

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

Laboratoire de Matériaux,  
Technologie des Systèmes  
Énergétiques et Environnement



*Université de Ghardaïa*

Faculté des Sciences et Technologies  
Département d'automatique et électromécanique



**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER**

**Domaine :** *Sciences et Technologies*

**Filière :** *Electromécanique*

**Spécialité :** *Maintenance Industrielle*

Par : SOLOIS Zeid & HADJ KOUIDER Nacer

**Thème**

Etude, Analyse et Calcul FMD de la turbine à gaz MS5002b

**Soutenu publiquement le 26/06/2019**

**Devant le jury :**

<b>Mohamed ALLALI</b>	<b>MAA</b>	Université	<b>Président</b>
<b>Soufiane MOUATS</b>	<b>MAA</b>	Université	<b>Examinateur</b>
<b>Abderrahmane BELLAOUAR</b>	<b>MCA</b>	Univ. Ghardaïa	<b>Encadreur</b>

**Année universitaire 2018/2019**

N° d'ordre :  
N° de série :

## ***Remerciements***

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

*Toutes nos infinies gratitudes à notre promoteur, Monsieur BELLAOUAR pour son encadrement et ses aides précieuses.*

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

*Notre sincère reconnaissance à nos enseignants du département : Automatique et électromécanique.*

*Nos remerciements s'adressent aussi, à tous les travailleurs de la région de Oued Noumer.*

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

*HADJ KOUIDER Nacer*

*SOLOIS Zeid*

## ***Dédicaces***

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

*Tout d'abord nous tenons à remercier le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour arriver à ce stade afin de réaliser ce travail qu'on dédie : A nos trop chers parents : nos mères et nos pères.*

*A nos chers frères et nos précieuses sœurs.*

*A toute la famille HADJ KOUIDER et SOLOIS.*

*A tous nos amis partout, et en particuliers Et sans doute à Nos trop chers amis à l 'Université de GHARDAIA.*

*A tous nos chers cousins et cousines.*

*Et à la fin on dédie très chaleureusement : Mr. BELLAOUAR*

# Liste des tableaux

---

## Les tableaux de chapitre I

Tab I 1 : Capacité de stockage d'ONR.....	05
---	----

## Les tableaux de chapitre IV

Tab IV 1 : Inspections typiques de système de combustion.....	51
Tab IV 2 : Inspection typique de veine des gaz chauds.....	52
Tab IV 3 : Inspection typique de révision générale.....	52

## Les tableaux de chapitre V

Tab V 1 : Historique de la TAG MS5002b.....	59
Tab V 2 : Résultats des calculs ABC .....	60
Tab V 3 : Résultats de calcul $F(i)$ .....	61
Tab V 4 : Résultats de calcul $MTBF, V$ et $\sigma$ .....	63
Tab V 5 : Résultat de la fiabilité à chaque instant.....	65
Tab V 6 : Résultats de la fonction de répartition.....	66
Tab V 7 : Résultats de la fonction $f(t)$ .....	67
Tab V 8 : Résultats des taux de défaillance.....	68
Tab V 9 : Résultat de la fonction $M(t)$ .....	70
Tab V 10 : Résultats de la disponibilité.....	72

# Liste des figures

---

## Les figures de chapitre I

Figure I.1 : Situation géographique de ONR.....	05
Figure I.2 : Les champs principaux d'Oued Noumer.....	07
Figure I.3 : Organigramme représentatif d'ONR.....	07
Figure I.4 : Schéma représentatif d'unité de traitement de gaz.....	10
Figure I.5 : Unité de compression (Unité 30).....	11
Figure I.6 : Unité de traitement de GPL.....	13

## Les figures de chapitre II

Figure II.1 : Schéma de la turbine à gaz à deux arbres.....	18
Figure II.2 : Corps de compresseur axial de la TAG Ms5002b.....	21
Figure II.3 : Section de combustion vue externe.....	22
Figure II.4 : Les tubes a flamme de la TAG Ms5002b.....	23
Figure II.5 : La Directrice fixe de premier étage.....	24
Figure II.6 : La roue HP de premier étage.....	25
Figure II.7 : La roue BP de deuxième étage.....	25
Figure II.8 : schéma de système d'admission de la TAG.....	29

