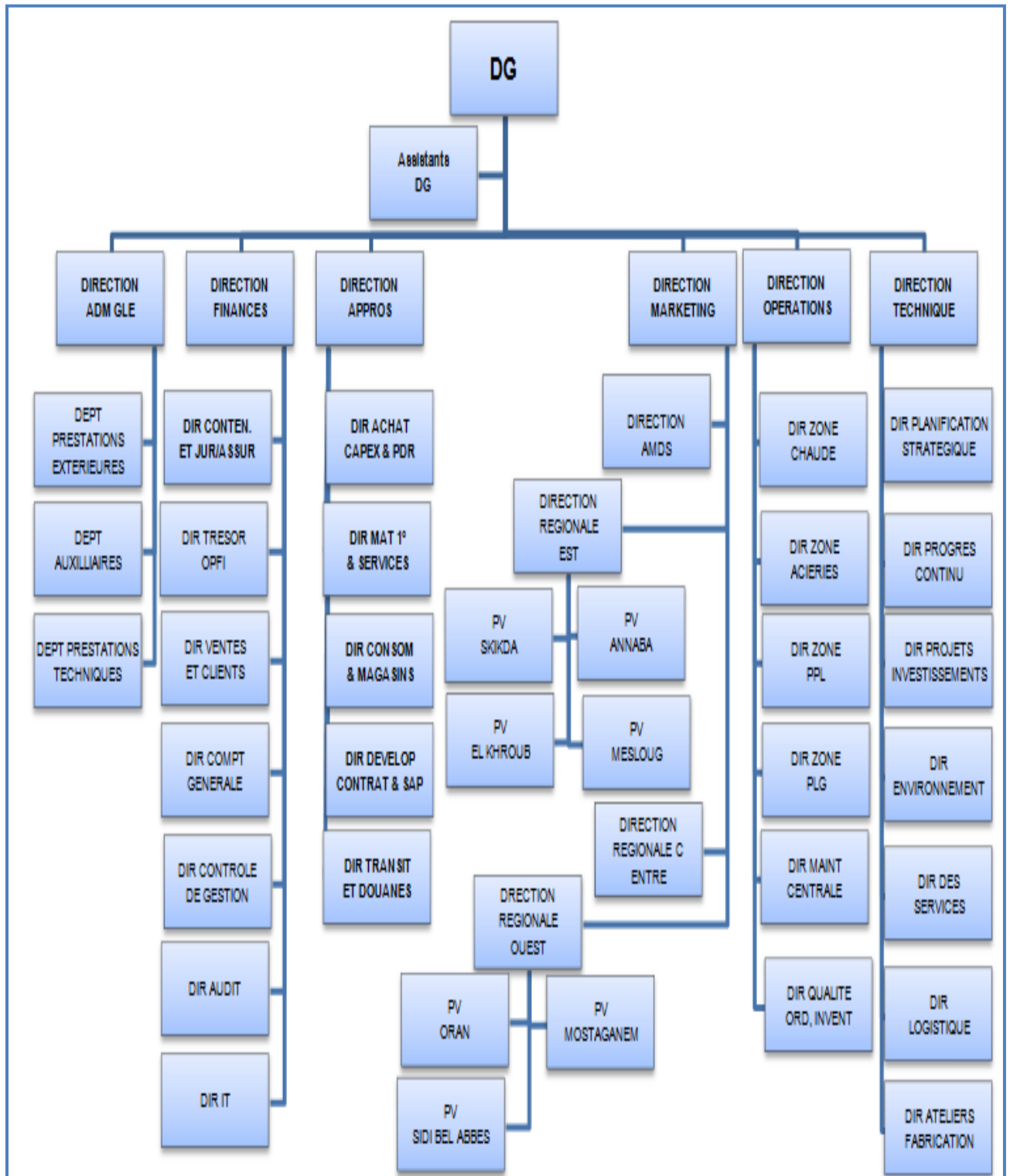


Figure I.3 : L'organigramme de l'entreprise

**I.6. Processus de la production :**

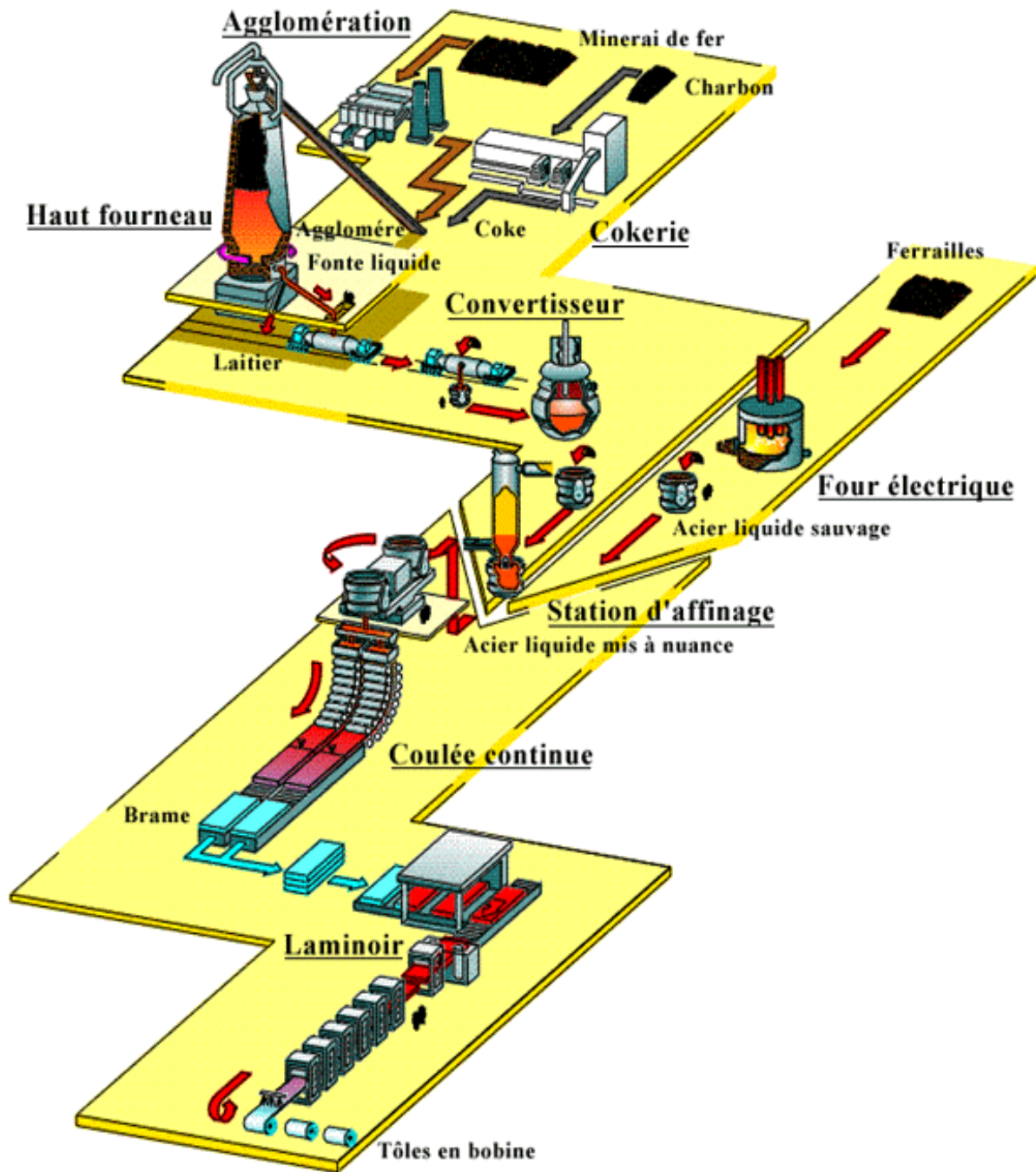


Figure I.4 : Processus de la production de SIDER EL-HADJAR

I.7.Généralité sur les unités :

SIDER EL-HADJAR est une entreprise qui comprend tous les ateliers intervenant dans le processus de production de l'acier, les installations intervenant dans ce processus sont :

- La PMA : préparation du minerai.
- La Cokerie : approvisionner l'HF en coke.
- L'HF : le haut fourneau, production de la fonte.
- Les aciéries (ACO1, ACO2 et ACE) : production de l'acier.
- Les laminoirs : transformer l'acier en divers produits sidérurgiques (tôles, bobines, tubes...).
- La centrale à oxygène COX : produire les gaz industriels de l'air et approvisionner sans arrêt les différents ateliers et installation du complexe. [1]

Pendant la période de mon stage j'ai visité l'unité de la centrale à oxygène COX.

### **I.7.1. Présentation de la centrale à oxygène :**

La centrale à oxygène (COX) est située en plein cœur du complexe d'El-Hadjar, à proximité des hauts fourneaux et des unités utilisant les gaz d'acétylène pour la soudure ainsi qu'au voisinage des aciéries ou réactions d'oxydation de l'acier.

La centrale à oxygène joue un rôle très important dans la production de l'acier En effet :

- Le gaz oxygène est utilisé dans l'affinage de la fonte pour la transformer en acier. Ainsi que pour l'activation du minerai dans les hauts fourneaux et l'oxycoupage
- Le gaz azote quant à lui est utilisé pour la galvanisation des tôles
- Le gaz argon sert également à améliorer la qualité de l'acier et pour produire des matériaux en inox et en aluminium

Pour faire face à des demandes très important en oxygène, la centrale est dotée d'une station de vaporisation d'oxygène dont le rôle est de vaporiser le liquide oxygène stocké et compenser ainsi la baisse de pression du réseau.

### I.7.1.1. L'organigramme de la centrale à oxygène :

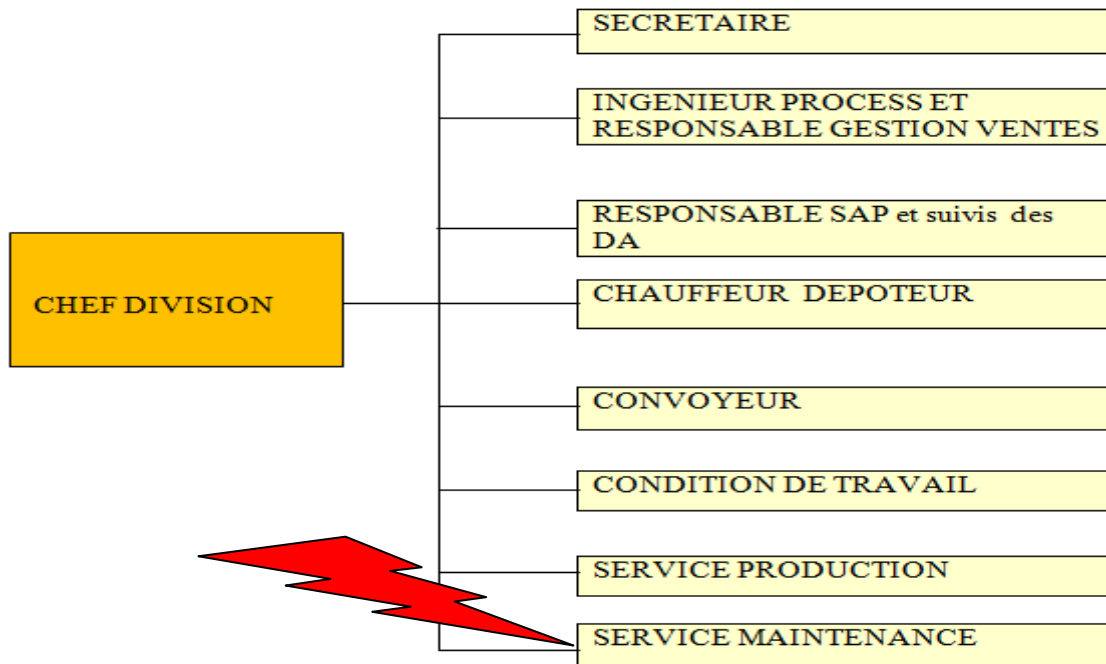


Figure I.5 : L'organigramme de la division COX [3]

### I.7.1.2. Généralité sur la Cryogénie : [10, 11]

La cryogénie (Kruos (grec) = Froid, Genesis (grec) = Engendrer, produire) ou nettoyage cryogénique est tout simplement l'étude et la production des basses températures (inférieures à  $-150\text{ °C}$  ou  $120\text{ K}$ ). La limite de  $-153,15\text{ °C}$  représente la limite à partir de laquelle les gaz de l'air se liquéfient. Les applications sont nombreuses d'ailleurs elle a permis plusieurs activités :

- La suspension du métabolisme,
- L'étude de la supraconductivité,
- L'étude de la superfluidité (absence de viscosité pour un liquide),
- La transformation en une fine poudre de toutes sortes de matières,
- La récupération de plus de 90 % des gaz destructeurs de la couche d'ozone,
- La création à partir d'azote liquide, de toutes sortes de neiges.

La cryogénie permet la conservation des aliments est la plus populaire avec la surgélation rapide laissant l'aliment dans son état de départ, ce qui n'est pas le cas avec la congélation classique qui provoque la déshydratation de surface et la formation de gros cristaux de glace dans le produit.

- ❖ La centrale à oxygène est une installation vitale pour le complexe sidérurgique, son dysfonctionnement se répercute directement sur la marche des principales installations de production particulièrement les aciéries à oxygène. [1]

La COX comprenait 04 unités de production indépendantes mais au cours de mon stage la COX N° 3 est la seule unité en service, les 03 autres unités COX 1, COX 2 et COX 4 sont à l'arrêt.

- L'unité COX 3 est destinée à la production de l'argon liquide, de l'oxygène liquide et gaz, de l'azote liquide et gaz, et l'azote impur.

### I.7.1.3. Organisation technique des unités de la COX :

Chaque unité se compose de :

- **01 turbocompresseur** : C'est une machine centrifuge composée de 5 étages permettant d'augmenter la pression ou refoulement dans la 5<sup>ème</sup> étage à l'ordre de **5,2 bar** avec un débit d'air alimentant l'unité à l'ordre de **72000 Nm<sup>3</sup>/h**.



**Figure I.6** : le turbocompresseur

- **02 tamis moléculaires A & B** :

Ce sont des récipients cylindriques volumineux horizontaux ou des purificateurs de l'air chaque un composé de deux lits fluidisés, il permet de purifier l'air entré. A l'intérieur de chaque tamis il y a des plaques métalliques chargées avec des produits chimiques se forment des grains « l'Alumine  $Al_2O_3$  » qui permet d'absorber l'humidité chaque grain absorbe une quantité de chaleur, et « le 13 X » permet d'absorber les hydrocarbures. Dans l'installation tout jour il y a un tamis en service et l'autre en régénération.



**Figure I.7 :** les tamis moléculaires

- 04 pompes à eau :

**02 pompes à eau de refroidissement :** ce sont des pompes centrifuges permet d'alimenté la colonne de lavage avec de l'eau elle a un débit de 215 m<sup>3</sup>/h



**Figure I.8 :** les pompes à eau de refroidissement

**02 pompes à eau glacé :** ce sont des pompes centrifuges permet d'alimenté la quantité de l'eau refroidit après la colonne de refroidissement vers la colonne de lavage suite à débit d'ordre de 40 m<sup>3</sup>/h



**Figure I.9 :** les pompes à eau glacé

Les caractéristiques des pompes :

Le tableau au-dessous représente les caractéristiques des pompes au niveau de la COX 03.

	<b>2 Pompe à eau de refroidissement</b>	<b>2 Pompe à eau glacé</b>
<b>Code de désignation</b>	P2466A /B	P 2467 A/B
<b>Débit</b>	192	45 m <sup>3</sup> /h

## Chapitre I : Présentation de l'entreprise

---

Pression d'entrée	3bar	1,1bar
Pression de sortie	8,5bar	9,5bar
Vitesse de rotation	2900 t/min	2900 t/min
Puissance consommée	34,6 KW	17,4 KW
Puissance du moteur	45 KW	22 KW
Fabricant	KBS	KSB
Type	ETANORM G-80-200 G1	ETANORM G-40-250 G1
N° de commande du fabricant	6005 101 600	6005 101 600

**Tableau I.1** : les caractéristiques des pompes

**- 02 tours de refroidissement :**

- **Colonne de lavage** :un grand récipient cylindrique volumineux verticale fermé, elle permet de refroidir l'air avec de l'eau la colonne est équipée avec deux systèmes de refroidissement et ouverte ver l'atmosphère.
- **Colonne de refroidissement** :est un grand récipient cylindrique volumineux verticale ouverte ver l'atmosphère, elle permet de refroidir l'eau avec l'Azote « N<sub>2</sub> » impur

Les deux colonnes travail avec 2 niveaux l'un d'ordre 50% et l'autre 74%, ils sa peut varier.



**Figure I.10** : Les tours de refroidissement

**- 02 échangeurs thermiques (02 bloc d'échangeurs).**

**- 02 adsorbours d'oxygène liquide (A3/A4).**

**- 02 pompes à oxygène liquide de 21.3 m<sup>3</sup>/h.**

**- 01 installation argon de l'unité N°3.**

- 01 colonne de mixture D'argon.

- 01 colonne de rectification d'air :



Figure I.11: La colonne de rectification d'air

- 02 turbines frigorifiques :

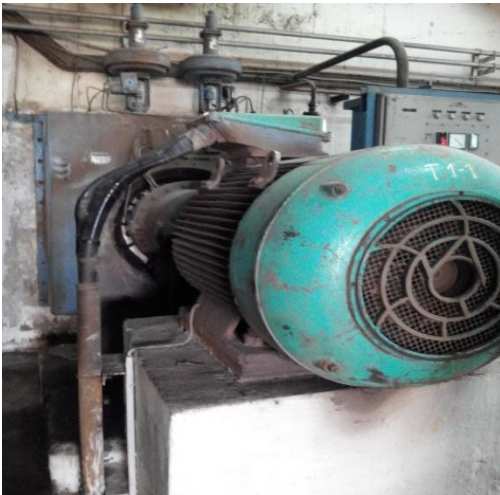


Figure I.12 : Turbine T 1-1



Figure I.13 : Turbine T 2-1

- 01 compresseur D'argon brut de 250 Nm<sup>3</sup>/h.

- 01 groupe frigorifique.

- 01 colonne de rectification D'argon pur.

Pour le stockage il y a :

- **Les cigares :** pour le stockage des produits gazeux il ya 16 cigares (12 pour l'oxygène et 2 pour l'azote)





**Figure I.14** : les cigares

- **Les tanks** : pour le stockage des produits liquides il y a 4 tanks (1 pour l'Oxygène ( $O_2$ ), 2 pour l'Azote ( $N_2$ ), 1 pour l'Argon (Ar))



**Figure I.15**: tank d'oxygène



**figure I.16**: 2 tanks d'Azote et autre Argon

**Remarque** : les bandes en jaune c'est l'oxygène, en rouge c'est l'azote et en gris c'est l'argon

### I.7.1.4. Gamme des produits :

La centrale à oxygène (COX) se produise :

- L'oxygène liquide et gazeux.
- L'azote liquide et gazeux.
- L'argon liquide.
- L'hydrogène gazeux pour les besoins de son processus.

### I.7.1.5. Capacité de production :

Les produits liquides	Les produits gazeux
Oxygène 20 000 litres/jour	Oxygène 33 000 Nm <sup>3</sup> /h
Azote 10 000 litres/jour	Azote 17 000 Nm <sup>3</sup> /h
Argon 4 500 litres/jour	Hydrogène 40 Nm <sup>3</sup> /h

**Tableau I.2** : la capacité de production de la COX

L'installation d'hydrogène a été mise en marche depuis 10/04/2001 pour les besoins du processus de production d'argon.

### I.7.1.6. Clientèle de la centrale à oxygène : [4]

La centrale à oxygène répond aux besoins de différents ateliers du complexe et en plus, elle répond aux besoins des différents secteurs d'activité tel que :

- ✓ Le secteur sanitaire de la wilaya d'ANNBA.

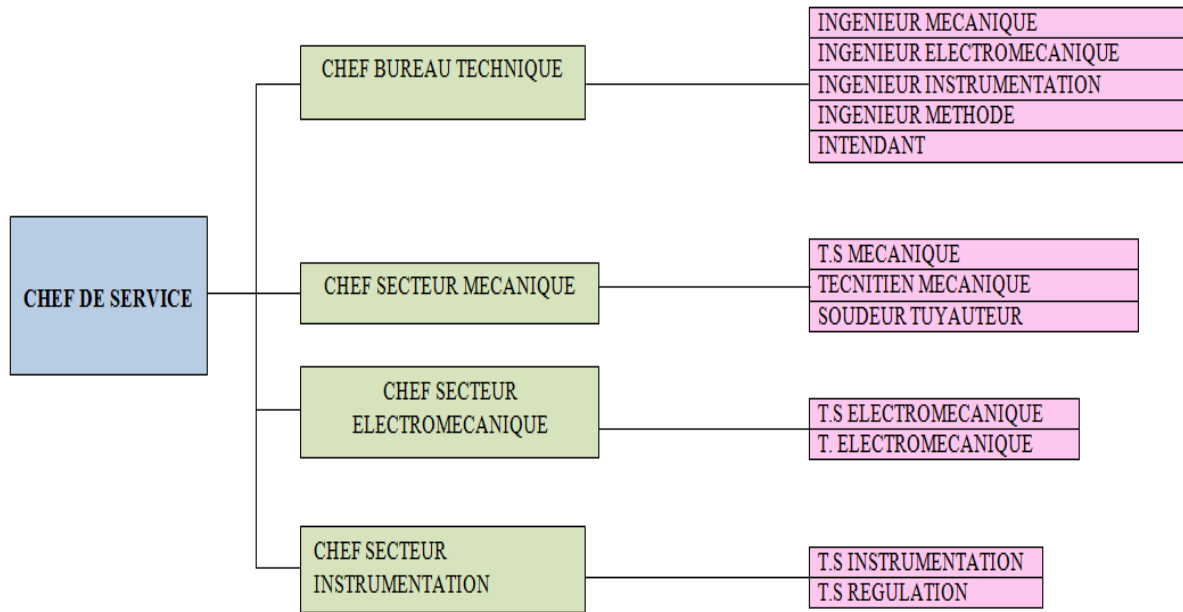
On peut citer à titre d'exemple non limitatif :

- L'université d'Annaba.
- Les cliniques privées.
- Secteur de la métallurgie.
- L'industrie mécanique et pétrochimique.

### I.7.1.7. La maintenance au niveau de la centrale :

La maintenance la plus utilisée au niveau de la COX est la maintenance corrective.

Le service maintenance de la centrale à oxygène est structuré selon l'organigramme suivant :



**Figure I.17** : l'organigramme de service maintenance de la COX [3]

### I.7.1.8. Description du processus de production de l'unité :

La composition de l'air atmosphérique, si l'on excepte l'humidité, ne varie que dans de très faibles limites. Les composants essentiels de l'air sec sont résumés dans le tableau suivant :

Médium	Symbole chimique	% Volume	% Pondéral
Azote	N <sub>2</sub>	78,1	75,5
Oxygène	O <sub>2</sub>	20,95	23,1
Argon	Ar	0,93	1,29
Dioxyde de carbone	CO <sub>2</sub>	Env. 0,03	0,05
Autre gaz rares	---	0,002	---

**Tableau I.3** : la composition de l'air

L'unité de fractionnement de l'air de l'usine d'El-Hadjar fonctionne selon le principe de liquéfaction du procédé Linde : c'est à dire que les températures nécessaires à la liquéfaction de l'air sont atteintes après plusieurs étapes. [5]

#### I.7.1.8.1. Production de l'Oxygène « O<sub>2</sub> » et l'Azote « N<sub>2</sub> » :

##### a) Partie aspiration et compression de l'air ambiant :

- 1- L'air atmosphérique subit une aspiration à 12m du sol grâce à un aspirateur avec tous les impuretés au niveau de l'air
- 2- L'air automatiquement doit passer au filtre primaire, c'est un filtre à rouleau permet d'absorbé tous corps étrangers telle que les poussières, les impuretés dangereuses.
- 3- L'air passé au filtre secondaire, c'est un filtre à rouleau permet d'absorber les fines gouttelettes H<sub>2</sub>O.

- 4- L'air entre dans le turbocompresseur étagé dans les conditions normales de pression 1bar, température 25.6 °C sa dépend de la variation saisonnière, et sort de la 5<sup>ème</sup> étage du turbocompresseur de pression d'ordre de 5,2bar, température d'ordre de 98°C, et de débit égale à 72000 Nm<sup>3</sup>/h.