## Les figures de chapitre III

Figure III.1 les type de la maintenance.....	38
Figure III.2 : Courbe Pareto.....	41
Figure III.3 : Courbe de la loi normale.....	43
Figure III.4 : Courbe en baignoire.....	44
Figure III.5 Différentes formes de R(t).....	47
Figure III.6 Les composantes de la disponibilité d'un équipement.....	48
Figure III.7 : les différentes grandeurs caractérisant la FMD.....	48

## Les figures de chapitre IV

Figure IV.1 : Plumes, herbes et dechects dans le Couloir d'écoulement d'air.....	53
Figure IV.2 : Dépôt calamine et usure sur les nez.....	54
Figure IV.3 : Usure des lèvres sur la fourchette et fissure de trois pièces.....	54
Figure IV.4 : Usure des tubes a flamme.....	55
Figure IV.5 : Différence de longueur des tubes a flamme.....	55
Figure IV.6 : Tubes à flamme.....	55
Figure IV.7 : Chambres de combustion.....	56
Figure IV.8 : Vued'ensemble des aubes directrice 1 <sup>er</sup> étage.....	56

## Liste des figures

---

Figure IV.9 : Vue aubes directrice 2 <sup>ème</sup> étage.....	57
Figure IV.10 : Aube de la roue HP.....	57
Figure IV.11 : Aubes de la roue BP.....	57
Les figures de chapitre V	
Figure V.1 : La courbe ABC.....	60
Figure V.2 : La courbe $R(t)$ .....	65
Figure V.3 : La courbe de la fonction $(Ft)$ .....	67
Figure V.4 : La courbe de la densité de défaillance $f(t)$ .....	68
Figure V.5 : La courbe de taux de défaillance.....	69
Figure V.6 : La courbe de la maintenabilité.....	70
Figure V.7 : La courbe de la disponibilité.....	72

## Liste des abréviations

---

TEP : Tonnes Equivalent Pétrole.

ONR : Oued Noumer.

HR : Hassi Rmel.

GNL : Gaz Naturel Liquéfié.

GPL : Gaz de Pétrole Liquéfiés.

HP : Haute Pression.

BP : Base Pression.

MP : Moyenne Pression.

SCADA : Supervisory Control and Data Acquisition.

TAG : Turbine à Gaz.

FMD : Fiabilité Maintenabilité Disponibilité.

TBF: Temps de Bonne Fonction.

TTR : Temps Technique de Réparation.

## Liste des Symboles

---

$F(i)$  : La fréquence relative.

$R(t)$  : Fiabilité.

$f(t)$  : Densité de probabilité.

$F(t)$  : Fonction de répartition.

$\lambda(t)$  : Taux de défaillance.

$M(t)$  : Maintenabilité.

$\mu(t)$  : Taux de réparation.

$D(t)$  : Disponibilité instantané.

$D_i$  : Disponibilité intrinsèque au asymptotique.

La loi de Weibull :

$\beta$  : Paramètre de forme (loi de Weibull).

$\eta$  : Paramètre d'échelle (loi de Weibull).

$\gamma$  : Paramètre de position (loi de Weibull).

$\sigma$  : L'écart type des temps de fonctionnement.

$V$  : La variance.

La loi binomiale :

$n$  : Nombre d'épreuve.

$p$  : Probabilité de succès.

La loi de poisson :

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

---

## Résumé

Dans ce travail, nous allons identifier l'état de fonctionnement d'une turbine à gaz MS5002b installée au sein de centre de production d'Oued Noumer, region Hassi R'mel SONATRACH. L'étude est basée sur un historique et des données de la machine, où on a fait une analyse (méthode ABC) des pannes et un calcul FMD par la loi de weibull, aussi nous allons démontrer le déroulement d'une intervention effectuée sur une turbine.

## Abstract

In this work, we will identify the operating status of an MS5002b gas turbine installed in Oued Noumer production center, Hassi R'mel region (SONATRACH). The study is based on a history and data of the machine, where we made an analysis (ABC method) of the failures and a calculation FMD by the law of weibull, also we will demonstrate the course of an intervention carried out on a turbine.

## ملخص

في هذا العمل سنقوم بتشخيص حالة عمل توربينات غازية MS5002b مثبتة في مركز الإنتاج واد نومر ، منطقة حاسي الرمل (سوناطراك). هذه الدراسة مستندة على تاريخ عمل و بيانات الآلة، حيث أجرينا تحليلا للأعطال بطريقة ABC، وحساب FMD اعتمادا على قانون Weibull، كما سنوضح سيرورة تدخل تم على توربينات غازية.

**Mots clé :** Turbine à gaz, Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité, Maintenance.

---

## Sommaire

Liste des tableaux .....	i
Liste des figures .....	ii
Liste des abréviations.....	iii
Liste des symboles.....	iv
Résumé.....	v
Sommaire .....	vi
Introduction Générale.....	01
<b>Chapitre I : Description du champ d'accueil ONR</b>	
I.1 Qui est SONATRACH d'aujourd'hui.....	03
I.2 Présentation de HASSI R'MEL.....	03
I.2.1 Situation géographique.....	03
I.2.2 Historique HASSI R'MEL.....	04
I.3 Direction de Oued-Noumer.....	04
I.3.1 Situation géographique.....	04
I.3.2 Historique d'Oued-Noumer.....	05
I.3.3 Les gisements d'Oued-Noumer .....	06
I.3.4 Organigramme d'Oued-Noumer.....	07
I.4 Description général des installations.....	08
I.4.1 Unité de traitement de brut et de gaz (unité 20).....	08
I.4.2 Unité 30 (unité de compression).....	10
I.4.3 Unité d'extraction GPL.....	11
I.5 Département de maintenance.....	13
I.5.1 Service Planning & Méthodes.....	14
I.5.2 Service électricité.....	14
I.5.3 Service Mécanique.....	14
I.5.4 Service Instrumentation.....	15
I.6 Département production.....	15
I.7 Département Logistique.....	15
I.8 Cellule travaux neufs.....	16
I.9 Cellule informatique.....	16
I.10 Service sécurité.....	16
I.11 Service gestion & paie.....	16

I.12 Service Finance.....	16
I.13 Service intendance.....	16
I.14 Conclusion.....	16

## **Chapitre II : Description de la TAG MS5002b**

II.1 Les composantes de la turbine à gaz MS5002b.....	17
II.1.1 Sections principales de la turbine à gaz MS 5002b.....	18
II.1.1.1 Section compression.....	18
II.1.1.2 Section combustion.....	21
II.1.1.3 Section turbine.....	23
II.1.2 Socle des auxiliaires.....	26
II.1.3 Compartiment des auxiliaires.....	26
II.1.3.1 Tableau des manomètres.....	26
II.1.3.2 Turbine de lancement.....	26
II.1.3.3 Convertisseur de couple.....	26
II.1.3.4 Embrayage de lancement.....	27
II.1.3.5 Réducteur.....	27
II.1.3.6 Accouplement.....	27
II.1.3.7 Vireur Hydraulique.....	28
II.1.4 Partie Auxiliaire.....	28
II.1.4.1 Section d'échappement.....	28
II.1.4.2 Paliers.....	28
II.2 Les systèmes principaux de la turbine.....	29
II.2.1 Système d'admission.....	29
II.2.2 Système de démarrage.....	29
II.2.3 Système de graissage.....	30
II.2.4 Système d'air de refroidissement et d'étanchéité.....	31
II.2.5 Système de gaz combustible.....	31
II.2.6 Système de protection.....	32
II.3 Caractéristiques de la turbine à gaz MS5002b.....	34
II.4 Principe de fonctionnement de la turbine à gaz MS5002b d'ONR.....	35
II.5 Conclusion.....	36