### b) Partie refroidissement de l'air et de l'eau :

- 1- L'eau vient de la bache à eau à l'aide de deux pompes à eau de refroidissement, est refroidie avec de l'Azote impure dans la colonne de refroidissement. Dans cette colonne l'Azote impure permet d'extraire la quantité de chaleur présente dans l'eau (H<sub>2</sub>O), ce dernier représente l'enceinte chaude et l'Azote (N<sub>2</sub>) représente l'enceinte froide c'est un phénomène physique.
- 2- Dans la colonne de lavage l'air entré du turbocompresseur est refroidi avec de l'eau qui est ruisselé après le refroidissement dans la colonne de refroidissement de façon à lui perdre toute la chaleur accumulée au cours de la compression.

### c) Partie séchage (la résistance & l'accumulateur) :

- 1- La résistance : c'est une résistance électrique permet d'augmenté la température de l'azote impure (N<sub>2</sub>) passant par trois éléments chauffants ces derniers jouent un rôle important dans le passage de l'azote appartient de ces circuits pour arriver à une température de 180000 °C c'est la température de la résistance mai par contre les éléments chauffants arrivant à la température de 300°C ÷ 400 °C mais tout jours gardent la température de 400°C.
- 2- L'accumulateur de chaleur : c'est un récipient cylindrique volumineux à base de gravier permet d'accumulé et de stocké la chaleur la chaleur pour alimenté les tamis moléculaires.

### d) L'épuration de l'air :

L'air ambiant n'est pas pur, donc il faut le purifier pour éviter la formation de bouchon de neige carbonique et de glace lors de refroidissement. D'autre part, l'oxygène réagit chimiquement donc il y a un risque d'explosion à la présence des hydrocarbures.

La purification de fait à l'aide des tamis moléculaires grâce à les produits chimiques présentes dans les plaques des tamis « l'Alumine Al<sub>2</sub>O<sub>2</sub> » qui permet d'absorbé l'humidité, et « le 13X » permet d'absorbé les hydrocarbures.

### e) Les revex :[4]

Pour atteindre les basses températures nécessaires à sa liquéfaction l'air traverse un système d'échangeurs de chaleur réversibles appelés **revex** où circulent à contre-courant les fluides produits par la distillation de l'air lui-même, et qui sont donc à des très basses températures. Ce système d'échangeurs réversibles se divise en deux blocs, l'air suivant son cheminement traverse successivement ces deux bloc en cédant progressivement sa chaleur aux fluides effluents /c'est-à-dire que l'air devient de plus en plus froid au fur et à mesure qu'il entre du premier et sort du deuxième bloc : selon le principe même des échangeurs de chaleur.

Ce qui conduit donc au réchauffement des effluents depuis leur entrée jusqu' leur sortie. L'air subit donc deux refroidissement successifs : dans le premier bloc, l'air est soumis à un

refroidissement suite à l'échange de chaleur avec les effluents provenant du deuxième bloc où ils étaient en contact avec de l'air refroidi mais encore à une température inférieure à la leur. Ce bloc (bloc 1) est appelé **bout chaud** puisqu'il met en contact l'air chaud entrant et les effluents réchauffés (par l'air) dans le deuxième bloc.

Le deuxième refroidissement s'effectue dans les blocs suivant au sein duquel, l'air (moins chaud) rencontre les effluents rentrants à contre-courant à très basses températures et leur cède ce qui lui reste de sa chaleur, pour sortir du deuxième bloc (saturé) à une température proche de sa température de liquéfaction.

Ce deuxième bloc de l'échangeur de chaleur **revex** est appelé **bout froid**, puisqu'en son sein s'effectue un échange de chaleur entre l'air déjà froid (1<sup>er</sup> refroidissement) et les effluents à leur plus basse température (température d'entrée). Le deuxième rôle des échangeurs **revex** qui consiste à l'élimination de l'humidité (contenue dans L'air) dans le bout chaud, et du CO<sub>2</sub> (dioxyde de carbone) au niveau du bout froid. Les incidents néfastes qu'induirait la présence de ces impuretés des (humidités, CO<sub>2</sub>, hydrocarbures) sur le bon fonctionnement de la colonne de distillation de l'air, et les graves problèmes.

### f) La liquéfaction : [4]

L'air sortant des échangeurs **revex**, purifié de ces impuretés (humidité, CO<sub>2</sub>) et n'étant constitué que d'oxygène, d'azote et de gaz rares, se dirige vers l'installation de fractionnement proprement dite et qui consiste en une double colonne de distillation : une première colonne (C1) à haute pression reliée à une deuxième colonne (C2) à moyenne pression par un bloc condenseur.

L'air entre dans la colonne (C1) subit une détente qui provoque sa séparation (fractionnement). En raison de la différence de volatilité de l'oxygène et de l'azote, on aura en bas de colonne une vapeur d'azote.

A partir de (C1) un système de soutirages et de reflux alimente la colonne (C2) en liquide riche en oxygène. Il s'y effectue (dans C2) une deuxième distillation due à une détente flash, ceci afin d'améliorer la pureté en oxygène qui est le produit principal de l'unité.

A partir de la colonne (C2), sont récupérés les deux produits majoritaires dans l'air (oxygène et l'azote) sous deux formes : forme gaz et forme liquide.

### g) Partie des échangeurs :

Les échangeurs permettent de refroidir l'air et l'obtention des températures de près liquéfaction à basse température

### h) Le stockage :

- 1) L'Oxygène liquide doit stocker dans un tank de 650m<sup>3</sup> avec une pureté de 99% et d'une température d'ordre de -183°C.
- 2) L'Azote liquide doit stocker dans deux tanks de 110m<sup>3</sup> avec une pureté de 156 ppm d'O<sub>2</sub> avec une température d'ordre de -195°C ÷ -196°C.
- 3) L'Oxygène et l'Azote gaz sont stockés dans des cibles.

### I.7.1.8.2. Production de l'Argon « Ar » :[4]

La courbe de tension de vapeur de l'argon se situe entre de l'oxygène et de l'azote. Son comportement dans les colonnes de distillation se situera entre celui de l'oxygène et celui de l'azote.

Dans la colonne moyenne pression (MP), la concentration en argon très faible, tout l'argon entrant dans la colonne ressortira avec le liquide pauvre, et le liquide riche, la majeure partie sortant avec le liquide riche.

Dans la colonne basse pression (BP), l'argon entrant est condensé dans les plateaux supérieurs et vaporisé dans les plateaux inférieurs, finalement il se formera **ventre** argon dans la colonne BP, la concentration augmentera en partant du bas de la colonne puis passe par un maximum pour diminuer.

On soutirera donc vers le milieu de la colonne BP, un mélange gazeux contenant de l'oxygène, de l'argon et de l'azote, c'est la mixture argon.

Ce mélange sera traité dans une colonne supplémentaire appelé colonne de mixture argon afin de diminuer la concentration en oxygène, le produit obtenu s'appelle **Argon brut**.

**Le stockage :** l'argon doit stocker dans un tank de 55m<sup>3</sup> avec une température d'ordre de -186 °C.

### I.8. Conclusion :

Durant mon stage de fin d'étude du master en maintenance industrielle et fiabilité mécanique au sein d'une des plus grandes entreprises en Algérie « **SIDER ELHADJAR** », j'ai découvert le monde industriel et accumulé plusieurs connaissances pratiques sur la production au niveau de cette usine.

Le stage effectué au niveau de la centrale à oxygène nous a permis d'acquérir les informations nécessaires pour la production de l'oxygène, l'azote et l'argon, et nous a donné l'occasion d'acquérir une expérience d'entreprise qui sera sans nul doute d'une importance non négligeable pour notre réussite professionnelle.

Cette expérience m'a permis de choisir des équipements correspond à mon sujet de fin d'étude. Ces équipements sont installés au niveau de l'unité COX03.

Au niveau de la centrale à oxygène la politique de la maintenance utilisé est la maintenance corrective palliative et vu les coûts augmentés de la maintenance chaque année environ 9848.8 K.DZD cette dernière ne répond pas aux exigences de la centrale donc on va essayer de mettre en place un plan de maintenance préventive optimal pour ces équipements dans le but de minimiser les coûts et le temps des interventions et maximiser la qualité de la maintenance.

### II.1. Introduction :

Actuellement les industries sont confrontées à des problèmes industriels majeurs qui menacent leur pérennité et remettent en cause leurs objectifs. Donc pour éviter ces problèmes il faut faire la maintenance des équipements et chaque des usines industrielles utilise la prévention et ce dernier a des méthodes, et parmi ces méthodes on trouve le contrôle non destructif, ce genre de méthode utilisé par la majorité de entreprises car il est valable sans dégradation des équipements. [2]

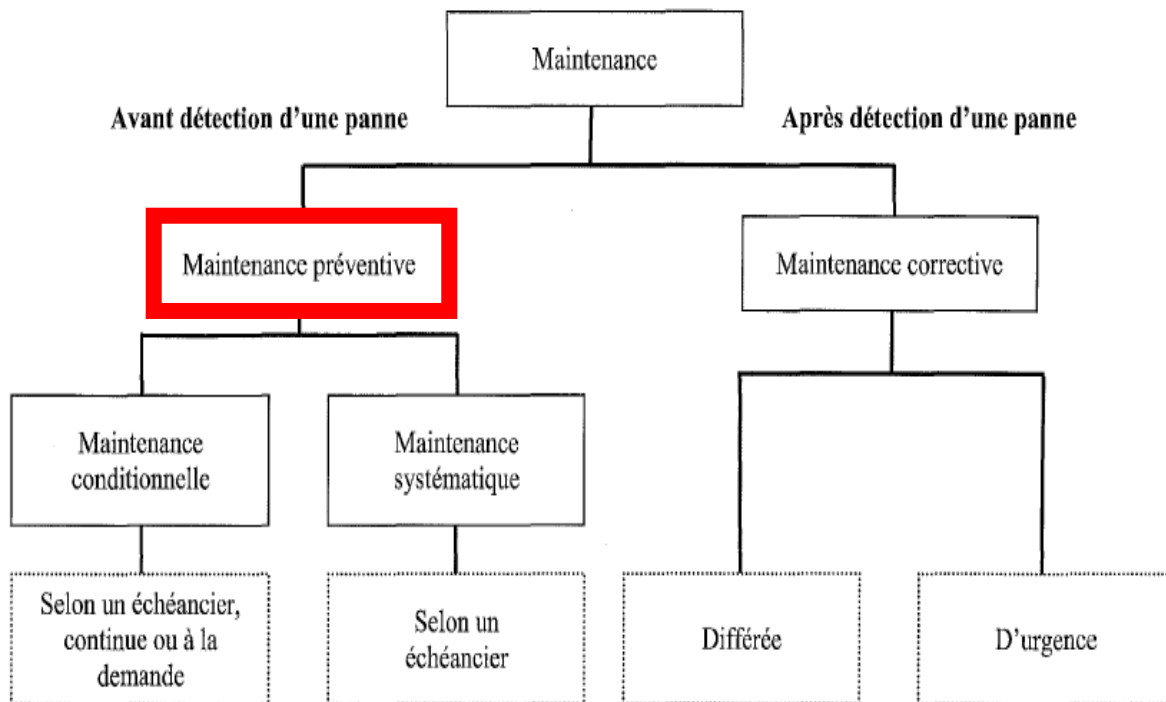
### II.2. Notions sur la maintenance :[6]

#### II.2.1. Définitions de la maintenance :

- Selon la norme **NF-EN 13306** : « *La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.* »
- Selon **AFNOR X 60-10** : « *la maintenance est l'ensemble des activités à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison de fonctions techniques, administratives et de management.* »

#### II.2.2. Différents types de maintenance :

Il existe deux principales familles de maintenance que l'on peut repérer sur la **figure II.1**: la maintenance corrective et la maintenance préventive. La maintenance corrective est celle que le système subit lorsque la panne est déjà présente et qu'il faut réparer. La maintenance préventive est celle qui permet d'anticiper et de prévenir les défaillances.



**Figure II.1** :Annexe A de la norme NF EN 13306 X 60-319 de juin 2001

### II.2.2.1. Maintenance corrective :

Selon la norme **NF-EN 13306** la maintenance corrective est définie comme suite : « *maintenance exécutée après défaillance et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise.* »

La maintenance corrective est souvent perçue comme la forme primaire de la maintenance car l'intervention a lieu « en urgence » une fois la défaillance survenue.

Comme le montre la **figure II.2**, la logique de cette politique de maintenance est assez simple : lorsqu'une machine est défectueuse, il faut la réparer, ce qui sous-entend que si elle fonctionne, on n'y « touche » pas.

Les défauts, pannes ou avaries diverses exigeant une maintenance corrective entraînent une indisponibilité immédiate ou à très brève échéance des matériels affectés et/ou une dépréciation en quantité et/ou qualité des services rendus.

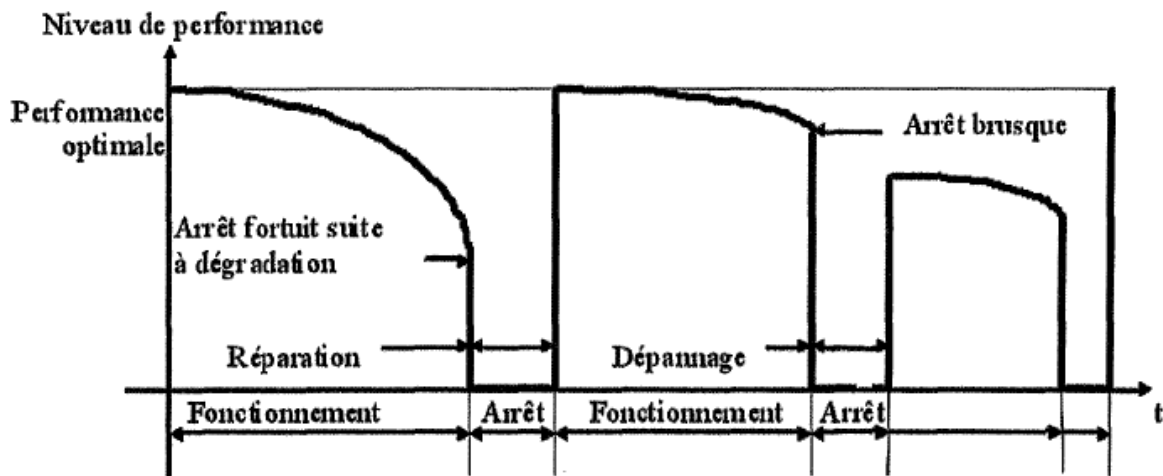


Figure II.2 :Schématisation de la maintenance corrective

Il existe deux types de maintenance corrective : la maintenance curative et la maintenancepalliative.

- **Maintenance curative** : ce type de maintenance permet de remettre définitivement en état le système après l'apparition d'une défaillance. Elle se caractérise par la recherche des causes initiales d'une défaillance en vue de réparer l'équipement. Cette remise en état du système est une réparation durable.
- **Maintenance palliative** : opération destinée à remettre un équipement dans un état provisoire de fonctionnement de manière à ce qu'il puisse assurer une partie des fonctions requises. L'intervention a un caractère provisoire dans le sens où elle nécessitera forcément une intervention ultérieure.

L'objectif principal de la maintenance corrective est de remettre le système en état de fonctionnement dans un temps minimum (optimiser le temps d'indisponibilité après défaillance) tout en respectant les règles de sécurité. Ce type de maintenance est réservé aux matériels peu coûteux, non stratégiques pour la production et dont la panne aurait peu d'influence sur la sécurité.



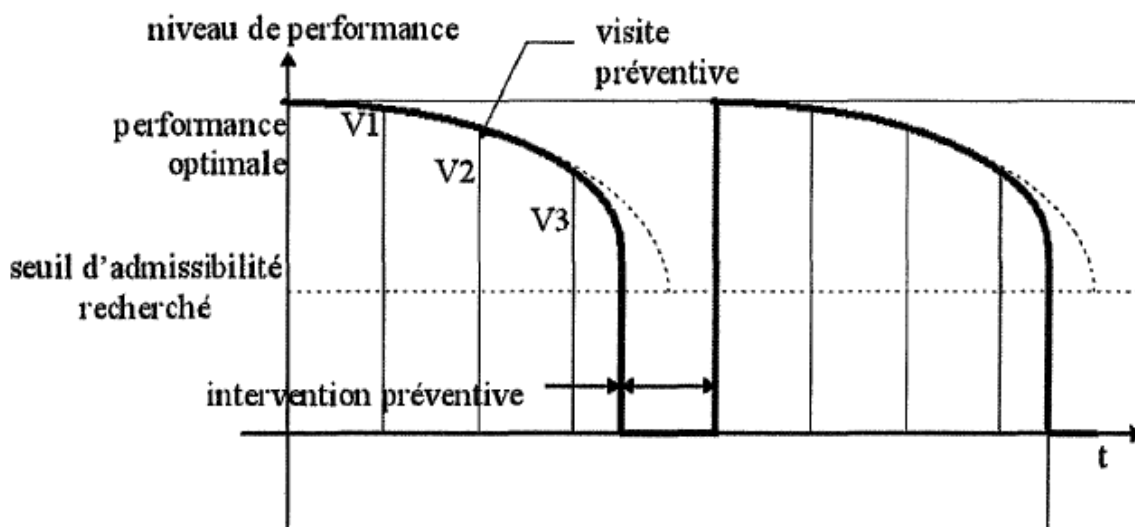
### II.2.2.2. Maintenance préventive :

Selon EN 13306 (avril 2001) : « *Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien* ».

La maintenance préventive se fonde sur l'adage "*mieux vaut prévenir que guérir*", sur la connaissance des machines, la prise en compte des signes précurseurs et le réalisme économique.

Comme le montre la **figure II.3**, les visites préventives permettent de visualiser le niveau de performance d'un équipement en vue de prévoir une intervention préventive.

La maintenance préventive vise à réduire les coûts des pannes et de maintenance en prenant pour base le constat que la plupart des réparations et immobilisations coûteuses auraient pu être réduites ou évitées par un entretien constant et préventif. En effet elle doit permettre d'éviter les défaillances des matériels en cours d'utilisation et l'analyse des coûts doit mettre en évidence un gain par rapport aux défaillances qu'elle permet d'éviter.



**Figure II.3** : Schématisation de la maintenance préventive

Il existe différents types de maintenance préventive :

**Maintenance préventive systématique** : « *Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien* » (EN 13306 : avril 2001).

Cette méthode nécessite de connaître : le comportement des équipements, les usures et les modes de dégradation. Elle intervient à intervalles fixés sur la base du minimum de vie des composants, donné par l'expérience et/ou par le constructeur. C'est pourquoi ce type de maintenance est aussi appelé maintenance préventive fondée sur la durée de fonctionnement.

La maintenance préventive systématique, schématisé par la **figure II.4**, se traduit donc par des interventions planifiées qui consistent à nettoyer, réparer ou remplacer périodiquement un organe sans contrôle préalable de l'équipement.

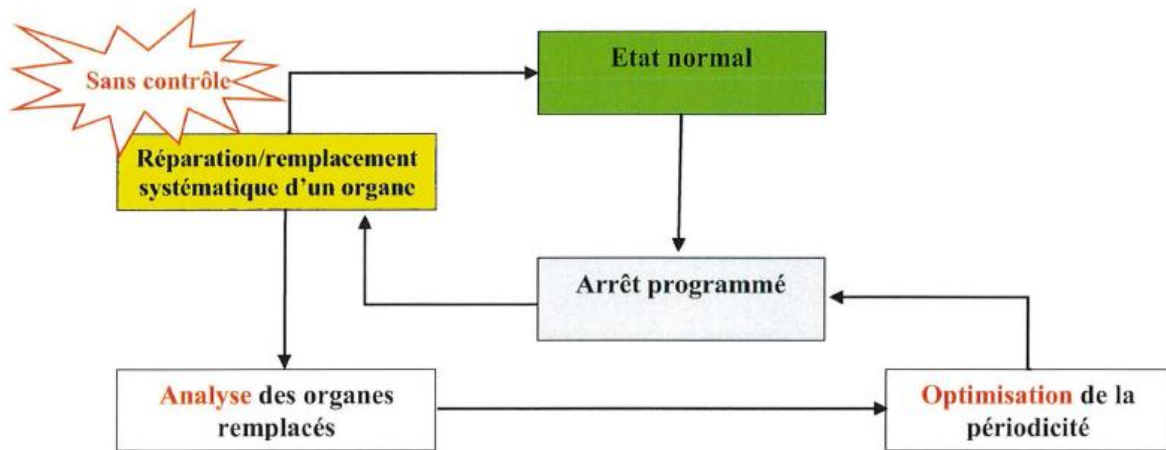


Figure II.4 : Cycle de maintenance préventive systématique

**Maintenance préventive conditionnelle :** « Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent. La surveillance du fonctionnement et des paramètres peut être exécutée selon un calendrier, ou à la demande, ou de façon continue » (EN 13306 : avril 2001).

La maintenance préventive conditionnelle, schématisé par la *figure II.5*, se traduit par des visites préventives qui consistent à suivre les paramètres significatifs de la dégradation du bien. Lorsque le paramètre suivi dépasse le seuil d'alarme il faut prévoir une intervention pour remettre en condition normale l'équipement. En effet, la détection d'un dépassement d'un seuil d'alerte affecté à l'évolution du paramètre étudié déclenche le diagnostic des causes de la défaillance. Les conclusions de ce diagnostic permettent de définir l'intervention de maintenance.

**DETECTION ⇒ DIAGNOSTIC ⇒ INTERVENTION**

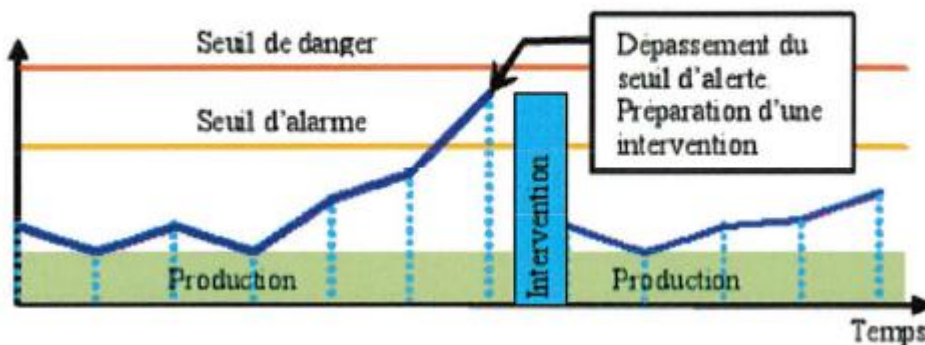


Figure II.5 : Schématisation de la maintenance préventive conditionnelle

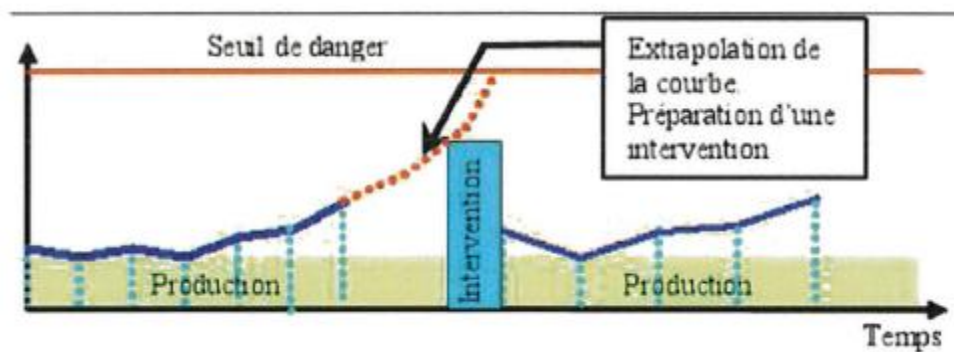
La maintenance préventive conditionnelle est donc subordonnée à des mesures et à des diagnostics précis de l'état de dégradation de la machine. La nature de ces mesures dépend de la machine à suivre. Cela peut être des mesures de vibration, des analyses d'huile, des thermographies infrarouges...

Lorsque le seuil admissible de ces défauts est dépassé, il devient nécessaire de programmer l'arrêt de la machine. Ceci doit être fait en perturbant au minimum le cycle de production, c'est à dire entre deux séries ou lors d'un arrêt programmé.

**Maintenance préventive prévisionnelle :** « Maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien » (EN 13306 : avril 2001).

La maintenance préventive prévisionnelle, schématisée par la *figure II.6*, consiste à extrapoler la courbe de dégradation d'un organe pour prévoir une intervention.

**PREVISION ⇒ DIAGNOSTIC ⇒ INTERVENTION**



**Figure II.6 :** Schématisation de la maintenance préventive prévisionnelle

La courbe d'évolution d'un défaut étant connue, il est possible d'en extrapoler sa tendance pour prévoir la date de défaillance. A partir de cette prévision, la date du diagnostic et du déclenchement de l'intervention de maintenance est planifiée afin que cette dernière soit terminée avant que le niveau requis pour le paramètre étudié ne soit dépassé.