## **Chapitre III : Concepts Généraux de La Maintenance et FMD**

III.1 Introduction.....	37
-------------------------	----

---

III.2 La maintenance industrielle.....	37
III.2.1 Les types de la maintenance.....	38
III.2.2.1 Maintenance préventive.....	38
III.2.2.2 Maintenance corrective.....	39
III.2.3 Les opérations de maintenance.....	39
III.2.3.1 Dépannage .....	39
III.2.3.2 Réparation.....	39
III.2.3.3 Visites.....	40
III.2.3.4 Contrôles.....	40
III.2.3.5 Révisions.....	40
III.2.4 Définition de la méthode ABC (Pareto).....	40
III.4.1 But de la méthode ABC.....	41
III.3 Fiabilité des équipements et FMD.....	42
III.3.1 Définitions la fiabilité.....	42
III.3.2 Objectifs de la fiabilité.....	42
III.3.3 Les fonctions de probabilité.....	42
III.3.3.1 La fonction de fiabilité.....	42
III.3.3.2 Fonction de répartitions.....	42
III.3.3.3 Densité de probabilité.....	42
III.3.3.4 Taux de défaillance.....	43
III.3.4 Les courbes de fiabilité.....	43
III.3.5 Les lois principales de fiabilité.....	44
III.3.5.1 Les lois discrètes.....	44
III.3.5.2 Les lois continues.....	45
III.3.6 Définition Maintenabilité.....	47
III.3.6.1 Maintenabilité et maintenance.....	47
III.3.6.2 Maintenabilité et disponibilité.....	48
III.3.7 Définition Disponibilité.....	48
III.3.8 Relation entre les différentes grandeurs caractérisant la FMD d'un équipement....	48
III.4 Conclusion.....	49
<b>Chapitre IV : Intervention effectuée sur la TAG MS5002b et Recommandations</b>	
IV.I Introduction .....	50
IV.2 La maintenance appliquée sur les turbines à gaz MS 5002 B.....	50

IV.2.1 Inspection du système combustion (combustion inspection CI).....	50
IV.2.2 Inspections de la veine des gaz chauds (hot gaz path inspection HPGI).....	51
IV.2.3 Révision générale (major inspection MI).....	52
IV.2.4 Maintenance conditionnelle.....	52
IV.3 Intervention et constatation.....	53
IV.3.1 Section d'admission.....	53
IV.3.2 Section de combustion.....	54
IV.3.2.1 Injecteurs.....	54
IV.3.2.2 Longuettes de revenue.....	54
IV.3.2.3 Tubes d'interconnexion.....	54
IV.3.2.4 Tubes à flammes.....	55
IV.3.2.6 Chambres de combustions.....	56
IV.3.3 Inspection boroscopique.....	56
IV.4 Recommandations.....	58
IV.5 Conclusion.....	58

### **Chapitre V : Analyse FMD de la TAG Ms5002b**

V.1 Introduction .....	59
V.2 Historique des pannes TAG MS5002b.....	59
V.3 L'application de la méthode ABC.....	60
V.3.1 Courbe (ABC).....	60
V.4 Application de la méthode de Weibull.....	61
V.4.1 Calcule de la fréquence relative $F(i)$ .....	61
V.4.2 Détermination des paramètres de Weibull.....	62
V.4.3 Calcule de MTBF.....	62
V.4.4 Détermination des fonctions de probabilité par Weibull.....	63
V.4.4.1 Les valeurs des fonctions de probabilité en fonction de MTBF .....	63
V.4.4.2 Calcul du temps souhaitable pour une intervention systématique.....	64
V.4.4.3 Etude des fonctions de probabilité à chaque instant (t).....	65
V.5 Estimation de la maintenabilité.....	69
V.5.1 Calcule de la fonction $M(t)$ et MTTR.....	69
V.6 Estimation de la disponibilité.....	71
V.6.1 Disponibilité intrinsèque au asymptotique.....	71
V.6.2 Disponibilité instantané $D(t)$ .....	71

---

V.7 Conclusion .....	73
Conclusion générale.....	74
Références bibliographiques.....	75
Annexe A.....	77
Annexe B.....	78

---

## Introduction générale

Le monde de l'industrie dispose de machines et d'installations de plus en plus performantes et complexes, en particulier les turbines à gaz. Elles ont connu ces dernières années un développement considérable dans de nombreuses applications industrielles, et en particulier dans le domaine du transport et de réinjection du gaz, notamment en Algérie.

L'évolution de la turbine à gaz et son succès ont été conditionnés par l'amélioration de ces performances techniques. Les exigences de haute sécurité, la réduction des coûts d'exploitation, la maîtrise de la disponibilité des équipements et l'amélioration de leur fiabilité donnent à la maintenance des systèmes un rôle prépondérant. Elle doit permettre de n'intervenir qu'en présence d'éléments défectueux, de minimiser le temps de réparation, et de fournir un diagnostic fiable et facilement interprétable malgré la complexité des équipements. Cela implique la mise en place impérieuse d'une maintenance préventive qui est l'une des méthodes actuelles les plus utilisées dans l'industrie. Cette dernière est devenue un vrai métier avec ses propres concepts et méthodologie. Parmi les facteurs qui ont favorisé ce type de maintenance, nous pouvons citer l'automatisation, le diagnostic et la surveillance industrielle.

La turbine à gaz (TAG), comme toute autre grosse machine tournante, demande un programme d'examens planifiés, avec réparation et remplacement des pièces pour obtenir le maximum de disponibilité et de fiabilité.

Pour cela on a essayé dans ce mémoire à base des données et informations récupérer de la direction régionale de centre de production (gaz mélange) d'Oued Noumer (ONR) (SONATRACH) ; ou on a fait notre stage pratique, de faire une étude de la maintenance appliquer sur la TAG MS5002b installé au sein du ce centre et un calcul de fiabilité, afin d'identifier l'état de fonctionnement de la TAG.

Le mémoire est composé en deux parties :

La première partie théorique contient trois chapitres :

- Chapitre I : Description général d'ONR notre lieu de stage.
- Chapitre II : Description général de la TAG MS5002b (Composant principales, systèmes et principe de fonctionnement...)

- 
- Chapitre III : Une revue bibliographique de la FMD (Maintenance et ses types et opérations, fiabilité et ces lois, maintenabilité et disponibilité.)

La deuxième partie est expérimentale, deux chapitre comme suite :

- Chapitre IV : Intervention et maintenance appliqué sur une TAG MS5002b au sein de centre ONR.
- Chapitre V : Analyse par la méthode ABC et calcul FMD par l'utilisation de la loi de Weibull.

## Chapitre I : Description du champ d'accueil Oued Noumer

### I.1 Qui est SONATRACH d'aujourd'hui ?

D'abord le mot SONATRACH c'est l'abréviation de quoi ?

**SO** : société.

**NA** : nationale.

**TRA** : transport et transformation.

**C** : commerciale.

**H** : hydrocarbure.

**SONATRACH** est la compagnie Algérienne de recherche d'exploitation, de transport, par canalisation, de transformation et commercialisation des hydrocarbures et de leur dérivés.

Elle intervient également dans d'autres secteurs tels que la génération électrique, les énergies nouvelles et renouvelables et dessalement d'eau de mer. Elle exerce ses métiers en Algérie et par tout dans le monde où des opportunités se présentent.

**SONATRACH** est la première entreprise du continent africain. Elle est classée 28<sup>ème</sup> parmi les compagnies pétrolières mondiales (statistique de World Atlas 2016), 7<sup>ème</sup> exportateur de GNL et GPL et 5<sup>ème</sup> exportateur de gaz naturel. Sa production globale (tous produits - confondus) est 205 million de TEP en 2017. Elle emploie 120 000 personnes dans l'ensemble du groupe (toutes les filiales de Sonatrach). [1]

### I.2 Présentation de HASSI R'MEL

#### I.2.1 Situation géographique :

HASSI R'MEL (HR) porte du désert, se trouve à 525Km au sud d'Alger. Dans cette région relativement plate du Sahara septentrional l'altitude moyenne est d'environ 750 m. Le paysage vaste plateau rocaillieux est parsemé de « daïas » petites dépressions dans lesquelles s'est accumulé un peu de terre ou pousse une végétation composée essentiellement de buissons, mais aussi d'arbres (pistachiers sauvages) le climat est caractérisé par pluviométrie faible (140mm par an) et une humidité moyenne de 19% en été 34% en hiver, les amplitudes

thermique sont importantes et les températures varient entre 5°C en hiver et 45°C en été .les vents dominants sont de direction nord-ouest.

### **I.2.2 Historique de Hassi R'mel :**

Dans le champ de HR le premier puits (HR1) a été foré en 1956, ce puits a mis en évidence la présence de gaz riche en condensat à une pression de 310 bars et une température de 90°C.

Le gisement de HR est classé 4ème au monde et 1ere au niveau d'Algérie, il est d'une superficie de 3500 m<sup>2</sup>, il s'étend sur 70 km du nord au sud et 50 km d'est en ouest.

Les principaux champs sont : Hassi R'mel, Djebel bissa, Oued Noumer, Ait-kheir, Makouda et Sidi Mezghich [1].