### **Buts de la maintenance préventive :**

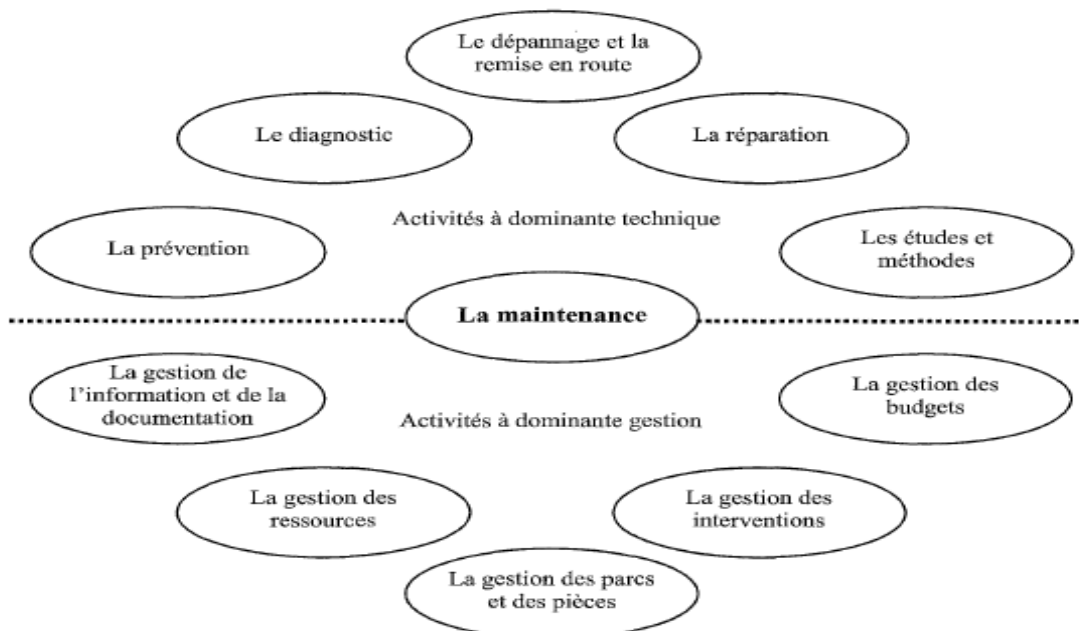
- ✓ Augmenter la durée de vie des matériels.
- ✓ Diminuer la probabilité des défaillances en service.
- ✓ Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne.
- ✓ Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective.

- ✓ Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions.
- ✓ Eviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, etc.
- ✓ Améliorer les conditions de travail du personnel de production.
- ✓ Diminuer le budget de maintenance.
- ✓ Supprimer les causes d'accidents graves.

### II.2.3. Le rôle de la maintenance :

Le rôle principal d'un service maintenance est de maintenir les capacités opérationnelles des moyens de production, ainsi que leurs valeurs patrimoniales. Ces capacités opérationnelles sont nécessaires pour servir une commande non pas lorsque l'entreprise peut l'honorer, mais au moment où le client la demande. La valeur patrimoniale peut s'envisager comme l'allongement de la durée de vie utile des machines et équipements, ce qui repousse ou annule la nécessité d'un nouvel investissement, ou en facilite la revente.

La fonction maintenance peut être présentée comme un ensemble d'activités regroupées en deux sous-ensembles : les activités à dominante technique et les activités à dominante gestion. Ces différentes activités sont représentées dans la *figure II.7*: contenu de la fonction maintenance.



**Figure II.7 :** Contenu de la fonction maintenance

Ainsi, la fonction maintenance est devenue, avec le temps, un domaine complexe où interviennent différentes compétences parmi lesquelles on trouve les méthodes de recherche opérationnelle pour l'optimisation de divers aspects : l'optimisation des coûts, la gestion des stocks des pièces de rechanges, la planification et l'ordonnancement des interventions compte tenu des capacités d'action de l'entreprise, les compétences pour le diagnostic et pour la prédiction afin d'accomplir les actions de maintenance préventive, etc...

### II.2.4. Objectifs de la maintenance :

Les objectifs de la maintenance, schématisés dans la *figure II.8*, sont nombreux :

- Assurer la qualité et la quantité des produits fabriqués, tout en respectant les délais.
- Optimiser les actions de maintenance (exemple : réduire la fréquence des pannes).
- Contribuer à la création et au maintien de la sécurité au travail.
- Consolider la compétitivité de l'entreprise (exemple : améliorer la productivité).

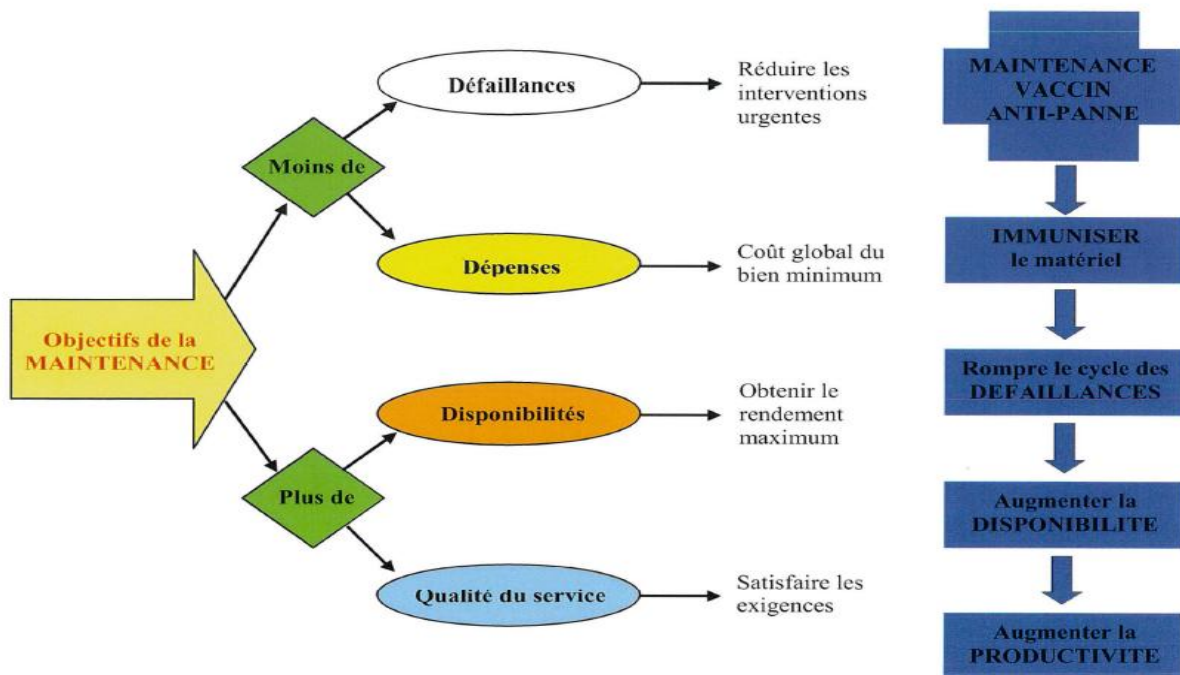


Figure II.8 : Schématisation des objectifs de la maintenance

### **II.3. Conclusion :**

Les entreprises sont de plus en plus sensibilisées à l'importance des coûts induits par les défaillances accidentelles des systèmes de production. Alors que la maintenance, jusqu'à très récemment, était considérée comme génératrice de dépenses, les entreprises sont de plus en plus conscientes qu'elle peut contribuer d'une manière significative à la performance globale de l'entreprise.

La stratégie de maintenance a des répercussions directes sur l'exploitation d'un système, sur la production et bien évidemment sur les charges financières. Lors du choix de la méthode de maintenance, il faut arbitrer entre les performances que l'on souhaite obtenir du système de production et les coûts que l'on est prêt à assumer pour le maintenir. Il faut donc trouver un équilibre entre un niveau de disponibilité des équipements que l'on veut garantir et un niveau acceptable des coûts directs de maintenance (personnel, matériels).

Si produire c'est exploiter un équipement de production pour en obtenir des produits finis, maintenir c'est assurer la disponibilité de la production.

### III.1. Théories sur la FMD :

#### III.1.1. La fiabilité :

##### III.1.1.1. Définitions :

**Définition 01 :** Selon la NF X 06-501 : « la fiabilité est la caractéristique d'un Dispositif exprimée par la probabilité que ce dispositif accomplisse une Fonction requise dans des conditions d'utilisation données et pour une Période de temps déterminée. »

**Définition 02 :** « Fiabilité (Reliability) ; c'est l'aptitude d'une entité à accomplir une Fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps Donnée, elle se mesure par le nombre de défaillance et le temps de bon Fonctionnement (**MTBF**) Mean Time between failure ou le **MUT** ; Mean UP Time. »

##### III.1.1.2. Les différentes sortes de fiabilité :

➤ **Fiabilité prévisionnelle :**

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

➤ **Fiabilité opérationnelle :**

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

➤ **Fiabilité intrinsèque :**

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

➤ **Fiabilité extrinsèque :**

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

##### III.1.1.3. les principales lois de probabilité utilisées en fiabilité sont :

a) *lois discrètes :*

- Loi binomiale.
- Loi de poisson.

- Loi hypergéométrique.

### b) loi continues :

- Loi exponentielle.
- Loi normale.
- Loi de WEIBULL.

### III.1.1.4. Terminologie :

La détermination de la fiabilité et sa terminologie varie suivant le type de dispositif à analyser. Ainsi, la terminologie employée sera différente s'il s'agit d'un dispositif réparable ou non réparable.

#### a) Dispositif réparable :

La possibilité d'un bien à être réparés et remplacer un ou plusieurs constituants par d'autres neufs sans échange de ceux non défaillant ils sont caractérisés par :

**TBF** : le temps de bon fonctionnement.

**MTBF** : moyenne des temps de bon fonctionnement (Mean Time Between Failures).

**MTTR** : moyenne des temps de réparation (Mean Time To Recover)

**MDT** : moyenne des temps d'arrêt.

**MUT** : temps moyen de disponibilité (*mean up time*).

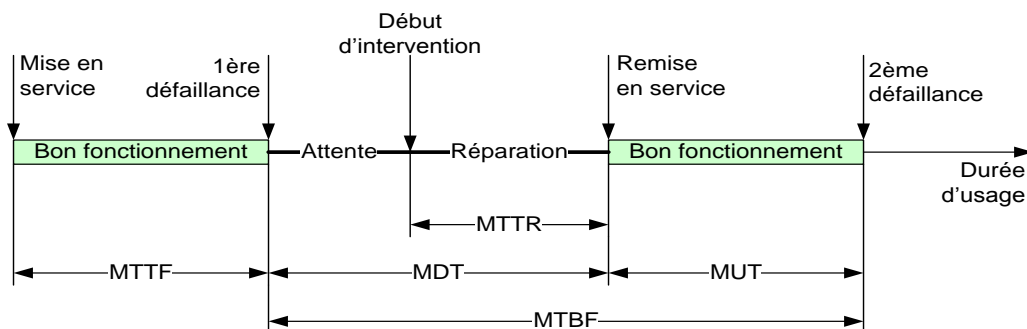
#### b) Dispositif non réparable :

La défaillance d'un composant de ces dispositifs entraîne le changement de tous les organes donc de l'ensemble, ils sont caractérisés par :

**TBF** : Le temps de bon fonctionnement.

**$\lambda(t)$**  : Le taux de défaillance.

**MTTF** : moyenne des temps avant la 1<sup>ère</sup> défaillance (Mean Time To Failure)



**Figure III.1** : Les principaux temps qui caractérisés les deux types de dispositif.



### III.1.1.5. Modèle de WEIBULL :[7]

C'est un modèle Mathématique particulièrement bien adapté à l'étude statistique des défaillances. Ce modèle mathématique couvre bien un assez grand nombre de distributions de durées de vie. Il a été d'abord utilisé lors de l'étude de la fatigue des matériaux, il a été utile dans l'étude des distributions de défaillance des tubes à vide et est actuellement d'un usage presque universel en fiabilité.

- Sa fonction de répartition a pour expression :

$$\left. \begin{aligned} F(t) &= 1 - e^{-(t-\gamma/\eta)^\beta} && \text{si } t > \gamma \\ F(t) &= 0 && \text{si } t \leq \gamma \end{aligned} \right\} \quad \text{avec : } \beta, \eta > 0 ; \gamma \geq 0 \quad \text{III.1}$$

Les paramètres s'appellent :

$\gamma$  : paramètre de position (location parameter)

$\beta$  : Paramètre de forme (Shape parameter)

$\eta$  : Paramètre d'échelle (scale parameter)

Sa fonction de fiabilité  $R(t)$  est donnée par :

$$R(t) = e^{-(t-\gamma/\eta)^\beta} \quad \text{III.2}$$

Sa fonction de densité  $f(t)$  est donnée par :

$$f(t) = \frac{dR(t)}{dt} = \begin{cases} \frac{\beta}{\eta} \left[ \frac{t-\gamma}{\eta} \right]^{\beta-1} e^{-(t-\gamma/\eta)^\beta} & \text{pour } t > \gamma \\ f(t) = 0 & \text{pour } t \leq \gamma \end{cases} \quad \text{III.3}$$

- Si  $\gamma=0$  et  $\beta=1$ ,  $f(t) = \frac{1}{\eta} e^{-t/\eta}$

C'est la distribution exponentielle, cas particulier de la distribution de WEIBULL.

- Si  $\beta \geq 3$ , la distribution de WEIBULL se rapproche de la loi normale dont on ne peut plus la distinguer pratiquement à partir de  $\beta=4$ .
- *Moment* : l'espérance mathématique de cette distribution est donnée par :

## Chapitre III : Théorie et application sur la FMD

$$E(t) = \int_0^{+\infty} t f'(t) dt = \gamma + \frac{\eta}{\beta} \Gamma\left[\frac{1}{\beta}\right] = \gamma + \eta \Gamma\left[1 + \frac{1}{\beta}\right] \text{ III. 4}$$

- Si  $\gamma=0$ , ce qui est un cas assez général :

$$E(t) = \eta \Gamma\left[1 + \frac{1}{\beta}\right] \text{ III. 5}$$

*Remarque :* rest le symbole de la fonction GAMMA (une fonction eulérienne de seconde espèce).

$$\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} e^{-t} t^{x-1} dt \text{ III. 6}$$

- Si  $\gamma=0$  les moments bruts étaient donnés par l'expression :

$$E(t^x) = \eta^x \Gamma\left[1 + \frac{x}{\beta}\right] \text{ III. 7}$$

On peut ainsi calculer la variance puisque :

$$V(t) = E(t^2) - E^2(t) \text{ III. 8}$$

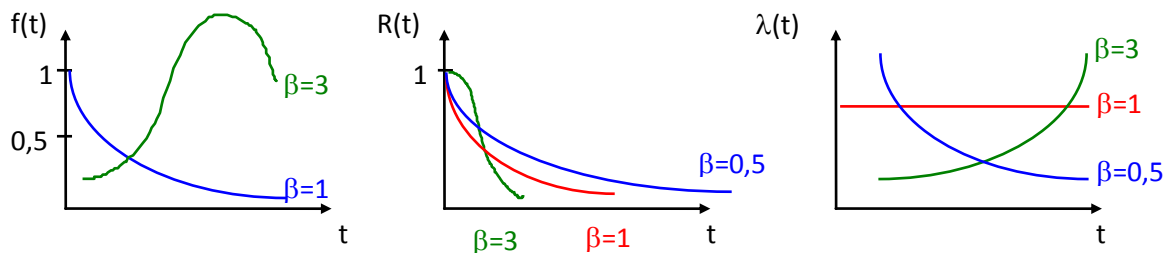
Et alors :

$$V(t) = \eta^2 \Gamma\left[1 + \frac{2}{\beta}\right] - \eta^2 \Gamma\left[1 + \frac{1}{\beta}\right]^2 \text{ III. 9}$$

Taux de défaillance, le calcul donne :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t}{\eta}\right]^{\beta-1} \text{ III. 10}$$

- Si  $\beta > 1$ , le taux de défaillance est croissant, caractéristique de la zone de vieillesse
  - $1,5 < \beta < 2,5$  : fatigue
  - $3 < \beta < 4$  : usure, corrosion
- Si  $\beta = 1$ , le taux de défaillance est constant, caractéristique de la zone de maturité
- Si  $\beta < 1$ , le taux de défaillance est décroissant, caractéristique de la zone de jeunesse



**Figure III.2 :** variation de  $f(t)$ ,  $R(t)$  et  $\lambda(t)$  par les différentes valeurs de  $\beta$

### III.1.1.6. Test de Kolmogorov- Smirnov: [7]

L'idée est de comparer la fonction réelle de répartition avec celle théorique. Nous mesurons l'écart, point par point entre ces deux fonctions.

$$D_{ni} = |F(t_i) - Fe(t_i)| \text{ III. 11}$$

Où :

$Fe(t_i)$  : la fonction de répartition théorique.

$F(t_i)$ : la fonction de répartition réelle.

Avec :

$$Fe(t_i) = \sum n_i / N + 1 \text{ III. 12}$$

- Si  $N > 20$  :

$$F(t_i) = 1 - R(t_i) = 1 - e^{-(t-\gamma/\eta)} \text{ III. 13}$$

Nous avons pris la valeur maximale :

$$D_{n.max} = |Fe(t_i) - F(t_i)| \text{ III. 14}$$

Avec la valeur  $D_{n\alpha}$  qui est donnée par le tableau de Kolmogorov-Smirnov, si :

$D_{n.max} > D_{n\alpha}$  : Donc nous refusons l'hypothèse du modèle théorique.

$D_{n.max} < D_{n\alpha}$  : Donc nous acceptons l'hypothèse du modèle théorique.

### III.1.2. La maintenabilité :

#### III.1.2.1. Définition :

Selon NF EN 13306 : « la maintenabilité est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits. »

#### III.1.2.2. Les facteurs liés à la maintenabilité :

La maintenabilité d'un équipement dépend de nombreux facteurs parmi ces facteurs il y a :

## Chapitre III : Théorie et application sur la FMD

Facteurs liés à <b>L'EQUIPEMENT</b>	<i>Facteurs liés au</i> <b>CONSTRUCTEUR</b>	<i>Facteurs liés à</i> <b>la MAINTENANCE</b>
- documentation - aptitude au démontage - facilité d'utilisation	- conception - qualité du service après-vente - facilité d'obtention des pièces de rechange - coût des pièces de rechange	- préparation et formation des personnels - moyens adéquats - études d'améliorations (maintenance amélioratives)

**Tableau III.1** : Les facteurs liés à la maintenabilité

On peut améliorer la maintenabilité en :

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

### III.1.2.3. La fonction de maintenabilité :

C'est la probabilité pour qu'un dispositif soit réparé avant (t)

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad \text{III. 15}$$

$\mu$  : est le taux de réparation tel que

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad \text{III. 16}$$

MTTR : Moyenne des Temps Techniques de Réparation (Mean Time To Repair)

$$MTTR = \frac{\sum \text{Temps d'intervention pour } n \text{ pannes}}{\text{Nombre de pannes}} \quad \text{III. 17}$$

### III.1.3. La disponibilité :

#### III.1.3.1. DÉFINITIONS :

**Définition 01** : Selon la norme (NF X60-010) la disponibilité est : "l'Aptitude d'un bien, sous les aspects combinés de sa fiabilité, maintenabilité et de l'organisation de la maintenance, à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions de temps déterminées"

**Définition 02 :** selon la norme NF X 60 – 500 : « La disponibilité est l’aptitude d’une entité à être en état d’accomplir une fonction requise dans des conditions données, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soit assurée ».

### III.1.3.2. Les différents types de disponibilité :

➤ **Disponibilité intrinsèque  $D_i$  :** Le calcul de la disponibilité intrinsèque  $D_i$  fait appel à 3 paramètres :

- **TBF :** temps de bon fonctionnement
- **TTR :** temps techniques de réparation
- **TTE :** temps techniques d’exploitation

$$D_i = \frac{TBF}{TBF + TTR + TTE} \quad III.18$$

➤ **Disponibilité moyenne  $D_m$  :** En l’exprimant par rapport à des temps moyens, la disponibilité moyenne.

$$D_m = \frac{TMD}{TMD + TMI} \quad III.19$$

TMD : le temps moyenne de disponibilité (TMD=MUT « Mean Up Time »).

TMI : le temps moyenne d’indisponibilité (TMI = MDT « Mean Down Time »).

➤ **Disponibilité opérationnel  $D_{op}$  :**

Elle est caractérisée par :

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

**MTI :** moyenne des temps d’indisponibilité

$$D_{op} = \frac{MTBF}{MTBF + MTI} < 1 \quad III.20$$

➤ **Disponibilité instantanée  $D(t)$  :** On se place dans l’hypothèse exponentielle, avec les taux de défaillance  $\lambda$  et de réparation  $\mu$  constants et indépendants du temps :

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad \text{et} \quad \mu = \frac{1}{MTTR}$$

On définit la disponibilité instantanée d’un système réparable par :

$$D(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad \text{III. 21}$$

- **Disponibilité asymptotique** : Quand  $t \rightarrow \infty$ ,  $D(t)$  tend vers une limite asymptotique  $D_\infty$  qui se traduit par les formules suivantes :

$$D_\infty = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\mu}} = \frac{1}{1 + \frac{MTTR}{MTBF}} \quad \text{III. 22}$$

Remarque : Le rapport ( $MTTR / MTBF$ ) est appelé le « **rapport de maintenance** ».

### III.2. Application FMD :

Parmi les équipements les plus défaillants dans la centrale à Oxygène (COX) au niveau de l'unité (COX03) les compresseurs, les pompes et les turbines. Dans cette étude on a choisir la machine la plus défaillante pour chaque type (un compresseur, une pompe et une turbine).

#### III.2.1. Premier cas « la Pompe PP 2467 A » :

##### III.2.1.1. La fonction de répartition théorique :

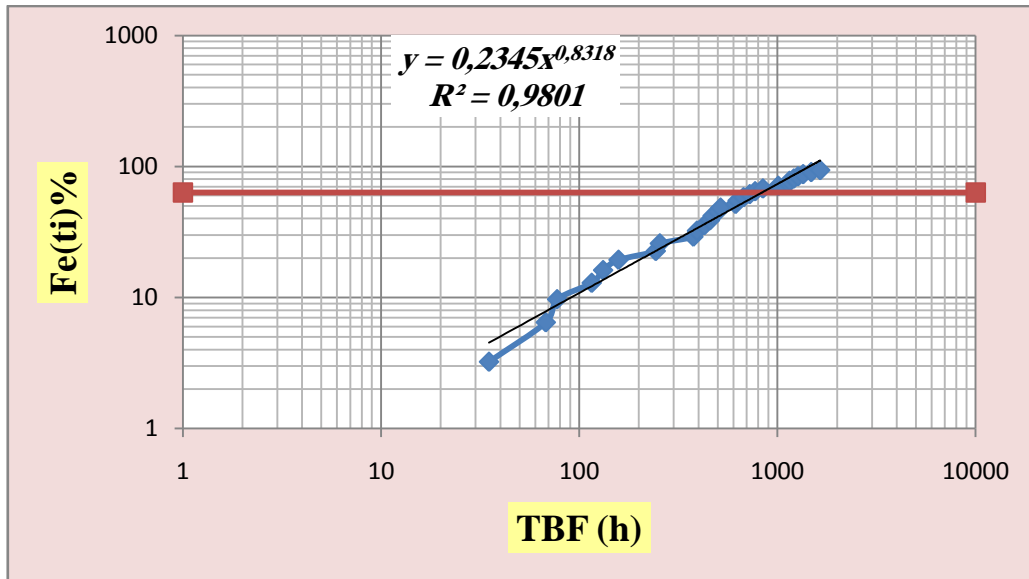
On commence par ordonner les TBF par ordre croissant et calculer leur fonction de répartition correspondante à partir de l'historique des pannes de la **pompe PP 2467 A** (fig. III.3) durant les trois dernières années 2015÷2017 (voir annexe 1).

On trace sur le papier d'Allen Plait ou le papier de WEIBULL la fonction de répartition théorique  $Fe(TBF)$  tell que :

Pour ( $N= 30 > 20$ ), on a :  $Fe(t_i) = \sum n_i / N + 1$  III. 12

**N** : nombre total des pannes

**ni** : fréquence des pannes



**Figure III.3 :** la fonction de répartition théorique Fe(t) % sur le papier de WEIBULL

Le graphe montre l'allure obtenue qui est sous forme d'une droite avec un  $\gamma$  est égal zéro.