### **I.3 Direction d'Oued-Noumer :**

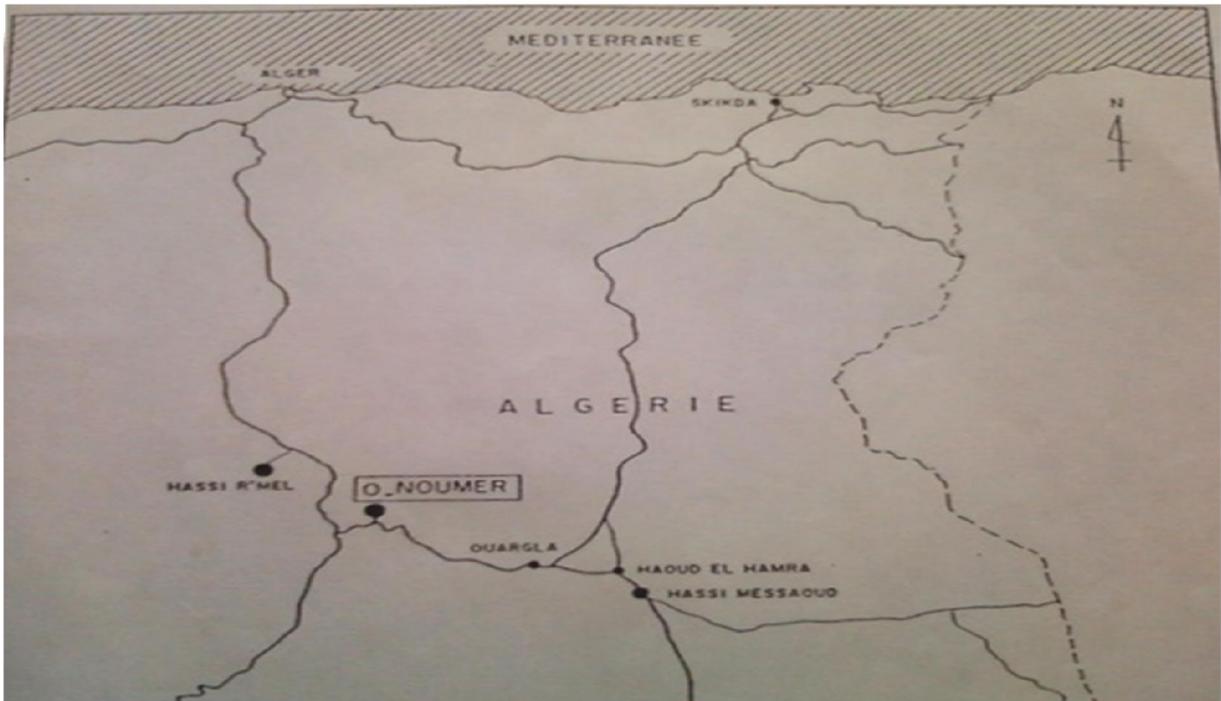
Oued-Noumer (ONR) est une direction minimale sous la direction générale dans SONATRACH (HASSI R'MEL). Elle est direction très importante à production dans HASSI R'MEL et SONATRACH en général.

#### **I.3.1 Situation géographique :**

La direction d'ONR est située à 140 km au Sud-est du champ gazier de HR et administratif et sa base de vie sont installés à 5 km au nord de route nationale 49 : axe routier reliant les wilayas de Ghardaïa et Ouargla à environs de 50km de Ghardaïa.

Ce champ s'étend sur une superficie de 110 km<sup>2</sup> ; il produit du gaz à condensat et de l'huile.

Le climat de la région est caractérisé par une faible pluviométrie (130 mm/an) et une humidité moyenne de 18% en été et de 30% en hiver [2].



**Figure I.1 :** Situation géographique d'ONR

### I.3.2 Historique d'Oued noumer :

Le site d'ONR est parmi les champs gazier découvert par SONATRACH en 1969, il est situé à 140 Km au sud-est du champ gazier de HR et à 220 Km au nord-ouest du champ pétrolier de Hassi Messaoud.

Depuis sa mise en service en 1972, il a pris une place dans la production nationale, dont sa production actuelle est presque de [2] :

- ❖ Brut : 1600 tonnes/jour.
- ❖ GPL : 240 tonnes /jour.
- ❖ Gaz sec : 5 million de m<sup>3</sup>/jour.