D'après cette allure on peut détermine les paramètres de loi de WEIBULL tell que :

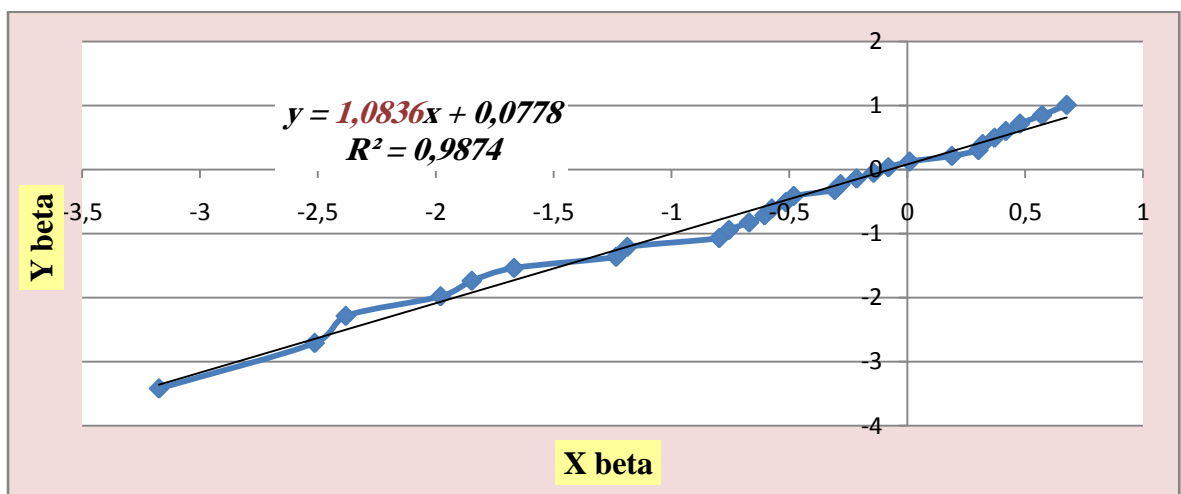
➤  $\gamma = 0h$  (parce qu'on a une droite)

➤  $\eta = e^{\frac{\ln(63.21) - \ln(0.2345)}{0.8318}}$   $\eta = 835.88374 h$

➤  $\beta$  c'est la tangente de l'allure qui est sous forme d'une droite et en fonction de

(X beta et Y beta) tell que :

$$X \text{ beta} = \ln((t-\gamma)/\eta) \quad ; \quad Y \text{ beta} = \ln(-\ln(1-Fe(t)))$$



**Figure III.4 :** L'allure qui détermine la valeur de  $\beta$  sur le papier WEIBULL

➤ **Donc :  $\beta = 1.0836$**

Validation de la loi de WEIBULL « **Le test de KOLMOGROF SIMIRNOV** » :

D'après le calcul de la différence entre les fonctions de répartition théorique et réelle voir(annexe1), on trouve :

$$D_{n, MAX} = D_{30, MAX} = \mathbf{0,0601688}$$

Et selon le tableau de K-S avec  $n=30$  et le risque de se trempé  $\alpha=5\%$ (voir annexe 7)

$$\text{On à } D_{n, \alpha} = D_{30, 0.05} = 0.240$$

$$\text{Donc : } D_{n, MAX} < D_{n, \alpha} \quad \text{ou} \quad \mathbf{0,0601688} < \mathbf{0.240}$$

**Alors** : on accepte le modèle de WEIBULL avec un risque  $\alpha=5\%$

**Le calcul de MTBF :**

La MTBF est souvent traduite comme étant la moyenne des temps de bon fonctionnement entre deux défaillances successives du même composant. Il est donné par la formule suivante :  $MTBF = A \cdot \eta + \gamma$

La valeur de « A » et « B » est donnée par le tableau de WEIBULL (annexe 8).

$$\mathbf{\beta=1.0836} \quad \mathbf{A=0,9803} \quad \mathbf{B=0,934} \quad \mathbf{\gamma=0} \quad \mathbf{\eta= 835,888374 \text{ h}}$$

$$MTBF = 0,9803 * 835,888374 + 0 = 819,421373 \text{ h} \quad \longrightarrow \quad \boxed{MTBF = 819,421373 \text{ h}}$$

**Calcule de l'écart type :**

$$\sigma = B \cdot \eta = 0,934 * 835,888374 = \mathbf{780,7197 \text{ h}}$$

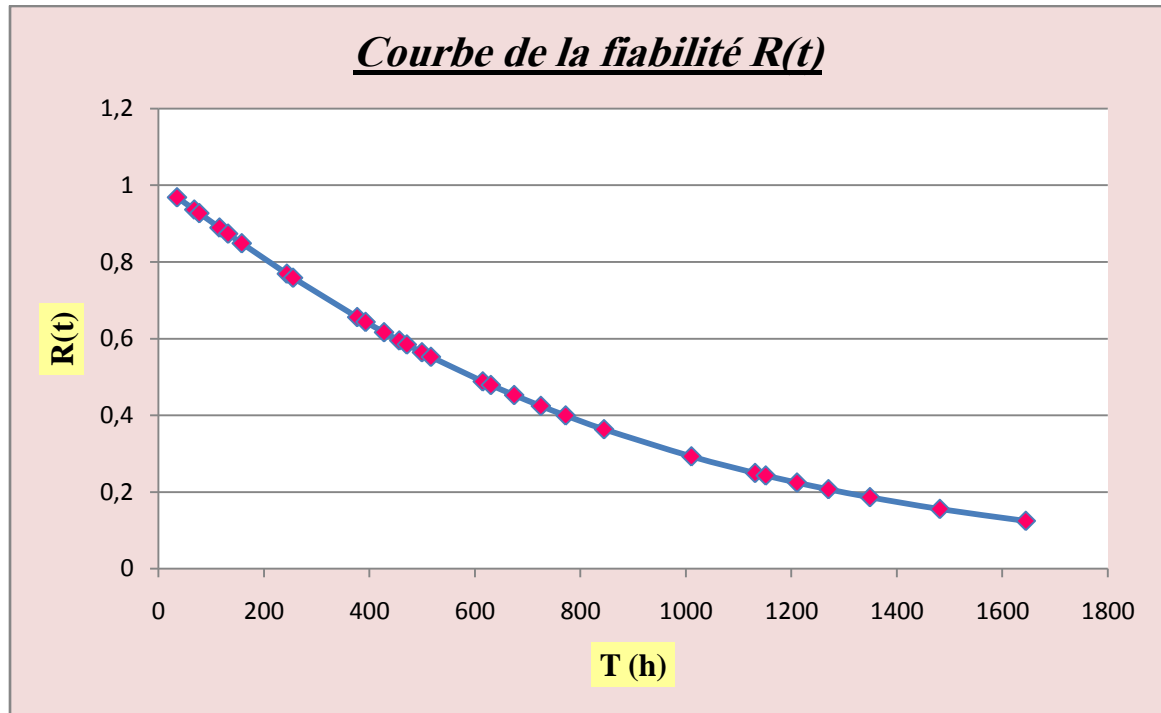
Où A et B sont des paramètres issus de tables.

**III.2.1.2. Le calcul de la fiabilité R(t) :**

$$R(MTBF) = e^{-(MTBF - \gamma / \eta)^\beta} = e^{-(819,421373 - 0 / 835,888374)^{1.0836}} = \mathbf{0,3821}$$

$$\text{Donc : } \mathbf{R(MTBF) = 38.21 \%}$$





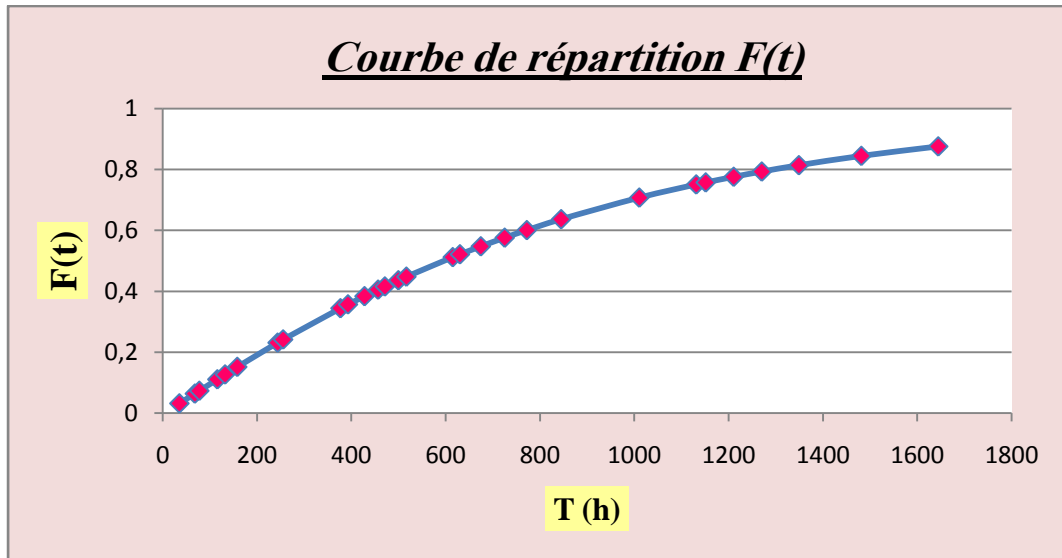
**Figure III.5 :** La courbe de fiabilité  $R(t)$  de la Pompe PP 2467 A

Dans la figure (Fig. III.5), nous représentons les résultats de calcul de la fiabilité  $R(t)$  obtenus à partir de l'historique, la fonction de fiabilité est décroissante avec le temps, donc la probabilité de bon fonctionnement de la Pompe PP 2467 A décroît avec le temps. En plus, la valeur de la fiabilité pour  $t = \text{MTBF}$  est égale à **38,21%** ce qui implique que la pompe a **38,21%** de chances de vivre jusqu'à la **MTBF**, donc elle n'est pas fiable.

### III.2.1.3. La fonction de répartition réel $F(t)$ :

$$F(\text{MTBF}) = 1 - R(\text{MTBF}) = 1 - 0,3821 = 0,6179$$

$$F(\text{MTBF}) = \mathbf{61,76\%}$$

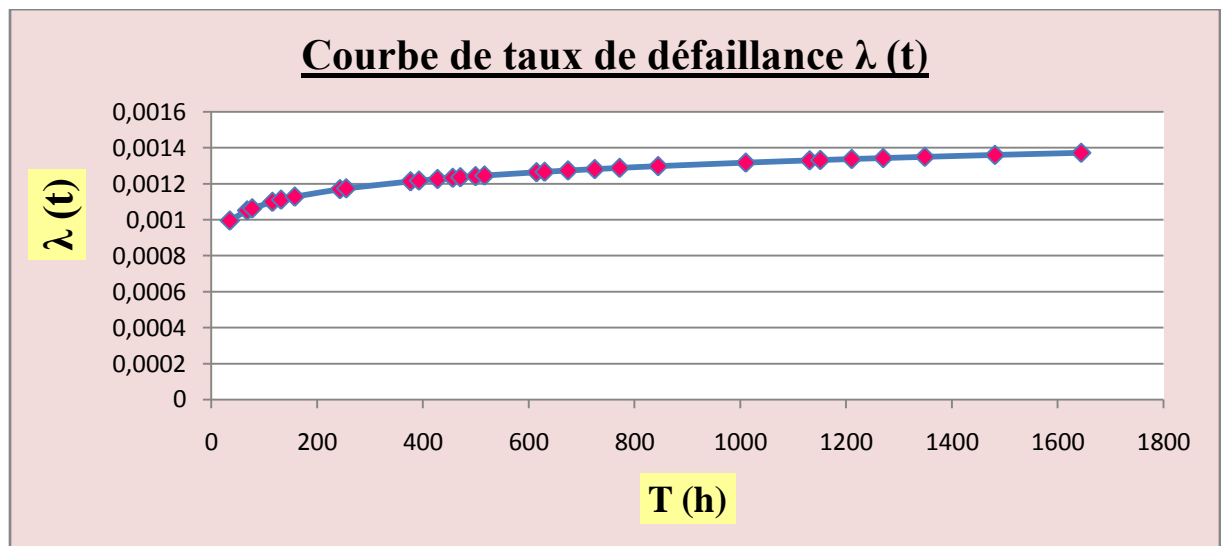


**Figure III.6 :** La fonction de répartition réel  $F(t)$  de la Pompe PP 2467 A

Dans la figure(**Fig.III.6**), nous représentons la fonction de répartition réel  $F(t)$  de la Pompe PP 2467 A, on remarque clairement que la courbe est en augmentation avec le temps de bon fonctionnement, qui signifie que la probabilité que la pompe tombe en panne va augmenter au cours de temps.

### III.2.1.4. Le taux de défaillance $\lambda(t)$ :

Le taux de défaillance est représenté par la figure suivante (III.7) :

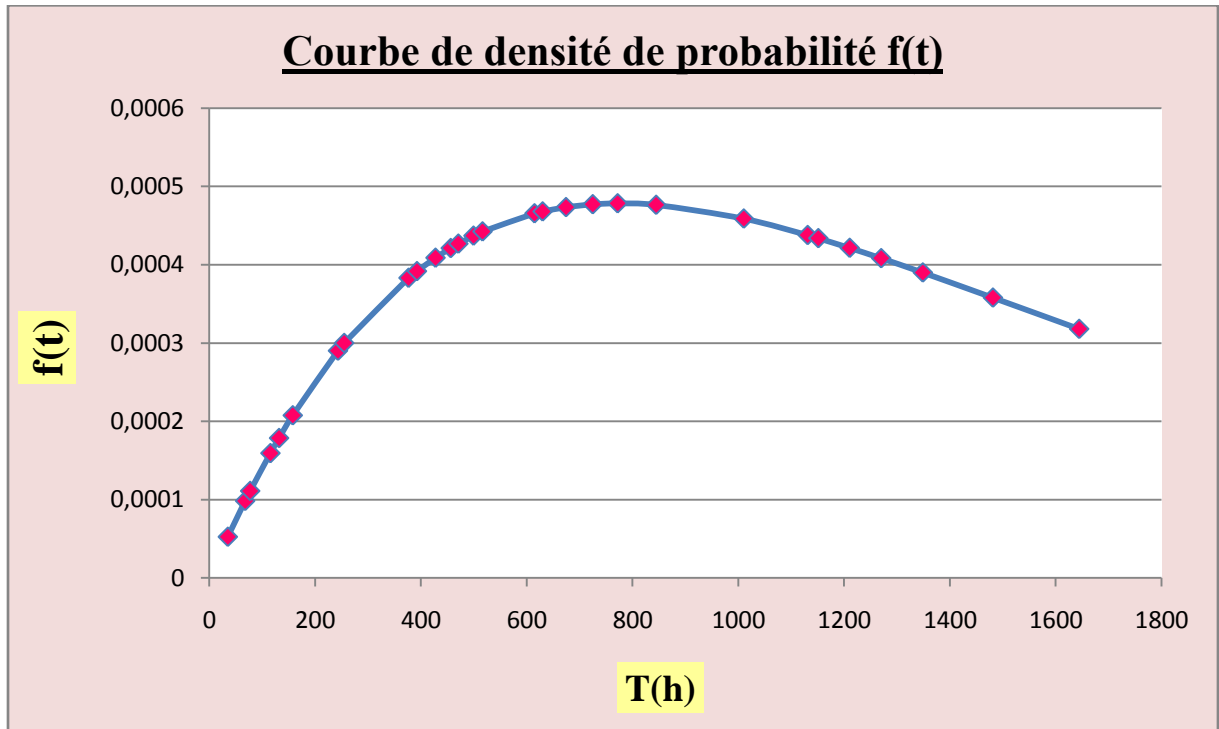


**Figure III.7 :** Le taux de défaillance de la Pompe PP 2467 A

Dans la figure (Fig.III.7), nous représentons les résultats de calcul du taux de défaillance  $\lambda(t)$  en fonction du temps de bon fonctionnement. Il est presque stable avec le temps. Ce qui implique que la pompe est en période de maturité.

### III.2.1.5. La densité de probabilité $f(t)$ :

La densité de probabilité est donnée par la figure III.8 :



**Figure III.8 :** La densité de probabilité  $f(t)$  de la Pompe PP 2467 A

Dans la figure (Fig.III.8), nous remarquons que cette fonction est croissante puis elle décroît avec le temps.

### III.2.1.6. Calcul de la maintenabilité $M(t)$ :

La maintenabilité  $M(t)$  est calculée par :

$$MTTR = \frac{\sum TTR}{N} = \frac{243}{29} = 8,1 \text{ h}$$

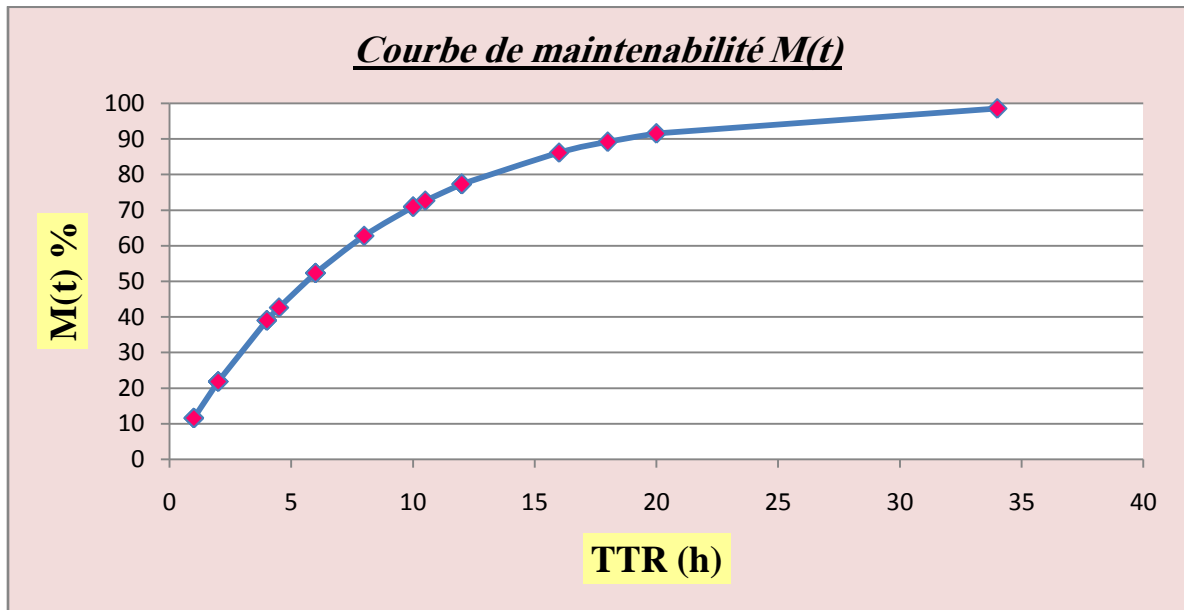
Le taux de réparation  $\mu$  :

$$\mu = \frac{1}{MTTR} = \frac{1}{8,1} = 0,12 \text{ Réparation /h}$$



$$M(MTTR) = 62,17 \%$$

$$M(MTTR) = 1 - e^{-(0,12 \cdot 8,1)} = 0,6217$$



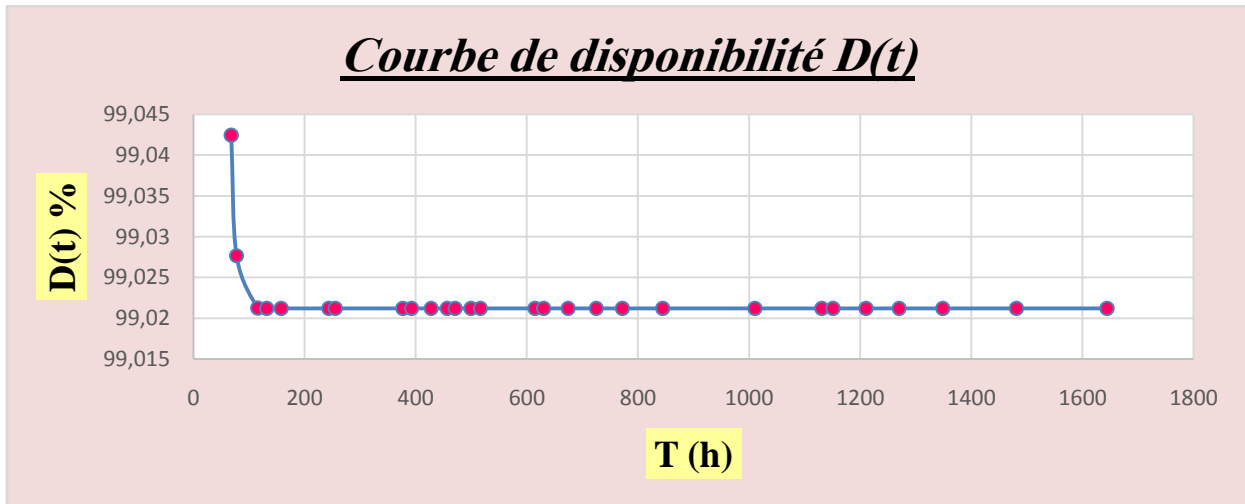
**Figure III.9 :** Courbe de maintenabilité M(t) de la pompe PP 2467 A

Cette courbe est croissante, puisque à chaque fois que les TTR augmentent et plus la maintenabilité augmente, mais le but recherché est d'avoir un taux élevé de maintenabilité pour un TTR minimum.

### III.2.1.7. Calcul de la disponibilité D(t) :

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{819,4213} = 0,0012 \text{ défaillance /h}$$

$$D(MTBF) = \frac{0,12}{0,0012 + 0,12} + \frac{0,12}{0,0012 + 0,12} e^{(0,0012+0,12)819,4213} = 0,99$$



**Figure III.10 :** La courbe de disponibilité D(t) de la pompe PP 2467 A

On voit bien que la disponibilité décroît en fonction du temps de bon fonctionnement. Cela indique que plus quela pompe PP 2467Afonctionne et plus sa disponibilité décroît (Fatigue, usure, etc...)

### III.2.2. Deuxième cas la Turbine T1-1 :

#### III.2.2.1. La fonction de répartition théorique Fe(t) :

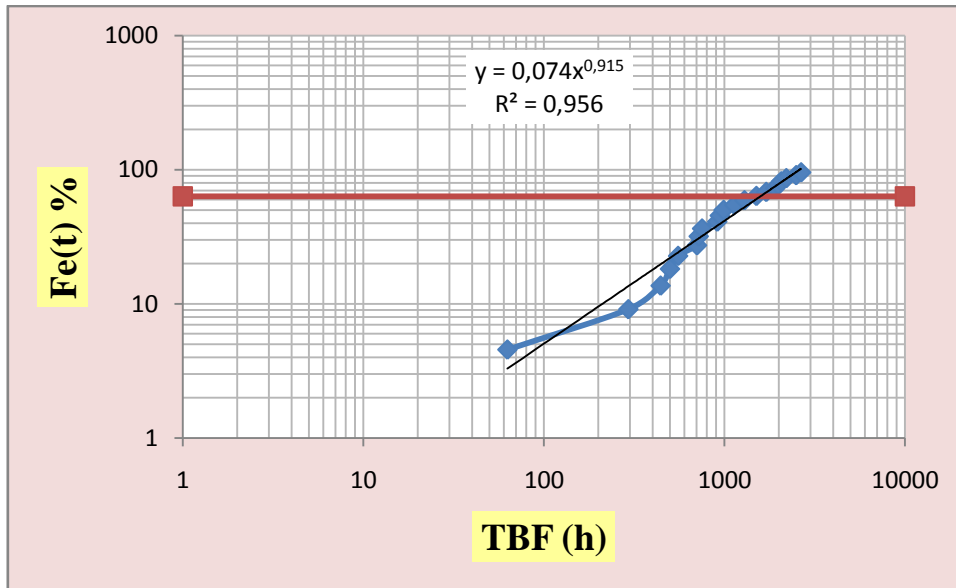
On commence par ordonner les TBF par ordre croissant et calculer leur fonction de répartition correspondante à partir de l'historique des pannes dela Turbine T1-1 durant les trois dernières années 2015 ÷ 2017 (annexe 3).

On trace sur le papier d'Allen Plait ou le papier de WEIBULL la fonction de répartition théorique Fe(TBF) tell que :

Pour (N= 21), on a :  $Fe(t_i) = \sum n_i / N + 1$  III. 12

**N :** nombre total des pannes

**ni :** fréquence des pannes



**Figure III.11** : La fonction de répartition théorique  $Fe(t)$  % sur le papier de WEIBULL

La figure III.11 représente la fonction de répartition théorique  $Fe(t)$  % sur le papier de WEIBULL, le graphe montre l'allure obtenue qui est sous forme d'une droite avec un  $\gamma$  est égal zéro.