Et sa capacité de stockage est de [10] :

**Tab I.1 :** Capacité de stockage d'ONR

Désignation	Nombre	Volume (m <sup>3</sup> )	Pression (bar)	Capacité globale (m <sup>3</sup> )
Bacs de stockage	4	4880	1(atm)	20 520
Bacs test	1	1000	1(atm)	
Sphères GPL	2	540	13	1080

### I.3.3 Les gisements d'Oued Noumer :

Le champ d'ONR se compose de neuf petites structures :

- **Oued-Noumer :**

Le gisement d'Oued Noumer a été découvert en 1969 par le puits ONR 1, il a produit de l'huile et du gaz des réservoirs "A" et "B". Jusqu'à présent, 16 puits ont été forés (de ONR 1 à ONR 14 plus ONR 1bis et ONR 8bis) dont cinq sont noyés (ONR 2, 4, 6 13, 14) et un d'observation ONR 10.

- **Ait-Khier :**

Le gisement d'Ait-Kheir a été découvert en 1972 par le puits ATK 1, il a produit de l'huile et du gaz des réservoirs "A" et "B", vingt-sept puits ont été forés.

- **Djorf :**

Le gisement de Djorf (DJF) A été découvert en 1974 par le puits DJF 1, il a produit de l'huile et du gaz du réservoir "A" seulement.

- **Sidi-Mezghich :**

Le gisement de Sidi Mezghich a été découvert en 1976 par le puits SMZ1, il a produit de l'huile et du gaz du réservoir "A" seulement. Trois puits ont été forés

- **Makouda :**

Le gisement Makouda a été découvert en 1975 par le puits MKA 1, il a produit de l'huile et du gaz du réservoir "A" seulement. Quatre puits ont été forés.

- **Gleib-Djamel :**

Le gisement de Gleib-Djamel (GED) A été mis en production le 30/05/2013 par un seul puits GED1.

- **Trefis :**

Le gisement de Trefis (TRF) A été découvert par le puits TRF1, mis en production le 30/05/2013, un autre puits a été foré dans la même structure TRF2 mais trouvé sec.

- **Hassi-Boukhalala Nord :**

Le gisement Hassi-boukhalala nord (HBKN) A été découvert par le puits HBKN 1, mis en production le 03/09/2014.

- **Oued-Elgofran :**

Le gisement d'Oued-elgorfan (OGR) A été découvert par le puits OGR 1, mis en production le 24/02/2016.