D'après cette allure on peut détermine les paramètres de loi de WEIBULL tell que :

➤  $\gamma = 0h$  (parce qu'on a une droite)

➤  $\eta = e^{\frac{\ln(63.21) - \ln(0.0744)}{0.9154}} \quad \eta = 1504,62553 \text{ h}$

➤  $\beta$  c'est la tangente de l'allure qui est sous forme d'une droite et en fonction de

(X beta et Y beta) tell que :

$$X \text{ beta} = \ln((t-\gamma)/\eta) \quad ; \quad Y \text{ beta} = \ln(-\ln(1-Fe(t)))$$

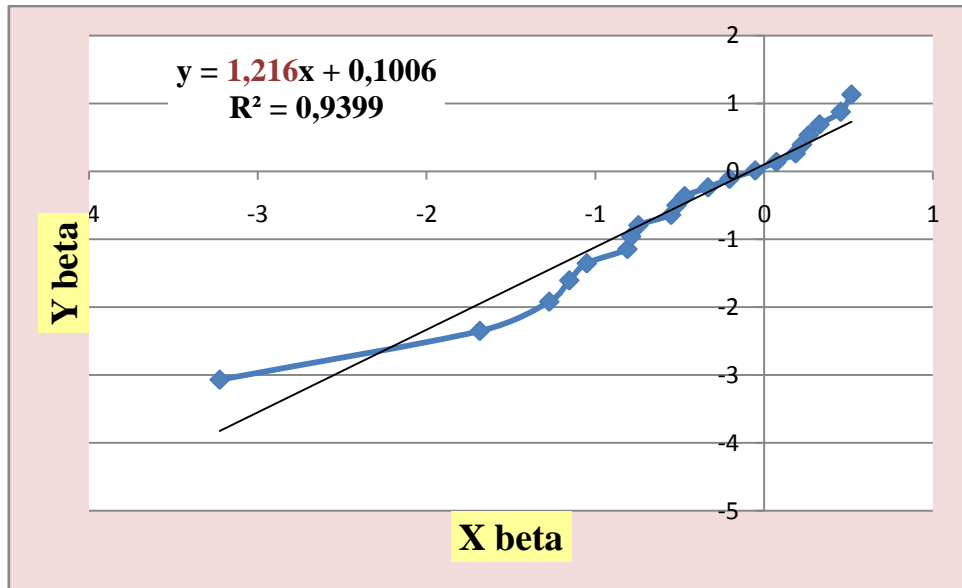


Figure III.12 : L'allure qui détermine la valeur de  $\beta$  sur le papier WEIBULL

➤ Donc :  $\beta = 1,216$

Validation de la loi de WEIBULL « Le test de KOLMOGROF SIMIRNOV » (voir annexe7) :

D'après le calcul de la différence entre les fonctions de répartition théorique et réelle (voir annexe3), on trouve :

$$D_{n, \text{MAX}} = D_{21, \text{MAX}} = 0,10747$$

Et selon le tableau de K-S avec  $n=30$  et le risque de se trempé  $\alpha=5\%$

$$\text{On à } D_{n, \alpha} = D_{21, 0.05} = 0.294$$

$$\text{Donc : } D_{n, \text{MAX}} < D_{n, \alpha} \quad \text{ou} \quad 0,10747 < 0,294$$

Alors : on accepte le modèle de WEIBULL avec un risque  $\alpha=5\%$

**Le calcul de MTBF :**

La MTBF est souvent traduite comme étant la moyenne des temps de bon fonctionnement entre deux défaillances successives du même composant. Il est donné par la formule suivante :  $MTBF = A \cdot \eta + \gamma$

La valeur de « A » et « B » est donnée par le tableau de WEIBULL (voir annexe8).

$$\beta=1.216A=0,9407 \quad B= 0,787 \quad \gamma=0 \quad \eta= 1584,62553 \text{ h}$$

$$MTBF=0,9407 * 1584,62553 +0= 1490,6572\text{h}$$



$$MTBF= 1490,6572 \text{ h}$$

Calcul de l'écart type :

$$\sigma=B. \eta=0,787 * 1584,62553 =1247,1002 \text{ h}$$

Où A et B sont des paramètres issus de tables.

#### III.2.2.2. Le calcul de la fiabilité R(t) :

$$R(MTBF) = e^{-(MTBF-\gamma/\eta)^\beta} = e^{-(1490,6572-0/1584,62553)^{1.216}} = 0,39520116$$

Donc : R(MTBF) = 39,52 %

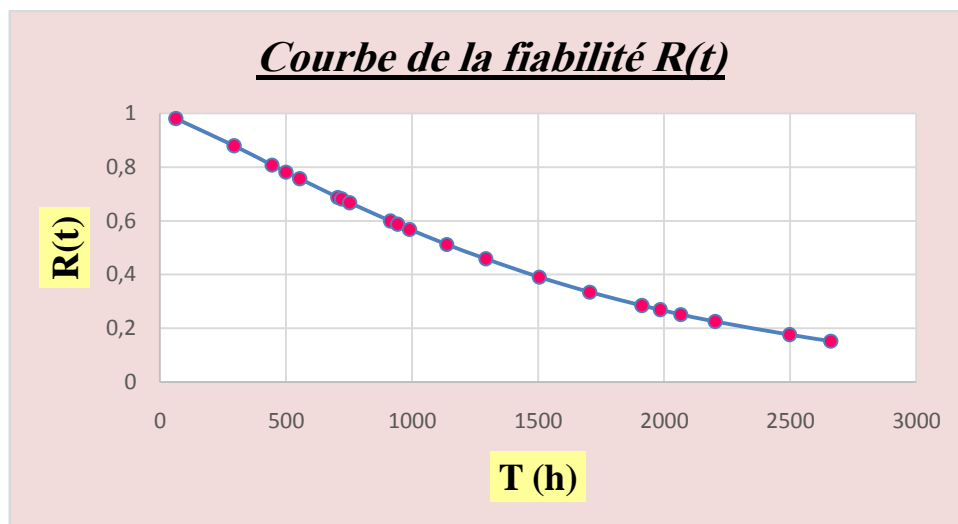
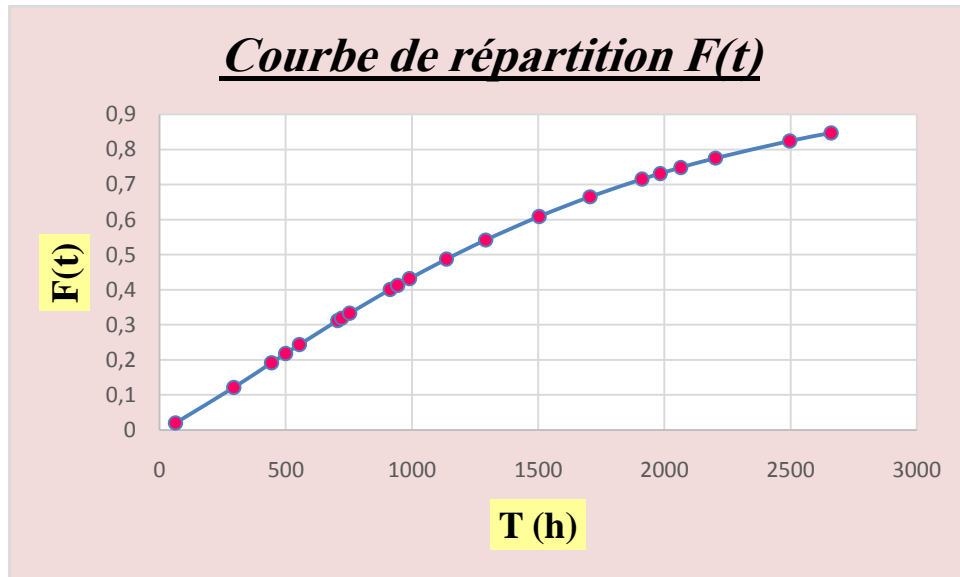


Figure III.13 : La courbe de fiabilité R(t) de la Turbine T1-1

Dans la figure(Fig.III.13), nous représentons les résultats de calcul de la fiabilité R(t) obtenus à partir de l'historique, la fonction de fiabilité est décroissante avec le temps, donc la probabilité de bon fonctionnement de la Turbine T1-1 décroît avec le temps. En plus, la valeur de la fiabilité pour  $t = MTBF$  est égale à 39,52% ce qui implique que la pompe à 39,52% de chances de vivre jusqu'à la MTBF, donc elle n'est pas fiable.

#### III.2.2.3. La fonction de répartition F(t) :

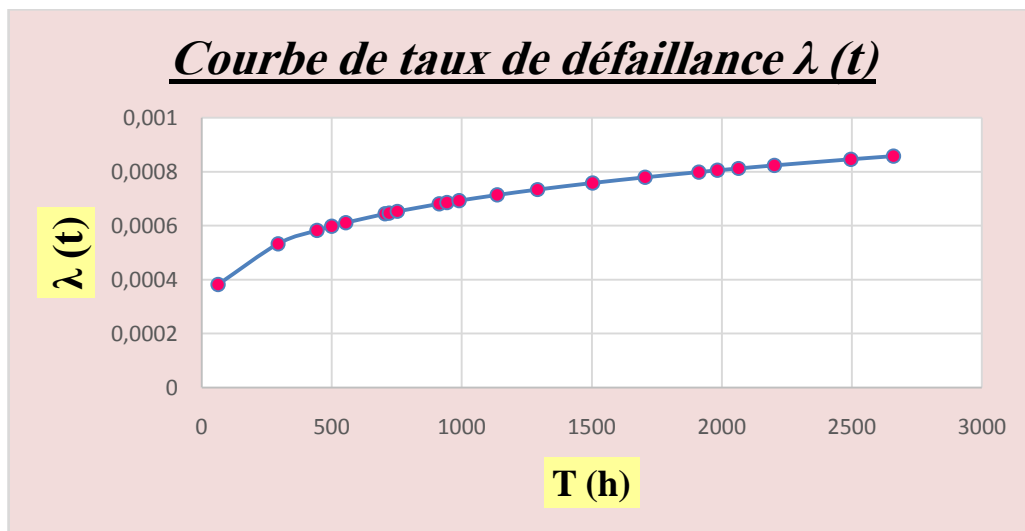




**Figure III.14 :** La courbe de répartition réelle  $F(t)$  de la Turbine T1-1

Dans la figure (Fig.III.14), nous représentons la fonction de répartition réelle  $F(t)$  de la Turbine T1-1, on remarque clairement que la courbe est en augmentation avec le temps de bon fonctionnement, qui signifie que la probabilité que la Turbine tombe en panne va augmenter au cours de temps.

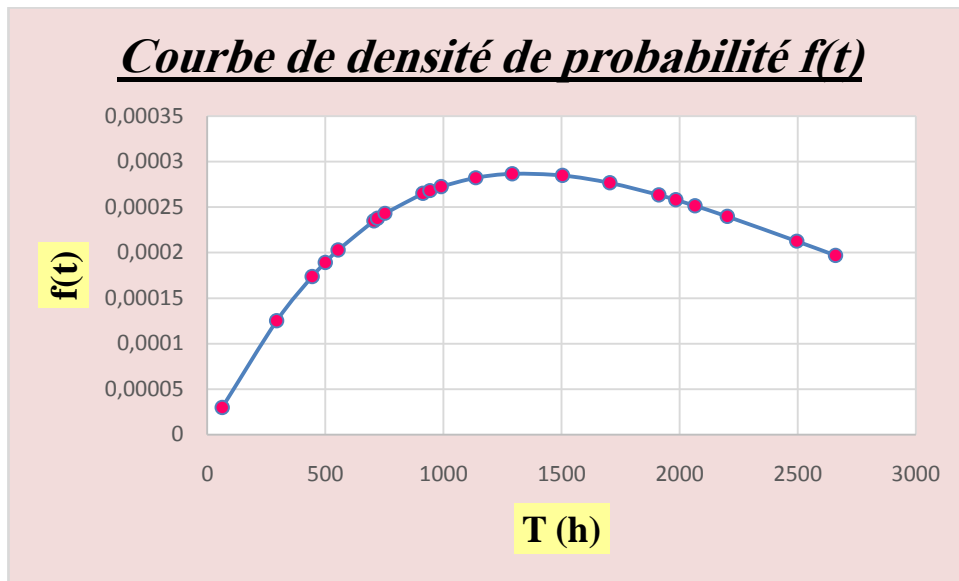
#### III.2.2.4. Le taux de défaillance $\lambda(t)$ :



**Figure III.15 :** La courbe de taux de défaillance  $\lambda(t)$  de la Turbine T1-1

Dans la figure (Fig.III.15), nous représentons les résultats de calcul du taux de défaillance  $\lambda(t)$  en fonction du temps de bon fonctionnement. Il est croissant avec le temps. La Turbine T1-1 est donc en début de la période de **Obsolescence** (vieillesse); cela se justifie par  $\beta > 1$ .

### III.2.2.5. La densité de probabilité $f(t)$ :



**Figure III.16 :** La courbe de densité de probabilité  $f(t)$  de la Turbine T1-1

Dans la figure (**Fig.III.16**), nous remarquons que cette fonction est croissante puis elle décroît avec le temps.

### III.2.2.6. Calcul de la maintenabilité $M(t)$ :

$$MTTR = \frac{\sum TTR}{N} = \frac{137,5}{21} = 6,5476 \text{ h}$$

Le taux de réparation  $\mu$  :

$$\mu = \frac{1}{MTTR} = \frac{1}{6,5476} = 0,1527 \text{ répr/h}$$

$$M(MTTR) = 1 - e^{-(0,1527 * 6,5476)} = 0,6321 \longrightarrow \boxed{M(MTTR) = 63,21 \%}$$

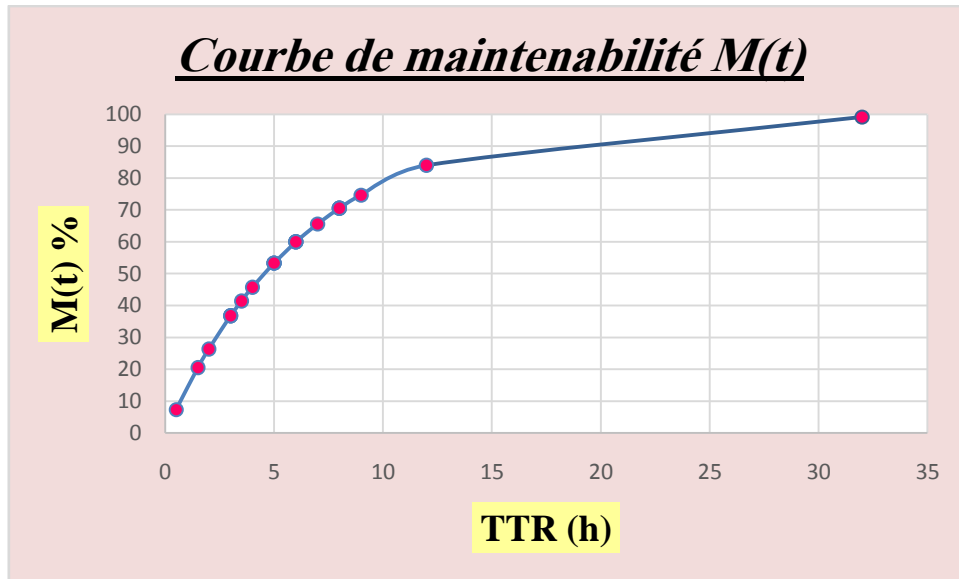


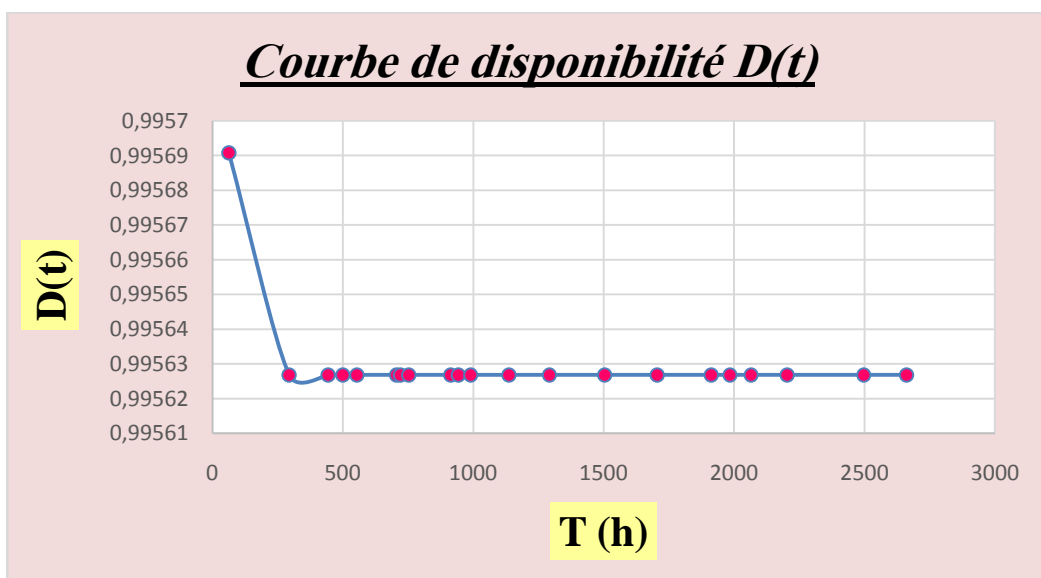
Figure III.17 : La courbe de maintenabilité M(t) de la Turbine T1-1

La figure III.7 représente la courbe de maintenabilité M(t) de la Turbine T1-1, on remarque que la courbe est croissante, puisque à chaque fois que les TTR augmentent et plus la maintenabilité augmente, mais le but recherché est d'avoir un taux élevé de maintenabilité pour un TTR minimum.

### III.2.2.7. Calcul de la disponibilité D(t) :

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{1490,65724} = 0,00067 \text{ défaillance /h}$$

$$D(MTBF) = \frac{0,1527}{0,00067 + 0,1527} + \frac{0,1527}{0,00067 + 0,1527} e^{(0,00067 + 0,1527)^{1490,6572}} = 0,99$$



**Figure III.18** : La courbe de disponibilité D(t) de la Turbine T1-1

La figure III.8 représente la courbe de disponibilité D(t) de la Turbine T1-1, on voit bien que la disponibilité décroît en fonction du temps de bon fonctionnement. Cela indique que plus que la Turbine T1-1 fonctionne et plus sa disponibilité décroît (Fatigue, usure, etc...)

### III.2.3. Troisième cas « Compresseur PC5 » :

#### III.2.3.1. La fonction de répartition théorique Fe(t) :

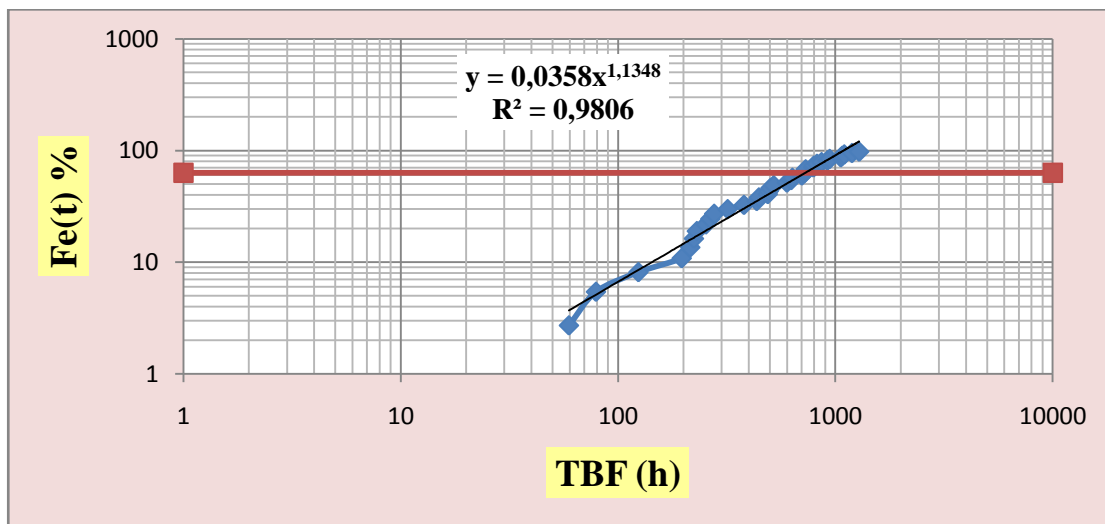
On commence par ordonner les TBF par ordre croissant et calculer leur fonction de répartition correspondante à partir de l'historique des pannes du Compresseur PC5 durant les trois dernières années 2015 ÷ 2017 (voir annexe 5).

On trace sur le papier d'Allen Plait ou le papier de WEIBULL la fonction de répartition théorique Fe(TBF) telle que :

Pour (N= 36), on a :  $Fe(t_i) = \sum n_i / N + 1$  III.12

**N** : nombre total des pannes

**ni** : fréquence des pannes



**Figure III.19** : La fonction de répartition théorique Fe(t) % sur le papier de WEIBULL

La figure III.9 représente la fonction de répartition théorique Fe(t) % sur le papier de WEIBULL, le graphe montre l'allure obtenue qui est sous forme d'une droite avec un  $\gamma$  est égal zéro.

## Chapitre III : Théorie et application sur la FMD

D'après cette allure on peut déterminer les paramètres de loi de WEIBULL tel que :

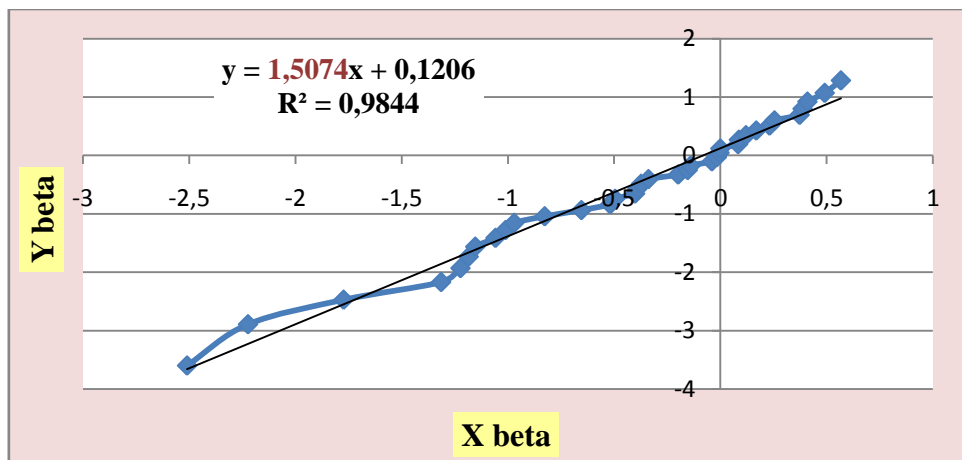
➤  $\gamma = 0h$  (parce qu'on a une droite)

➤  $\eta = e^{\frac{\ln(63.21) - \ln(0.0358)}{1,1348}} \quad \eta = 730,5369 h$

➤  $\beta$  c'est la tangente de l'allure qui est sous forme d'une droite et en fonction de

(X beta et Y beta) tel que :

$$X \text{ beta} = \ln((t-\gamma)/\eta) \quad ; \quad Y \text{ beta} = \ln(-\ln(1-F_e(t)))$$



**Figure III.20 :** L'allure qui détermine la valeur de  $\beta$  sur le papier WEIBULL

➤ **Donc :  $\beta = 1.5074$**

Validation de la loi de WEIBULL « **Le test de KOLMOGOROV SIMIRNOV** » :

D'après le calcul de la différence entre les fonctions de répartition théorique et réelle voir(annexe5), on trouve :

$$D_{n, \text{MAX}} = D_{34, \text{MAX}} = 0,07554$$

Et selon le tableau de K-S avec  $n=36 > 35$  et le risque de se trompé  $\alpha=5\%$ (voir annexe 7)

$$\text{On a } D_{n, \alpha} = D_{36, 0.05} = \frac{1,36}{\sqrt{N}} = \frac{1,36}{\sqrt{36}} = 0.226$$

$$\text{Donc : } D_{n, \text{MAX}} < D_{n, \alpha} \quad \text{ou} \quad 0,07554 < 0,226$$

**Alors :** on accepte le modèle de WEIBULL avec un risque  $\alpha=5\%$

**Le calcul de MTBF :**

## Chapitre III : Théorie et application sur la FMD

La MTBF est souvent traduite comme étant la moyenne des temps de bon fonctionnement entre deux défaillances successives du même composant. Il est donné par la formule suivante :  $MTBF=A \cdot \eta + \gamma$

La valeur de « A » et « B » est donnée par le tableau de WEIBULL (voir annexe 8).

$$\beta=1.5074 A=0,9027 B=0,613 \gamma=0 \quad \eta=730,5369 \text{ h}$$

$$MTBF=0,9027 * 730,5369+0=659,455673 \text{ h} \quad \longrightarrow \quad \boxed{MTBF=659,455673 \text{ h}}$$

Calcul de l'écart type :

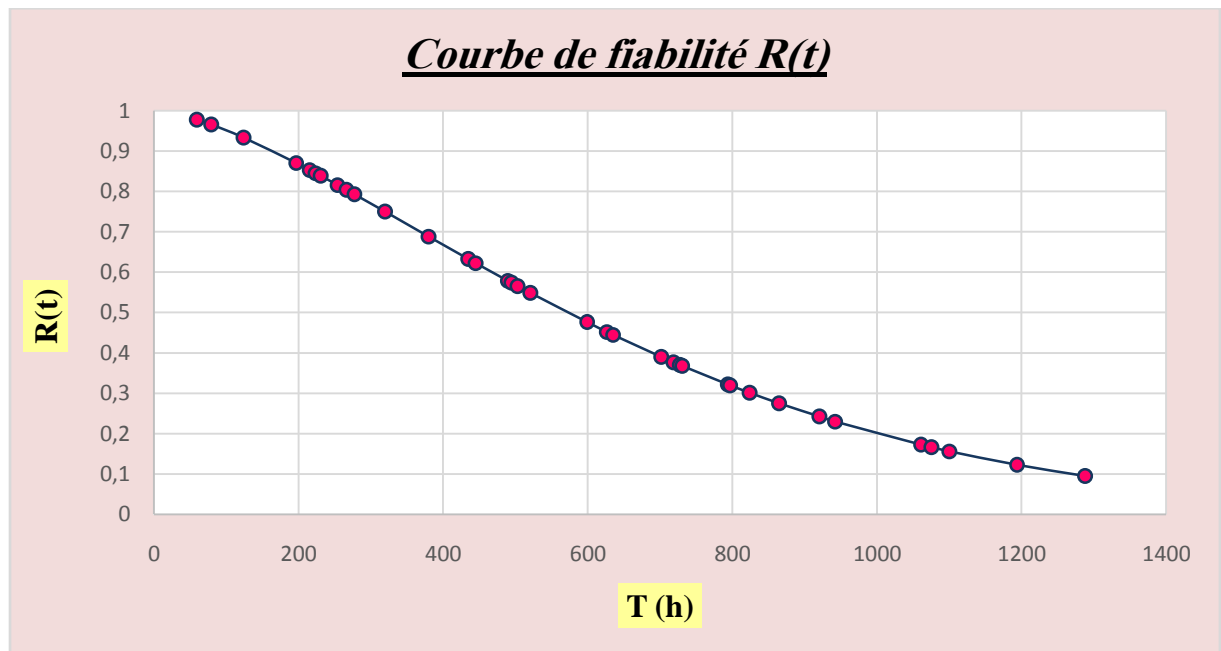
$$\sigma=B \cdot \eta=0,613 * 730,5369=447,8191 \text{ h}$$

Où A et B sont des paramètres issus de tables.

### III.2.3.2. Le calcul de la fiabilité R(t) :

$$R(MTBF) = e^{-(MTBF-\gamma/\eta)^\beta} = e^{-(659,455673-0/730,5369)^{1,5074}} = 0,42442$$

Donc :  $R(MTBF) = 42,44 \%$



**Figure III.21** : La courbe de fiabilité R(t) de compresseur PC5

Dans la figure(Fig.III.21), nous représentons les résultats de calcul de la fiabilité R(t) obtenus à partir de l'historique, la fonction de fiabilité est décroissante avec le temps, donc la probabilité de bon fonctionnement de la Turbine T1-1 décroît avec le temps. En

plus, la valeur de la fiabilité pour  $t = \text{MTBF}$  est égale à **42,44%** ce qui implique que la pompe à **42,44%** de chances de vivre jusqu'à la **MTBF**, donc elle n'est pas fiable.

### III.2.3.3. La fonction de répartition $F(t)$ :

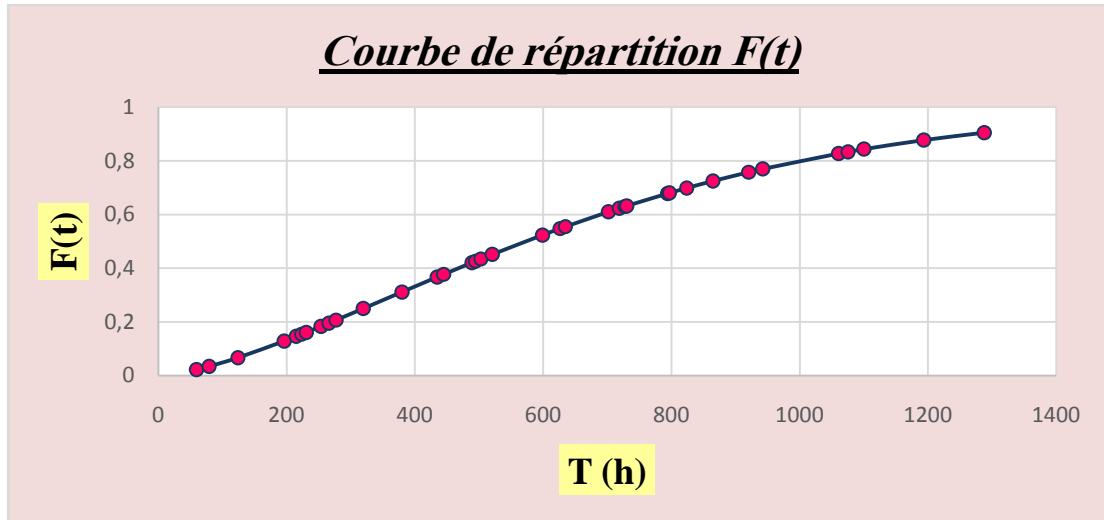


Figure III.22 : La courbe de répartition  $F(t)$  de compresseur PC5

Dans la figure (Fig. III.22), nous représentons la fonction de répartition réelle  $F(t)$  du compresseur PC5, on remarque clairement que la courbe est en augmentation avec le temps de bon fonctionnement, qui signifie que la probabilité que le compresseur tombe en panne va augmenter au cours de temps.

### III.2.3.4. Le taux de défaillance $\lambda(t)$ :

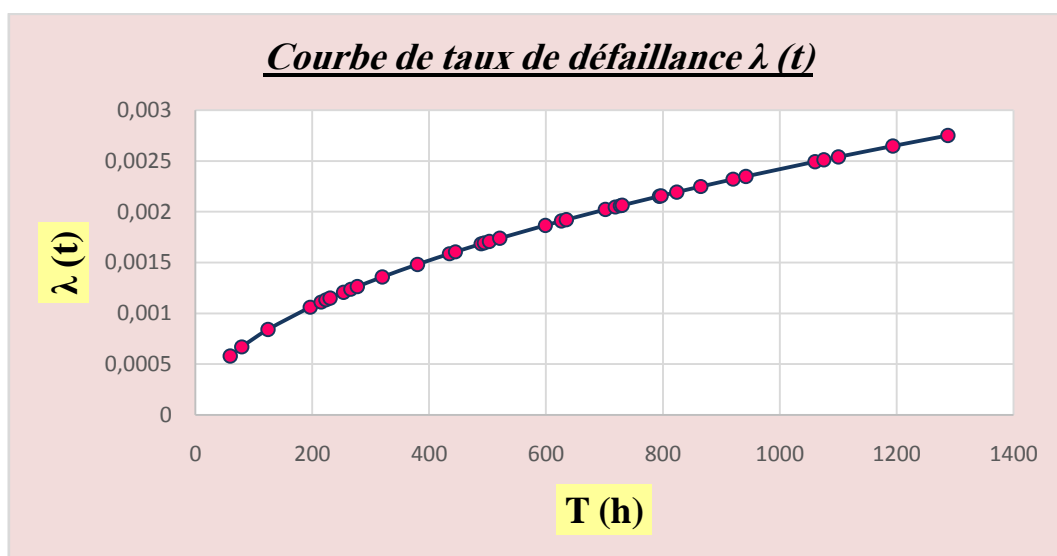
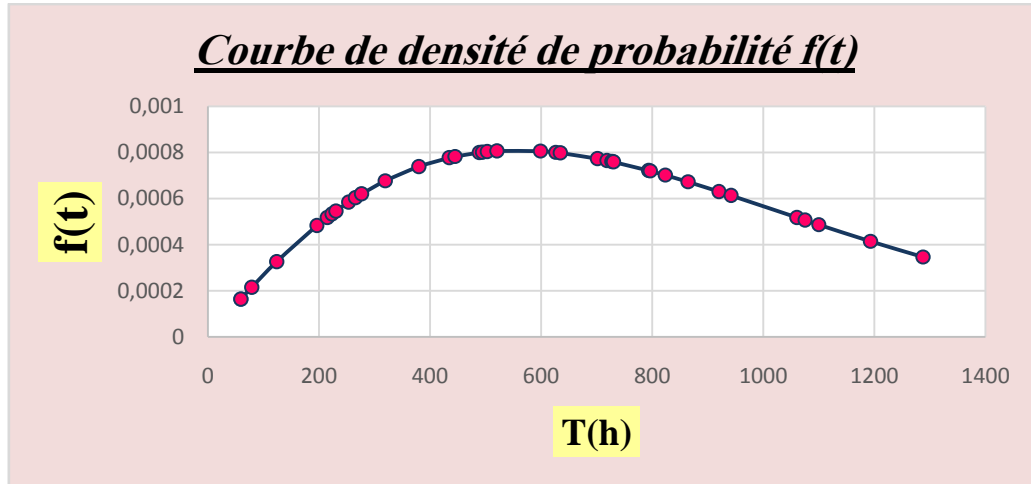


Figure III.22 : La courbe de taux de défaillance  $\lambda(t)$  de compresseur PC5

Dans la figure (**Fig.III.22**), nous représentons les résultats de calcul du taux de défaillance  $\lambda(t)$  en fonction du temps de bon fonctionnement. Il est croissant avec le temps. Le compresseur PC5 est donc en début de la période de **Obsolescence** (vieillesse); cela se justifie par  $\beta > 1$ .

### III.2.3.5. La densité de probabilité $f(t)$ :



**Figure III.23 :** La courbe de densité de probabilité  $f(t)$  de compresseur PC5

Dans la figure (**Fig.III.23**), nous remarquons que cette fonction est croissante puis elle décroît avec le temps.

### III.2.3.6. La maintenabilité $M(t)$ :

$$MTTR = \frac{\sum TTR}{N} = \frac{408}{36} = 11.3333 \text{ h}$$

Le taux de réparation  $\mu$  :

$$\mu = \frac{1}{MTTR} = \frac{1}{11,3333} = 0.08824 \text{ réparation /h}$$

$$M(MTTR) = 1 - e^{-(0,08824 * 11,3333)} = 0,63214 \longrightarrow \boxed{M(MTTR) = 63,214\%}$$



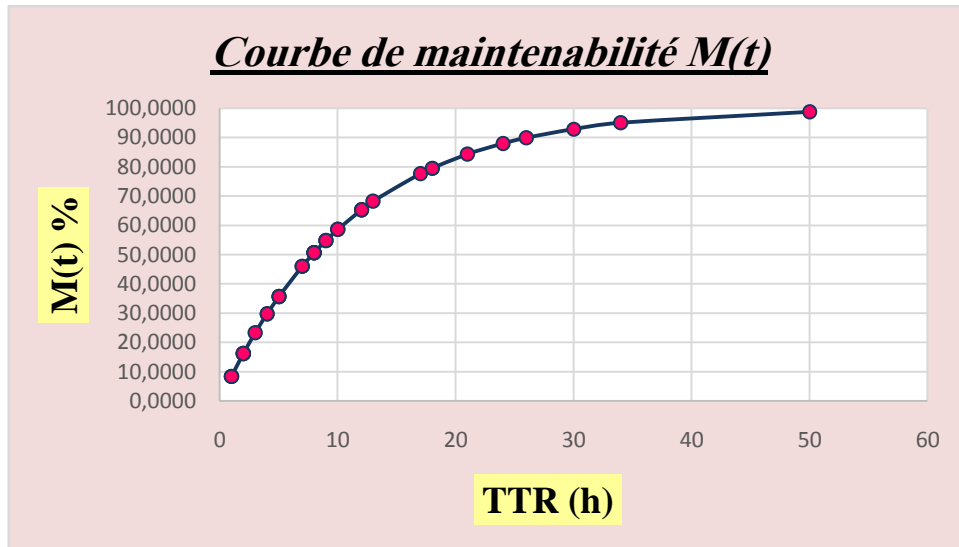


Figure III.24 :La courbe de la maintenabilité  $M(t)$ de compresseur PC5

La figure III.24 représente la courbe de la maintenabilité  $M(t)$ de compresseur PC5, on voit que cette courbe est croissante, puisque à chaque fois que les TTR augmentent et plus la maintenabilité augmente, mais le but recherché est d'avoir un taux élevé de maintenabilité pour un TTR minimum.

### III.2.3.7. La disponibilité $D(t)$ :

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{659,4557} = 0,00152 \text{ déf /h}$$

$$D(MTBF) = \frac{0,08824}{0,00152 + 0,08824} + \frac{0,08824}{0,00152 + 0,08824} e^{-(0,00152 + 0,08824) \cdot 659,4557} = 0,9830$$

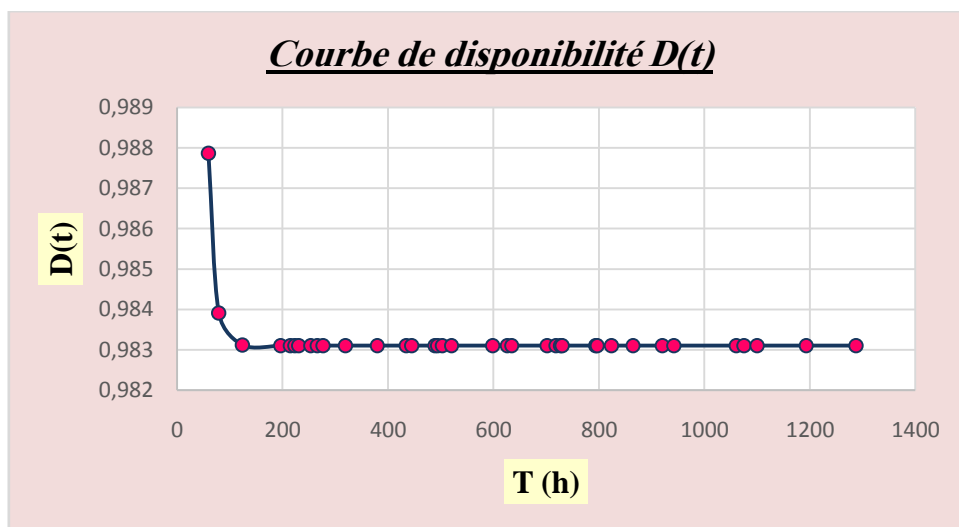


Figure III.25:La courbe de disponibilité  $D(t)$ de compresseur PC5

## Chapitre III : Théorie et application sur la FMD

---

La figure III.5 représente La courbe de disponibilité  $D(t)$  de compresseur PC5, on voit bien que la disponibilité décroît en fonction du temps de bon fonctionnement. Cela indique que plus que le compresseur PC5 fonctionne et plus sa disponibilité décroît (Fatigue, usure, etc...)

### III.2.4. Comparaison de trois équipements :

Equipements	La fiabilité R(MTBF) %	La maintenabilité M(MTTR)%	La disponibilité D(MTBF)%
La pompe PP 2467 A	38,21	62,17	99
La turbine T1-1	39,52	63,21	99
Le compresseur PC5	42,44	63,21	98,30

Tableau III.2 : Tableau de comparaison entre les trois équipements choisis

D'après la comparaison entre les équipements qui ont été choisis (la pompe PP2467A, la turbine T1-1 et le compresseur PC5) on distingue que les équipements ne sont pas fiables mais disponibles et maintenables.

### III.3. Conclusion :

On conclure que les équipements choisis ne sont pas fiables à cause de plusieurs facteurs parmi ces facteurs la mauvaise politique de maintenance appliquée et le temps systématique d'intervention est très long.

Donc pour améliorer la fiabilité des équipements il faut assurer la bonne marche de chaque équipement, diminuer le nombre de pannes et la durée des interventions, programmer les arrêts des interventions en appliquant un logiciel qui gère la situation pour une courte durée.

### **IV.1. Introduction :**

L'objectif principal de toute entreprise consiste à maximiser les profits et minimiser les pertes. Ainsi, les stratégies de maintenance adoptées s'orientent vers la réduction des coûts des actions de maintenance et/ou l'amélioration de la disponibilité du système de production à maintenir. Les équipements de production et de services à une grande importance dans la majorité des industries. Ces équipements sont généralement sujets à des dégradations avec l'utilisation et le temps. Pour certains de ces systèmes, tels que les installations pétrolières et chimiques, les systèmes nucléaires il est extrêmement important de tout mettre en œuvre pour éviter la défaillance en fonctionnement car elle peut être dangereuse. Par ailleurs, pour les unités à fonctionnement continu tel que les raffineries de pétrole, le manque à gagner est élevé en cas d'arrêt. Par conséquent, la maintenance devient une nécessité pour améliorer la fiabilité. L'importance croissante de la maintenance a généré un intérêt sans cesse croissant dans le développement et la mise en œuvre de stratégies de maintenance pour l'amélioration de la fiabilité des systèmes, la prévention de défaillances et la réduction des coûts de maintenance.

### **IV.2. Politiques de maintenance pour systèmes élémentaires : [7]**

Nous entendons par système élémentaire toute pièce faisant partie d'une machine (roulement, joint, arbre, pignon, palier...) ou une machine faisant partie d'un ensemble, tels qu'un tour dans une chaîne de fabrication mécanique, un moteur d'avion, une pompe dans un réseau de distribution d'eau potable, une turbine dans une centrale thermique, ... Dans ce cas les caractéristiques de fiabilité et toute autre variable du modèle concernent le système en entier, lui-même peut être décomposé en entités élémentaires.

#### **IV.2.1. Politique de maintenance préventive périodique :**

Dans cette politique un élément est préventivement maintenu à des intervalles de temps fixes  $kT$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ) indépendants de l'historique des pannes, et réparé à la défaillance. Une autre politique de maintenance préventive périodique de base est « le remplacement périodique avec réparation minimale à la défaillance » où un élément est remplacé à des temps prédéterminés  $kT$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) et les défaillances sont éliminées par des réparations minimales. Dans cette classe, on peut également citer la politique de remplacement en block où un élément est remplacé à des temps pré arrangés  $kT$  et à la défaillance (généralement utilisée pour les systèmes multi-composants). Pour cette dernière politique, le processus aléatoire caractérisé est un processus de renouvellement, le coût moyen par unité de temps est donné par :

## CHAPITRE IV : MINIMISATION DU COUT DE LA MAINTENANCE PREVENTIVE PAR L'ALGORITHME GENETIQUE

---

$$C(T) = \frac{C_c \cdot H(T) + C_p}{T} \quad \text{IV. 1}$$

Où  $H(T)$  représente le nombre moyen de remplacements de 0 à  $T$ .

$C_p$  est le coût de la pièce,  $C_c$  le coût entraîné par la défaillance.

La difficulté avec l'expression précédente réside dans la détermination de la fonction de renouvellement  $H(T)$ , souvent les bornes suivantes sont utilisées :

$$\frac{C_p + C_c [F(T) + F^2(T)]}{T} < C(T) < \frac{C_p + C_c [(F(T) + F^2(T) + [F(T)]^3) / (1 - F(T))]}{T} \quad \text{IV. 2}$$

Avec les concepts de réparation minimale et surtout la maintenance imparfaite, différentes extensions et variantes de ces deux politiques ont été proposées.

*Liu & al* a donné une extension à la politique de remplacement périodique avec réparation minimale à la défaillance par : un élément reçoit une MP imparfaite à chaque  $T$  unité de temps, les défaillances sont corrigées par des réparations minimales, et il est remplacé après que son âge atteigne  $(O + 1) T$  unités de temps, où  $O$  est le nombre de MP imparfaites déjà effectuées. Si  $O = 0$ , cette politique devient « remplacement périodique avec réparation minimale à la défaillance ».

*Berg et Epstein* ont modifié la politique de remplacement en block en introduisant un âge limite, où un élément défaillant est remplacé par un neuf, tandis que les éléments dont l'âge est inférieur ou égal à  $t_0$  ( $0 \leq t_0 \leq T$ ) aux temps de remplacements programmés  $kT$  ne sont pas remplacés mais continuent à fonctionner jusqu'à la défaillance ou au prochain temps de remplacement programmé.

*Tango* introduit un temps limite  $r$  et suggère ce qui suit : si l'âge de l'élément défaillant est inférieur ou égal à un temps limite prédéterminé  $r$ , il est remplacé par un neuf, sinon il est remplacé par un élément déjà utilisé. Si  $r = T$ , cette politique devient une politique de remplacement en block.

*Nakagawa* introduit un temps de référence  $T_0$  et un temps périodique  $T^*$  : Si la défaillance survient avant  $T_0$ , une réparation minimale est effectuée. Si l'élément est en fonctionnement à  $T^*$ , le remplacement a lieu à  $T^*$ . Si la défaillance a lieu entre  $T_0$  et  $T^*$ , soit l'élément est non réparé et reste défaillant jusqu'à  $T^*$ , soit l'élément défaillant est remplacé par un neuf.

## CHAPITRE IV : MINIMISATION DU COUT DE LA MAINTENANCE PREVENTIVE PAR L'ALGORITHME GENETIQUE

---

*Wang et Pham* ont donné une extension à la politique de remplacement en block ; un élément est imparfaitement réparé à la défaillance si le nombre de réparations est inférieur à  $N$ , après la  $N$ e réparation imparfaite l'élément est préventivement maintenu à  $kT$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) avec la constante  $T > 0$ . Après une MP parfaite le processus est répété. Les variables de décision sont  $N$  et  $T$ .

### IV.2.2. Politique de remplacement périodique avec réparation minimale :

Cette politique est une variante de la précédente, la différence est que suite à une défaillance l'élément reçoit une réparation minimale. Par conséquent, les défaillances surviennent suivant un processus de Poisson non homogène, le nombre moyen de défaillances dans un intervalle  $[0 ; T]$  est donné par :

$$H(T) = \int_0^T \lambda(t) dt \quad \text{IV. 3}$$

Où  $\lambda(t)$  représente le taux d'occurrence de défaillances (ROOCOF pour Rate Of Occurrence Of Failures), pour un composant non réparable il représente le taux de défaillance, l'expression (III.16) devient alors :

$$C(T) = \frac{C_c \cdot H(T) + C_p}{T} = \frac{C_c \cdot \int_0^T \lambda(t) dt + C_p}{T} \quad \text{IV. 4}$$

### IV.2.3. Politique de maintenance périodique imparfaite avec réparation minimale :

Suivant cette politique, l'élément n'est pas remplacé périodiquement mais reçoit juste des maintenances imparfaites. Comme exemple, nous pouvons citer une machine industrielle qui reçoit périodiquement des révisions partielles et après un certain nombre de révisions partielles, la machine reçoit une révision générale. Ce qui voudra dire que le taux d'occurrence de défaillances va changer après chaque action de maintenance préventive, car nous rappelons que, la maintenance imparfaite permet de ramener le taux de défaillance à un niveau situé entre le taux de défaillance initial (neuf) et celui juste avant la maintenance. Dans ce cas, il faut mesurer l'effet de chaque maintenance sur le système. Le taux de défaillance du système, après chaque maintenance sera exprimé en fonction de cet effet et du taux de défaillance précédent. Nous donnons le modèle de *Gertsbakh* où il suppose que l'effet de toutes les maintenances préventives est constant, il fait varier le taux de défaillance exponentiellement, d'une quantité égale à  $e^\alpha$  ( $\alpha > 0$ ). Le coût moyen par unité de temps est donné par :

**CHAPITRE IV : MINIMISATION DU COUT DE LA MAINTENANCE  
PREVENTIVE PAR L'ALGORITHME GENETIQUE**

---

$$C(T) = \frac{C_c \cdot H(T)(1 + e^\alpha + \dots + e^{\alpha(K-1)}) + (K - 1)C_p + C_{ov}}{KT} \quad \text{IV. 5}$$

$C_c$  : Coût de la réparation minimale.

$C_p$  : Coût de maintenance préventive imparfaite (révision partielle).

$C_{ov}$  : Coût de la révision générale.

$K$  : Nombre de révisions partielles avant la révision générale.

$e^\alpha$  : Facteur de dégradation.

**IV.2.4. Politique de maintenance préventive dépendant de l'âge :**

Suivant cette politique, un composant élémentaire est remplacé quand il atteint l'âge  $T$  ou à la défaillance selon l'événement qui se produit en premier. Le coût moyen par unité de temps est donné par :

$$C(T) = \frac{C_p R(T) + [1 - R(T)]C_c}{\int_0^T R(t)dt} \quad \text{IV. 6}$$

Où : Le numérateur représente l'espérance du coût total du cycle et le dénominateur représente l'espérance de la longueur du cycle.

$T$  : l'âge du remplacement préventif (variable de décision).

$C_p$  : le coût du remplacement préventif.

$C_c$  : le coût de défaillance incluant le coût de remplacement.

$R(t) = 1 - F(t)$  est la fonction de fiabilité.

Depuis, plusieurs extensions ou variantes de ce modèle ont vu le jour :

*Tahara et Nishida* ont introduit la politique suivante : remplacer le composant à la première défaillance après  $t_0$  heures de fonctionnement ou quand le temps total de fonctionnement atteint  $T$  ( $0 \leq t_0 \leq T$ ), les défaillances dans  $[0, t_0]$  sont éliminées par une « réparation minimale ». Il faut noter que si  $t_0 \equiv 0 \Rightarrow$  politique de remplacement selon l'âge, si  $t_0 \equiv T \Rightarrow$  Politique de remplacement périodique avec une réparation minimale à la défaillance.

*Nakagawa* a donné une extension comme suit : l'élément est remplacé au temps  $T$  ou après  $N$  défaillances et reçoit une réparation minimale à la défaillance survenant entre les

## CHAPITRE IV : MINIMISATION DU COUT DE LA MAINTENANCE PREVENTIVE PAR L'ALGORITHME GENETIQUE

---

remplacements. Les variables de décision sont  $T$  et  $N$ . Si  $N \equiv 1 \rightarrow$  politique de remplacement selon l'âge.

*Sheu & al* ont examiné une politique généralisée de remplacement selon l'âge, comme suit : si l'élément tombe en panne à l'âge  $y < t$ , il reçoit une réparation parfaite avec une probabilité  $p(y)$ , ou reçoit une réparation minimale avec une probabilité  $q(y) = 1 - p(y)$ . Par ailleurs, l'élément est remplacé quand la première défaillance après  $t$  a lieu ou le temps total de fonctionnement atteint l'âge  $T$  ( $0 \leq t \leq T$ ). Les variables de décision sont  $t$  et  $T$ . Si  $t \equiv 0$ , la politique devient politique de remplacement selon l'âge. Si  $t \equiv T$  et  $q(y) \equiv 1$ , elle devient politique de remplacement périodique avec réparation minimale à la défaillance.

*Sheu & al* ont en fait une autre extension : Ils supposent qu'un élément a deux types de défaillance à l'âge  $z$ , et il est remplacé à la  $n$  défaillance du *type 1* ou à la première défaillance du *type 2*, ou à l'âge  $T$ . La défaillance du *type 1* a lieu avec une probabilité  $p(z)$ , elle est corrigée par une réparation minimale. La défaillance du *type 2* a lieu avec  $q(z) = 1 - p(z)$  et elle est corrigée avec une réparation parfaite.

Si  $p(z) = 0$ , cette politique devient politique de remplacement selon l'âge. Si  $p(z) \equiv 1$  et  $n \equiv \infty$ , elle devient politique de remplacement périodique avec réparation minimale à la défaillance. Les variables de décision sont  $n$  et  $T$ .

*Block & al* introduit une autre politique généralisée de remplacement selon l'âge, c'est la politique de réparation-remplacement, où les éléments sont réparés s'ils tombent en panne et ils sont remplacés seulement s'ils survivent après un certain temps fixé, depuis la dernière réparation ou le dernier remplacement.

*Wang & Pham* ont donné une autre extension appelée « politique de maintenance préventive mixte selon l'âge » où : après la  $n$  réparations imparfaites, il y a deux types de défaillances. Défaillance du *type 1* qui peut être une panne totale, alors que la défaillance du *type 2* peut être interprétée comme un léger problème. Quand une défaillance a lieu, elle est du *type 1* avec une probabilité  $p(t)$  et du *type 2* avec une probabilité  $q(t) = 1 - p(t)$ . Les défaillances du *type 1* sont sujettes à des réparations parfaites et celles du *type 2* sont sujettes à des réparations minimales. Par conséquent chaque réparation est parfaite avec une probabilité  $p(t)$  et elle est minimale avec une probabilité  $q(t) = 1 - p(t)$ . Après  $n$  réparations imparfaites, l'élément va recevoir une maintenance parfaite à l'âge  $T$  ou à la première défaillance du *type 1*. Ce processus continue le long d'un horizon infini. Les variables de décision sont  $T$  et  $n$ . Si  $p(t) \equiv 0$

et  $n=0$ , cette politique devient politique de remplacement périodique avec réparation minimale. Si  $p(t) \equiv 1$  et  $n=0$ , elle devient politique de remplacement selon l'âge.

#### **IV.2.5. Autres politiques de maintenance pour systèmes mono-composants :**

➤ *Politique de la limite de défaillance*

Sous cette politique, la maintenance préventive a lieu seulement lorsque le taux de défaillance ou autres indices de fiabilité atteignent un niveau prédéterminé et les défaillances sont corrigées par des réparations.

➤ *Politique de maintenance préventive séquentielle*

Sous cette politique, un élément est préventivement maintenu à des intervalles de temps inégaux. Souvent les intervalles deviennent de plus en plus courts avec le temps, sachant que la majorité des éléments nécessitent des maintenances plus fréquentes avec l'âge.

➤ *Politique de la limite de réparation*

Lorsqu'un élément tombe en panne, le coût de réparation est estimé et la réparation est entreprise si le coût estimé est inférieur à une limite prédéterminée ; sinon l'élément est remplacé, cette politique est connue sous le nom de « la limite du coût de réparation ». Nakagawa et Osakiont proposé une autre variante appelée « politique de la limite du temps de réparation ». Dans cette politique, l'élément est réparé à la défaillance : si la réparation n'est pas achevée pendant un temps prédéterminé  $T$ , il est remplacé par un neuf ; sinon l'élément réparé est remis en service.  $T$  est appelé la limite du temps de réparation.

### **IV.3. Les algorithmes génétiques :**

Les algorithmes génétiques (AG) sont des techniques d'optimisation puissantes, inspirées des principes de l'évolution naturelle. Introduits par Holland en 1975, leur principe général épouse celui des théories darwiniennes : l'algorithme se charge de maintenir un ensemble de solutions candidates du problème (*individus*), constituant une *population*. Celle-ci s'adapte au cours des générations, par le biais d'opérations successives de sélection, de croisement et de mutation. Chaque individu est évalué et l'ensemble tend à favoriser les individus les mieux évalués. Les individus sont formés par des variables, qui sont les *paramètres* à ajuster dans le problème à traiter (par exemple, une longueur, une distance, un temps ...). La population est conçue aléatoirement à l'intérieur de l'espace de recherche, en respectant les limites prédéfinies (contraintes) par le problème à traiter. Ainsi un individu représente un point de l'espace de décision et devient donc une solution potentielle. Pour mesurer l'adaptabilité de



## CHAPITRE IV : MINIMISATION DU COUT DE LA MAINTENANCE PREVENTIVE PAR L'ALGORITHME GENETIQUE

---

chaque individu au problème, on lui associe une mesure de performance, qui correspond à la valeur du critère à optimiser.

En raison de leur robustesse et de leur personnalisation aisée, les AGs ont été appliqués à un large éventail de problèmes, dont plusieurs problèmes d'optimisation complexes, tels que la conception du cœur du réacteur dans l'ingénierie nucléaire

(Pereira, 2003), les problèmes de transfert de chaleur (Gosselin et al., 2009) et notamment les problèmes liés à l'optimisation de la maintenance. Citons par exemple à ce sujet les travaux de Lapa et al (2000) (Lapa, 2000), Marseguerra et Zio (2000), (Marseguerra, 2000), Tsai et al (2001) ou plus récemment Sortrakul et al (2005), Lapa et al (2006) (Lapa et al., 2006).

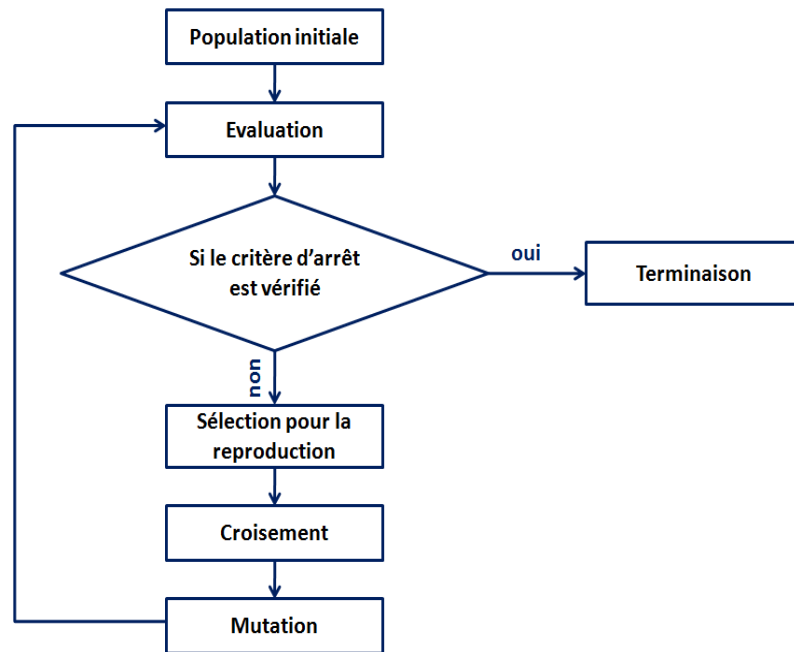
Généralement la modélisation d'un problème d'optimisation par un algorithme génétique se doit de préciser les points suivants :

- (i) définir un individu dont la structure de données code la solution candidate ;
- (ii) fournir une fonction objective qui évalue la solution candidate ;
- (iii) fixer les paramètres de réglage : taille de la population, taux de croisement et de mutation, critères d'arrêt.

Dans notre problème d'optimisation de la maintenance préventive, l'objectif est d'optimiser les intervalles d'interventions entre deux actions de maintenance planifiées pour chaque composant du système, et ce afin de minimiser le coût de fonctionnement et de maintenance du système. Selon que les intervalles entre deux actions de maintenance, pour un composant donné, sont réguliers ou flexibles. [8]

### **IV.3.1. Le principe général du fonctionnement d'un algorithme génétique : [7,8]**

Le principe général du fonctionnement d'un algorithme génétique est représenté sur la figure (IV.1) :



**Figure IV.1 :** Principe général d'un algorithme génétique [7]

### **Etape 1 : Codage**

Le codage du problème (représentation chromosomique des solutions).

### **Etape 2 : Génération de la population initiale**

La population initiale est générée aléatoirement ce qui permettra d'avoir une bonne répartition des individus sur l'espace de la recherche.

### **Etape 3 : fonction d'évaluation**

L'évaluation consiste à calculer pour chaque individu de la population le coût de maintenance afin que les plus forts soient retenus (étape de sélection). L'algorithme génétique tend à minimiser le coût d'individus de la population.

### **Etape 4 : la sélection**

Cela à faire la sélection des individus les plus aptes pour se reproduire parmi la population en se référant à leurs degrés d'adaptation.

### **Etape 5 : opérateurs génétiques**

L'application des algorithmes génétique au problème donné nécessite également la définition des opérateurs génétiques tels que l'opérateur de croisement et l'opérateur de mutation :

L'opérateur de croisement :le rôle de cet opérateur est la recombinaison des caractéristiques de deux individus enfants.[8]

**Etape 6 : L'opérateur de mutation**

L'opérateur de mutation apporte aux algorithmes génétiques la propriété d'ergodicité de parcours d'espace. Cette propriété indique que l'algorithme génétique sera susceptible d'atteindre tous les points de l'espace d'état, sans pour autant les parcourir tous dans le processus de résolution. [7]

**Etape 7 : paramètre des conditions d'arrêt**

Le nombre maximum de génération est choisi comme condition d'arrêt. [8]

**IV.3.2.Optimisation de la périodicité à l'aide d'une dérivation simple :[7]**

La fonction objective  $C(T)$  que l'on veut minimiser est dérivable ; dans ce cas-là, il suffit de déterminer  $T^*$  la solution de l'équation  $C'(T^*) = 0$  qui nous amènera au minimum de  $C(T)$  en prenant en considération les conditions suivantes :

$$C_c > 0; C_p > 0; C_{ov} > 0; T > 0; K > 0; \beta > 1; \alpha > 0 \text{ et } \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{\partial C(T)}{\partial T} \right) \geq 0$$

On a :

$$C(T) = \frac{C_c T^{\beta-1} (1 + e^\alpha + \dots + e^{\alpha(K-1)})}{K \eta^\beta} + \frac{(K-1)C_p + C_{ov}}{KT}$$

Donc :

$$C'(T) = \frac{C_c (\beta - 1) T^{\beta-2} (1 + e^\alpha + \dots + e^{\alpha(K-1)})}{K \eta^\beta} - \frac{(K-1)C_p + C_{ov}}{KT^2}$$

$$C'(T) = \frac{C_c (\beta - 1) T^\beta (1 + e^\alpha + \dots + e^{\alpha(K-1)}) - \eta^\beta ((K-1)C_p + C_{ov})}{\eta^\beta T^2} \text{VI. 7}$$

Alors, on déduit la relation de  $T^*$  pour que  $C'(T^*) = 0$  :

$$\frac{C_c (\beta - 1) T^{*\beta} (1 + e^\alpha + \dots + e^{\alpha(K-1)}) - \eta^\beta ((K-1)C_p + C_{ov})}{\eta^\beta T^{*2}} = 0$$

$$C_c (\beta - 1) T^{*\beta} (1 + e^\alpha + \dots + e^{\alpha(K-1)}) - \eta^\beta ((K-1)C_p + C_{ov}) = 0$$

$$C_c (\beta - 1) T^{*\beta} (1 + e^\alpha + \dots + e^{\alpha(K-1)}) = \eta^\beta ((K-1)C_p + C_{ov})$$

**CHAPITRE IV : MINIMISATION DU COUT DE LA MAINTENANCE  
PREVENTIVE PAR L'ALGORITHME GENETIQUE**

---

$$T^{*\beta} = \frac{\eta^\beta ((K - 1)C_p + C_{ov})}{C_c(\beta - 1)(1 + e^\alpha + \dots + e^{\alpha(K-1)})}$$

$$T^* = \sqrt[\beta]{\frac{\eta^\beta ((K - 1)C_p + C_{ov})}{C_c(\beta - 1)(1 + e^\alpha + \dots + e^{\alpha(K-1)})}} \quad \text{VI. 8}$$

**IV.4. Etude de cas :**

Dans cette étude on va optimiser la période des interventions des équipement choisis (la pompe PP2467A, la turbine T1-1, le compresseur PC5) qu'ils sont au niveau de la centrale à oxygène au sein de l'entreprise SIDER EL HADJAR.

Nous avons établi un programme en Matlab permettant de calculer la valeur de  $T^*$ (la périodicité optimale)en heures et en jours et le coût minimal.

Les coûts de maintenance sont proposés ainsi que le nombre de révision partielle  $K$  et le facteur d'efficacité de la maintenance  $\alpha$ .

Equipement	$C_c$ (DA)	$C_p$ (DA)	$C_{ov}$ (DA)	K	$\alpha$	$\beta$	$\eta$
La pompe PP 2467 A	177278.4	531852	1063470.4	7	0.8	1.08	835.88
La turbine T1-1	34470.8	103412.4	206824.8	7	0.8	1.216	1584.626
Le compresseur PC5	413649.6	1240948.8	2481897.6	7	0.8	1.5	730.536915

**Tableau IV.1 :** Les données de l'application des équipements choisis

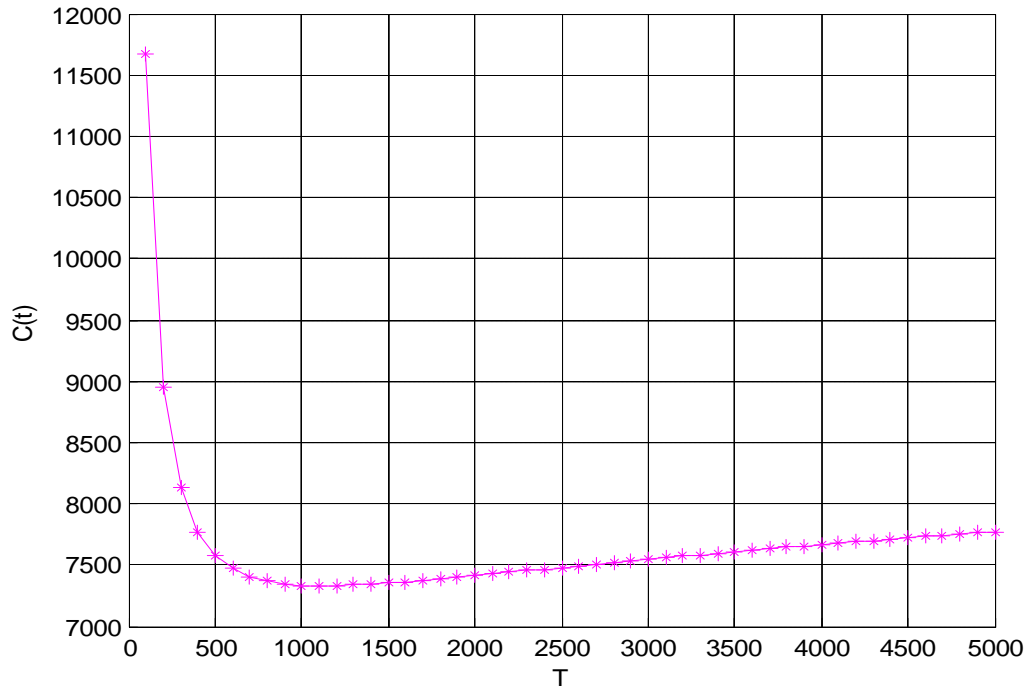
Les résultats du programme sont réunis dans l'équation **IV.5** :

Equipement	$T^*$ en heures	$T^*$ en jours	$C_{min}$ (DA / h)
La pompe PP 2467 A	1119.4	46	7330.2
La turbine T1-1	907.6221	37	733.1658
Le compresseur PC5	1019.4	42	4565.3

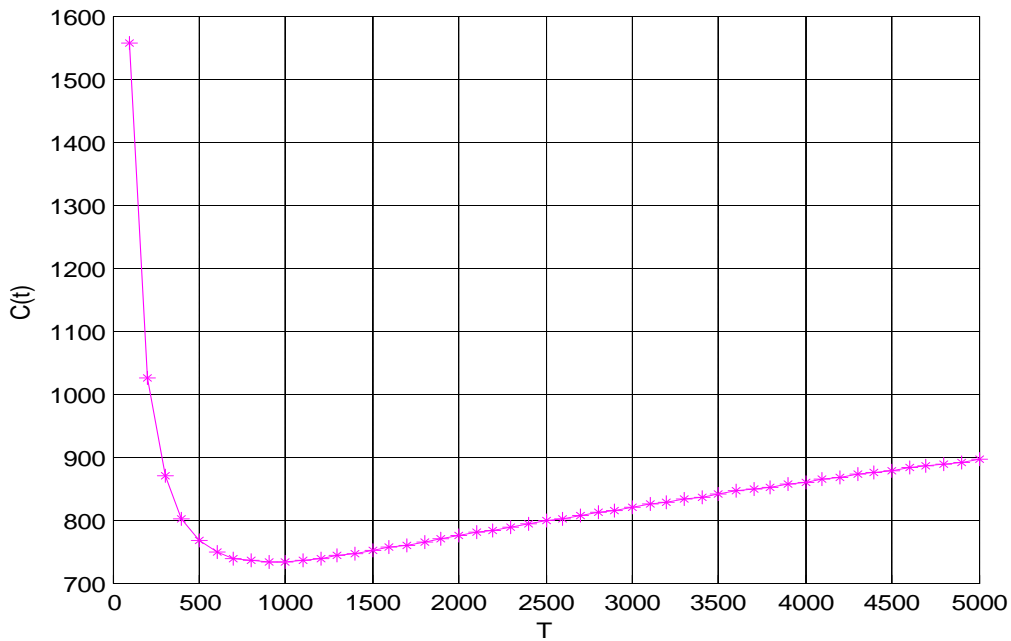
**Tableau IV.2 :**  $T_{optimal}$  et  $C_{minimal}$  obtenus par la méthode de dérivation

## CHAPITRE IV : MINIMISATION DU COUT DE LA MAINTENANCE PREVENTIVE PAR L'ALGORITHME GENETIQUE

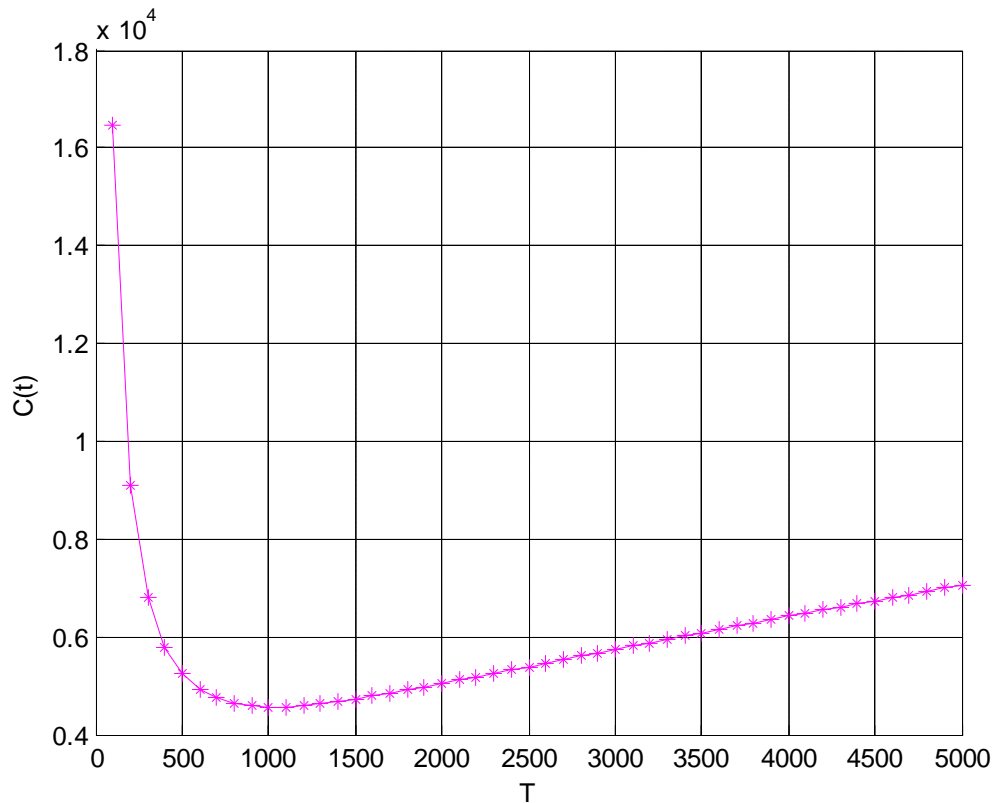
D'après le modèle IV.5 on obtient les figures(IV.2, IV.3, IV4) qui montrent l'évolution du coût C en fonction de temps T des équipements choisis.



**Figure IV.2 :** L'évolution du coût C en fonction du temps T de la pompe PP 2467 A



**Figure IV.3 :** L'évolution du coût C en fonction du temps T de la turbine T1-1



**Figure IV.4 :** L'évolution du coût C en fonction du temps T du compresseur PC5

**Analyse :**

Les courbes illustrent les résultats du programme, le coût commence à décroître jusqu'à ce qu'il atteigne sa valeur minimale  $C_{\min}$  correspond à  $T^*$ , puis il s'accroît avec le temps.

**Commentaire :**

Les résultats des courbes (**fig.IV2, fig.IV3, fig.IV4**) valident les résultats obtenus sur le **tableau IV.7**.

**IV. Conclusion :**

Dans ce chapitre notre but est d'optimiser la périodicité des interventions selon l'état des équipements en minimisant le coût engendré par la maintenance. On a appliqué la politique de maintenance périodique imparfaite avec réparation minimale puis on a déterminé la périodicité optimale ( $T^*$ ) et les coûts minimaux ( $C_{\min}$ ) des interventions avec l'algorithme génétique pour chaque équipement.

## CONCLUSION GENERALE

---

### Conclusion générale :

Dans un contexte de concurrence nationale, de plus en plus difficile, l'efficacité de l'entreprise dépend de sa capacité à OPTIMISER, réduire les pannes de l'outil de production et assurer la fiabilité, la disponibilité et la sécurité de ses installations.

Dans ce travail on a évalué l'état des équipements les plus critiques de la centrale à oxygène au niveau de SIDER EL HADJAR par une étude fiabiliste, on a étudié la loi de WEIBULL d'après cette dernière on a distingué que les équipements ne sont pas fiables mais disponibles. A partir des résultats obtenus de l'analyse pour les équipements critiques il faut améliorer la fiabilité des équipements en appliquant la maintenance préventive et en optimisant la périodicité des interventions. Pour toutes ces raisons l'application de la politique de maintenance périodique imparfaite avec réparation minimale sur les équipements est indispensable. Cette politique nous permet de calculer la périodicité optimale des interventions partielles de chaque équipement et elle présente une remarquable efficacité en matière de réduction du coût global de la maintenance.

Les méthodes d'optimisation stochastiques ont une grande capacité à trouver l'optimum global d'une fonction. Contrairement à la plupart des méthodes déterministes, elles ne nécessitent ni un point de départ, ni la connaissance du gradient de la fonction objective pour atteindre la solution optimale. Parmi ces méthodes, les algorithmes génétiques occupent une place particulière.

L'application de l'algorithme génétique pour l'optimisation de la périodicité, nous a conduit à une période optimale de 1119.4 (h) pour la pompe, 907.6221 (h) pour la turbine et 1019.4(h) pour le compresseur. Dans ce cas la périodicité optimale de tous les équipements est de l'ordre  $\min(1119.4 ; 907.6221 ; 1019.4) = 907.6221$  (h).

## CONCLUSION GENERALE

---

Et finalement on peut dire que les résultats obtenus confirment que cette technique stochastique fournit des bons résultats.

En recommandation ce travail peut être abordé de différentes manières :

- Optimisation des coûts de maintenance préventive
- Optimisation du plan de la planification de maintenance.



## REFERANCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] GASMI YASMINA, Contribution à la mise en place d'une politique de maintenance par analyse des huiles « Cas du Laminoir à Chaud à IMETAL ANNABA », Mémoire master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2016

[2] Wekka, Politique Maintenance des Matériels, Dunod septembre 1998.

[3] Organigramme de la centrale à oxygène COX, 2016

[4] BEY AMINE, Etude de la station de vaporisation de la centrale d'oxygène d'el-HADJAR, Mémoire master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2016.

[5] LINDE KOMM, Document constructeur, Unité de fraction d'air.

[6] LLAURENS JEREMY, Mise en place d'un plan de maintenance préventive sur un site de production pharmaceutique, Thèse de doctorat en pharmacie, Université joseph fourier, Faculté de pharmacie de grenoble, France, 2011.

[7] KARMI YACINE, Optimisation de la maintenance préventive par les algorithmes génétiques des turbocompresseurs de l'unité d'ammoniac « Ferial », Mémoire présenté vue de l'obtention du diplôme de master, Université badji mokhtar Annaba, 2016.

[8] INES AYADI, LAURENT BOUILLAUT, PATRICE AKNIN, PATRICK SIARRY, Optimisation par algorithme génétique de la maintenance préventive dans un contexte de modélisation par modèles graphiques probabilistes, Institut pour la maîtrise des risques, France, 2010.

[9] ZINEB OTSMANI, MOUNIR KHIAT, ABDELKADER CHAKER, Minimisation du coût de la maintenance préventive périodique d'un système série- parallèle par l'algorithme génétique, Institut de maintenance et de sécurité industrielle université d'Oran, Algérie, 2011.

### *Site web:*

[10] Http: <http://esociety.over-blog.com/article-qu-est-ce-que-la-cryogenie-111895352.html>

[11] [//www.in2p3.fr/actions/formation/accélérateurs16/Introduction\\_cryogenie\\_2016.pdf](http://www.in2p3.fr/actions/formation/accélérateurs16/Introduction_cryogenie_2016.pdf)

# ANNEXES

## I. La Pompe PP 2467 A

### Annexe 1 :

Rang	TBF	ni	$\Sigma ni$	Fe (ti)% (Théorie )	F(t) réel	Dn
1	35,0017	1	1	3,22580645	0,03160674	0,000651328
2	67,7413201	1	2	6,4516129	0,06357519	0,000940939
3	77,2829097	1	3	9,67741935	0,072969	0,023805198
4	115,523641	1	4	12,9032258	0,11053096	0,018501302
5	131,873445	1	5	16,1290323	0,12645499	0,034835333
6	157,782744	1	6	19,3548387	0,15142907	0,042119315
7	243,249067	1	7	22,5806452	0,23085312	0,005046671
8	255,028248	1	8	25,8064516	0,24139456	0,01666996
9	376,631387	1	9	29,0322581	0,34395436	0,053631776
10	392,586402	1	10	32,2580645	0,35654835	0,033967701
11	427,636302	1	11	35,483871	0,38351316	0,028674449
12	456,467705	1	12	38,7096774	0,40497674	0,017879964
13	470,849702	1	13	41,9354839	0,41544385	0,003910987
14	499,455172	1	14	45,1612903	0,435794	0,015818907
15	516,511774	1	15	48,3870968	0,44763448	0,03623649
16	614,808213	1	16	51,6129032	0,51172022	0,004408814
17	630,126747	1	17	54,8387097	0,52108941	0,02729769
18	674,347573	1	18	58,0645161	0,54723828	0,033406879
19	724,965135	1	19	61,2903226	0,57558238	0,037320846
20	771,971018	1	20	64,516129	0,60044838	0,044712915
21	844,760759	1	21	67,7419355	0,6363294	0,041089957
22	1010,4767	1	22	70,9677419	0,70717728	0,002500136
23	1131,20878	1	23	74,1935484	0,75041775	0,008482262
24	1151,37692	1	24	77,4193548	0,75702609	0,017167458
25	1210,72013	1	25	80,6451613	0,77552375	0,030927865
26	1270,2892	1	26	83,8709677	0,79274347	0,045966208
27	1348,98637	1	27	87,0967742	0,81357341	0,057394329
28	1481,53184	1	28	90,3225806	0,84421374	0,059012062
30	1644,56663	1	29	93,5483871	0,87531508	0,0601688

# ANNEXES

## Annexe 2 :

Rang	TBF	TTR	M(t)	R(t)	F(t)	$\lambda$ (t)	f(t)	D(t)
1	35,0017	16	0,8613	0,96839326	0,03160674	0,00099429	5,2567E-05	100,281563
2	67,7413201	20	0,9153	0,93642481	0,06357519	0,00105072	9,83782E-05	99,0424432
3	77,2829097	2	0,2188	0,927031	0,072969	0,00106236	0,000111109	99,0276465
4	115,523641	1	0,1161	0,88946904	0,11053096	0,00109867	0,000159358	99,0212283
5	131,873445	12	0,7727	0,87354501	0,12645499	0,0011109	0,000178655	99,0211805
6	157,782744	12	0,7727	0,84857093	0,15142907	0,00112768	0,000207644	99,0211736
7	243,249067	34	0,9850	0,76914688	0,23085312	0,00116924	0,000290157	99,0211733
8	255,028248	10	0,7090	0,75860544	0,24139456	0,00117387	0,000300038	99,0211733
9	376,631387	6	0,5232	0,65604564	0,34395436	0,00121276	0,000383198	99,0211733
10	392,586402	4	0,3897	0,64345165	0,35654835	0,00121698	0,000391763	99,0211733
11	427,636302	10	0,7090	0,61648684	0,38351316	0,00122571	0,000408856	99,0211733
12	456,467705	12	0,7727	0,59502326	0,40497674	0,00123241	0,000421227	99,0211733
13	470,849702	18	0,8916	0,58455615	0,41544385	0,00123561	0,000426856	99,0211733
14	499,455172	1	0,1161	0,564206	0,435794	0,00124172	0,000437025	99,0211733
15	516,511774	2	0,2188	0,55236552	0,44763448	0,00124521	0,000442465	99,0211733
16	614,808213	6	0,5232	0,48827978	0,51172022	0,00126348	0,000465566	99,0211733
17	630,126747	11	0,7265	0,47891059	0,52108941	0,00126608	0,00046801	99,0211733
18	674,347573	20	0,9153	0,45276172	0,54723828	0,00127328	0,000473506	99,0211733
19	724,965135	6	0,5232	0,42441762	0,57558238	0,00128101	0,000477181	99,0211733
20	771,971018	12	0,7727	0,39955162	0,60044838	0,00128775	0,000478351	99,0211733
21	844,760759	5	0,4262	0,3636706	0,6363294	0,00129749	0,000476447	99,0211733
22	1010,4767	2	0,2188	0,29282272	0,70717728	0,00131707	0,000458885	99,0211733
23	1131,20878	4	0,3897	0,24958225	0,75041775	0,00132955	0,000437854	99,0211733
24	1151,37692	2	0,2188	0,24297391	0,75702609	0,00133152	0,00043386	99,0211733
25	1210,72013	2	0,2188	0,22447625	0,77552375	0,00133712	0,000421489	99,0211733
26	1270,2892	1	0,1161	0,20725653	0,79274347	0,0013425	0,000408304	99,0211733
27	1348,98637	8	0,6276	0,18642659	0,81357341	0,00134927	0,000390021	99,0211733
28	1481,53184	1	0,1161	0,15578626	0,84421374	0,00135988	0,000357942	99,0211733
30	1644,56663	4	0,3897	0,12468492	0,87531508	0,0013718	0,000318008	99,0211733

# ANNEXES

## II. La turbine T1-1 :

### Annexe 3 :

Rang	TBF	ni	$\Sigma ni$	Fe(t)%	Dn
1	62,9177	1	1	4,54545455	0,02587021
2	294,0197	1	2	9,09090909	0,03007652
3	443,6578	1	3	13,6363636	0,05521089
4	499,7231	1	4	18,1818182	0,03608652
5	554,2574	1	5	22,7272727	0,01601156
6	705,2435	1	6	27,2727273	0,03905767
7	720,8819	1	7	31,8181818	0,00051862
8	752,6021	1	8	36,3636364	0,03102493
9	913,3426	1	9	40,9090909	0,00856344
10	942,9854	1	10	45,4545455	0,04199195
11	990,1237	1	11	50	0,06865652
12	1136,8310	1	12	54,5454545	0,05831456
13	1291,6009	1	13	59,0909091	0,04937551
14	1503,6751	1	14	63,6363636	0,02768422
15	1705,0000	1	15	68,1818182	0,01698883
16	1911,6178	1	16	72,7272727	0,01199507
17	1983,6509	1	17	77,2727273	0,04146081
18	2064,8546	1	18	81,8181818	0,06982775
19	2202,3797	1	19	86,3636364	0,08849901
20	2496,4926	1	20	90,9090909	0,08496759
21	2660,5344	1	21	95,4545455	<b>0,10747029</b>

# ANNEXES

## *Annexe 4 :*

<b>Rang</b>	<b>TBF</b>	<b>R(t)</b>	<b>F(t)</b>	<b><math>\lambda</math> (t)</b>	<b>TTR</b>	<b>M(t)</b>	<b>f(t)</b>	<b>D(t)</b>
<b>1</b>	62,9177	0,98041566	0,01958434	0,00038226	3,0000	0,3676	2,98719E-05	0,99569083
<b>2</b>	294,0197	0,87901439	0,12098561	0,00053333	8,0000	0,7053	0,000125156	0,99562678
<b>3</b>	443,6578	0,80842548	0,19157452	0,00058289	12,0000	0,8400	0,000173687	0,99562678
<b>4</b>	499,7231	0,7820953	0,2179047	0,00059806	32,0000	0,9925	0,000189265	0,99562678
<b>5</b>	554,2574	0,75671571	0,24328429	0,0006116	6,0000	0,6000	0,000203107	0,99562678
<b>6</b>	705,2435	0,68821506	0,31178494	0,00064426	0,5000	0,0735	0,000235041	0,99562678
<b>7</b>	720,8819	0,68129956	0,31870044	0,00064732	6,0000	0,6000	0,000237839	0,99562678
<b>8</b>	752,6021	0,66738856	0,33261144	0,00065337	3,0000	0,3676	0,000243234	0,99562678
<b>9</b>	913,3426	0,59947253	0,40052747	0,00068127	8,0000	0,7053	0,000265145	0,99562678
<b>10</b>	942,9854	0,58744649	0,41255351	0,00068599	5,0000	0,5340	0,000268259	0,99562678
<b>11</b>	990,1237	0,56865652	0,43134348	0,00069325	2,0000	0,2632	0,000272659	0,99562678
<b>12</b>	1136,8310	0,51286002	0,48713998	0,00071425	3,5000	0,4141	0,000282342	0,99562678
<b>13</b>	1291,6009	0,45846641	0,54153359	0,00073422	7,0000	0,6567	0,000286758	0,99562678
<b>14</b>	1503,6751	0,39132059	0,60867941	0,00075873	5,0000	0,5340	0,000284949	0,99562678
<b>15</b>	1705,0000	0,33517065	0,66482935	0,00077961	9,0000	0,7470	0,000276739	0,99562678
<b>16</b>	1911,6178	0,28472235	0,71527765	0,00079911	3,0000	0,3676	0,000263574	0,99562678
<b>17</b>	1983,6509	0,26873354	0,73126646	0,00080552	5,0000	0,5340	0,000258147	0,99562678
<b>18</b>	2064,8546	0,25164593	0,74835407	0,00081253	8,0000	0,7053	0,000251628	0,99562678
<b>19</b>	2202,3797	0,22486265	0,77513735	0,00082392	4,0000	0,4571	0,000239822	0,99562678
<b>20</b>	2496,4926	0,17587668	0,82412332	0,00084654	1,5000	0,2047	0,000212627	0,99562678
<b>21</b>	2660,5344	0,15292484	0,84707516	0,00085825	6,0000	0,6000	0,000197028	0,99562678

# ANNEXES

## III. Le compresseur PC5 :

### Annexe 5 :

Rang	TBF	ni	$\sum ni$	F(ti) %	Dn
1	59,3935	1	1	2,7027027	0,00452881
2	79,1256	1	2	5,40540541	0,01959709
3	124,0518	1	3	8,10810811	0,01434928
4	196,3160	1	4	10,8108108	0,02075672
5	215,0015	1	5	13,5135135	0,011205
6	223,4769	1	6	16,2162162	0,00775466
7	230,5171	1	7	18,9189189	0,02802051
8	253,4668	1	8	21,6216216	0,03267736
9	265,8062	1	9	24,3243243	0,04749829
10	276,9322	1	10	27,027027	0,06343171
11	319,5502	1	11	29,7297297	0,04740893
12	379,8009	1	12	32,4324324	0,0129543
13	434,8548	1	13	35,1351351	0,01578139
14	444,9165	1	14	37,8378378	0,00116923
15	488,9747	1	15	40,5405405	0,01532036
16	494,4111	1	16	43,2432432	0,00641561
17	502,9998	1	17	45,9459459	0,02512278
18	520,6983	1	18	48,6486486	0,03516423
19	598,8493	1	19	51,3513514	0,00989503
20	626,3280	1	20	54,0540541	0,00695072
21	634,6999	1	21	56,7567568	0,01287987
22	701,7271	1	22	59,4594595	0,01522733
23	718,6539	1	23	62,1621622	0,00140543
24	727,4976	1	24	64,8648649	0,01883999
25	730,3232	1	25	67,5675676	0,04371733
26	793,8934	1	26	70,2702703	0,02458564
27	796,8723	1	27	72,972973	0,04955353
28	823,9266	1	28	75,6756757	0,0583048
29	864,8055	1	29	78,3783784	0,05916337
30	920,3493	1	30	81,0810811	0,05337905
31	942,2558	1	31	83,7837838	0,06831568
32	1060,5805	1	32	86,4864865	0,03793065
33	1075,4281	1	33	89,1891892	0,05864666
34	1100,2518	1	34	91,8918919	<b>0,07554095</b>
35	1193,4100	1	35	94,5945946	0,0689482
36	1287,8777	1	36	97,2972973	0,06828901

# ANNEXES

## *Annexe 6 :*

<b>Rang</b>	<b>TBF</b>	<b>TTR</b>	<b>M(t)</b>	<b>R(t)</b>	<b>F(t)</b>	<b><math>\lambda</math> (t)</b>	<b>f(t)</b>	<b>D(t)</b>
1	59,3935	12,0000	0,6531	0,97750178	0,02249822	0,00057752	0,00016398	0,98786349
2	79,1256	50,0000	0,9879	0,96554304	0,03445696	0,00066801	0,00021579	0,98391433
3	124,0518	30,0000	0,9291	0,9332682	0,0667318	0,00083921	0,000327	0,98311889
4	196,3160	4,0000	0,2974	0,87113517	0,12886483	0,0010593	0,00048304	0,98310455
5	215,0015	1,0000	0,0845	0,85365986	0,14634014	0,00110932	0,00051841	0,98310453
6	223,4769	12,0000	0,6531	0,8455925	0,1544075	0,00113129	0,00053375	0,98310453
7	230,5171	2,0000	0,1618	0,83883132	0,16116868	0,00114924	0,00054616	0,98310452
8	253,4668	34,0000	0,9502	0,81646114	0,18353886	0,00120593	0,00058452	0,98310452
9	265,8062	17,0000	0,7769	0,80425505	0,19574495	0,00123537	0,00060381	0,98310452
10	276,9322	24,0000	0,8797	0,79316144	0,20683856	0,00126135	0,00062041	0,98310452
11	319,5502	10,0000	0,5862	0,75011163	0,24988837	0,00135637	0,00067703	0,98310452
12	379,8009	3,0000	0,2326	0,68862997	0,31137003	0,00148061	0,00073873	0,98310452
13	434,8548	2,0000	0,1618	0,63286726	0,36713274	0,00158588	0,00077732	0,98310452
14	444,9165	18,0000	0,7957	0,62279086	0,37720914	0,00160439	0,00078265	0,98310452
15	488,9747	8,0000	0,5063	0,57927424	0,42072576	0,00168313	0,00080005	0,98310452
16	494,4111	1,0000	0,0845	0,57398318	0,42601682	0,0016926	0,00080155	0,98310452
17	502,9998	10,0000	0,5862	0,56566332	0,43433668	0,00170746	0,00080366	0,98310452
18	520,6983	26,0000	0,8992	0,54867774	0,45132226	0,00173768	0,00080695	0,98310452
19	598,8493	7,0000	0,4608	0,47659146	0,52340854	0,00186546	0,00080614	0,98310452
20	626,3280	2,0000	0,1618	0,45250874	0,54749126	0,00190841	0,00080052	0,98310452
21	634,6999	5,0000	0,3567	0,4453123	0,5546877	0,00192131	0,00079832	0,98310452
22	701,7271	8,0000	0,5063	0,39017807	0,60982193	0,00202172	0,00077335	0,98310452
23	718,6539	4,0000	0,2974	0,37697295	0,62302705	0,00204631	0,0007652	0,98310452
24	727,4976	9,0000	0,5480	0,37019134	0,62980866	0,00205905	0,00076068	0,98310452
25	730,3232	12,0000	0,6531	0,36804166	0,63195834	0,00206311	0,0007592	0,98310452
26	793,8934	7,0000	0,4608	0,32188293	0,67811707	0,00215235	0,00072178	0,98310452
27	796,8723	21,0000	0,8432	0,3198238	0,6801762	0,00215645	0,00071985	0,98310452
28	823,9266	13,0000	0,6824	0,30154805	0,69845195	0,00219329	0,00070176	0,98310452
29	864,8055	5,0000	0,3567	0,27537958	0,72462042	0,00224785	0,00067266	0,98310452
30	920,3493	9,0000	0,5480	0,24256824	0,75743176	0,00231998	0,00063057	0,98310452
31	942,2558	18,0000	0,7957	0,23047784	0,76952216	0,00234783	0,0006134	0,98310452
32	1060,5805	1,0000	0,0845	0,17306579	0,82693421	0,00249307	0,00051844	0,98310452
33	1075,4281	8,0000	0,5063	0,16675477	0,83324523	0,00251072	0,00050653	0,98310452
34	1100,2518	2,0000	0,1618	0,15662203	0,84337797	0,00253996	0,00048673	0,98310452
35	1193,4100	5,0000	0,3567	0,12300226	0,87699774	0,0026469	0,00041462	0,98310452
36	1287,8777	8,0000	0,5063	0,09531604	0,90468396	0,00275122	0,00034672	0,98310452

# ANNEXES

*Annexe 7* : Niveau de signification  $\alpha$  pour le test de Kolmogorov- Smirnov

N	Niveau signification $\alpha$				
	0.20	0.15	0.10	0.05	0.01
1	0.900	0.925	0.950	0.975	0.995
2	0.684	0.726	0.776	0.842	0.929
3	0.565	0.597	0.642	0.708	0.828
4	0.694	0.525	0.564	0.624	0.733
5	0.446	0.474	0.510	0.565	0.699
6	0.410	0.436	0.470	0.521	0.618
7	0.381	0.405	0.438	0.586	0.577
8	0.358	0.381	0.411	0.457	0.543
9	0.339	0.360	0.388	0.432	0.514
10	0.322	0.342	0.368	0.410	0.590
11	0.307	0.326	0.352	0.391	0.468
12	0.295	0.313	0.338	0.375	0.450
13	0.284	0.302	0.325	0.361	0.433
14	0.274	0.292	0.314	0.349	0.418
15	0.266	0.283	0.304	0.338	0.404
16	0.285	0.274	0.295	0.328	0.392
17	0.250	0.266	0.286	0.318	0.381
18	0.244	0.259	0.278	0.309	0.371
19	0.237	0.252	0.272	0.301	0.363
20	0.231	0.246	0.264	0.294	0.356
25	0.21	0.22	0.24	0.27	0.32
30	0.19	0.20	0.22	0.24	0.29
35	0.18	0.19	0.21	0.23	0.27
>35	$\frac{1,07}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,14}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,22}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,36}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,63}{\sqrt{N}}$



## ANNEXES

*Annexe 8* : Distribution de WEIBULL : valeurs des coefficients d'A et B en fonction du paramètre de forme

$\beta$	A	B	$\beta$	A	B	$\beta$	A	B
0,2	120	1901	1,5	0,9027	0,613	4	0,9064	0,254
0,25	24	199	1,55	0,8994	0,593	4,1	0,9077	0,249
0,3	9,2605	50,08	1,6	0,8966	0,574	4,2	0,9089	0,244
0,35	5,0291	19,98	1,65	0,8942	0,556	4,3	0,9102	0,239
0,4	3,3234	10,44	1,7	0,8922	0,54	4,4	0,9114	0,235
0,45	2,4786	6,46	1,75	0,8906	0,525	4,5	0,9126	0,23
0,5	2	4,47	1,8	0,8893	0,511	4,6	0,9137	0,226
0,55	1,7024	3,35	1,85	0,8882	0,498	4,7	0,9149	0,222
0,6	1,5046	2,65	1,9	0,8874	0,486	4,8	0,916	0,218
0,65	1,3663	2,18	1,95	0,8867	0,474	4,9	0,9171	0,214
0,7	1,2638	1,85	2	0,8862	0,463	5	0,9182	0,21
0,75	1,1906	1,61	2,1	0,8857	0,443	5,1	0,9192	0,207
0,8	1,133	1,43	2,2	0,8856	0,425	5,2	0,9202	0,203
0,85	1,088	1,29	2,3	0,8859	0,409	5,3	0,9213	0,2
0,9	1,0522	1,77	2,4	0,8865	0,393	5,4	0,9222	0,197
0,95	1,0234	1,08	2,5	0,8873	0,38	5,5	0,9232	0,194
1	1	1	2,6	0,8882	0,367	5,6	0,9241	0,191
1,05	0,9803	0,934	2,7	0,8893	0,355	5,7	0,9251	0,186
1,1	0,9649	0,878	2,8	0,8905	0,344	5,8	0,926	0,185
1,15	0,9517	0,83	2,9	0,8917	0,334	5,9	0,9269	0,183
1,2	0,9407	0,787	3	0,893	0,325	6	0,9277	0,18
1,25	0,9314	0,75	3,1	0,8943	0,316	6,1	0,9286	0,177
1,3	0,9236	0,716	3,2	0,8957	0,307	6,2	0,9294	0,175
1,35	0,917	0,687	3,3	0,897	0,299	6,3	0,9302	0,172
1,4	0,9114	0,66	3,4	0,8984	0,292	6,4	0,931	0,17
1,45	0,9067	0,635	3,5	0,8997	0,285	6,5	0,9318	0,168
			3,6	0,9011	0,278	6,6	0,9325	0,166
			3,7	0,9025	0,272	6,7	0,9333	0,163
			3,8	0,9038	0,266	6,8	0,934	0,161
			3,9	0,9051	0,26	6,9	0,9347	0,16

## ANNEXES

**Annexe 9** : le programme d'exécution de l'optimisation de la périodicité des interventions

```
function Cx=C2_Ahlem(X)
T=X (1) ;
%K=round (X (2)) ;
Cc=34470.8 ; %Coût de la réparation minimale.
Cp=103412.4 ; %Coût de maintenance préventive imparfaite (révision partielle).
Cov=206824.8 ; %Coût de la révision générale.
K=7 ; %Nombre de révisions partielles avant la révision générale.
Alpha=0.8 ; %Facteur de dégradation.
Beta=1.216 ;
Nu=1584.626 ;
```