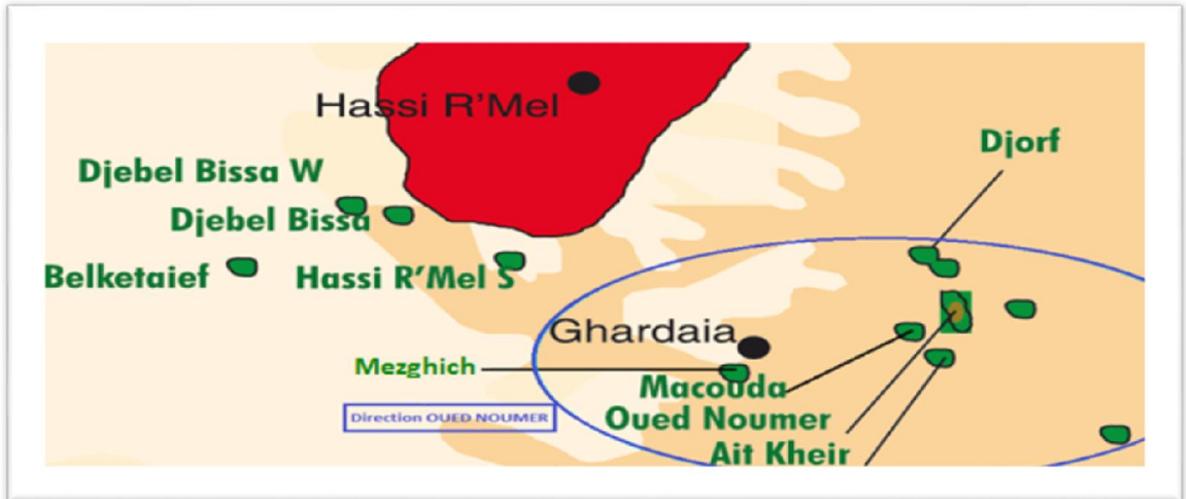


Figure I.2 : Les champs principaux d'ONR

**I.3.4 Organigramme d'Oued-Noumer :**

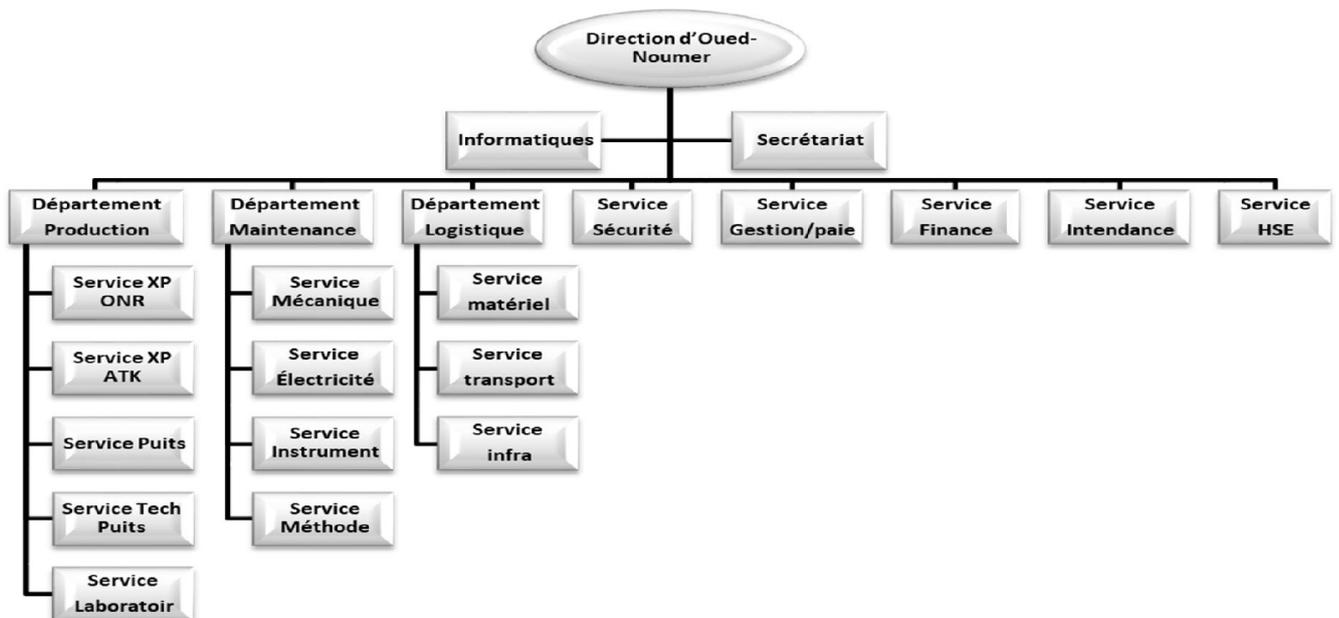


Figure I.3 : Organigramme représentatif d'ONR

## **I.4 Description général des installations**

### **I.4.1 Unité de traitement de brut et de gaz (unité 20) :**

Cette unité a pour but de séparer le gaz associé de l'huile brute. Cette séparation s'effectue en trois (03) étages, travaillant à des pressions décroissantes, de façon à dégager le plus possible l'huile brute, avant de la stocker.

Afin d'améliorer la stabilisation de l'huile, deux (02) fours de stabilisation permettent d'ajuster la tension de vapeur Reid (TVR) de l'huile pour éviter un dégazage dans les bacs de stockage.

Les gaz de séparation des trois étages sont récupérés et comprimés dans l'unité de compression. [3]

- **Séparateur HP (20B01) :**

- Le séparateur reçoit à partir du manifold existant du centre, le mélange (gaz, l'huile, eau) provient des puits de ONR.
- La pression de séparation déclinera dans le temps, de 15 à 12 bars absolus.
- L'eau de gisement décantée, est expédiée sous régulation de niveau, vers le borbier.
- Le gaz HP efflue, est expédie sous régulation de pression vers le ballon 20B02.
- L'huile brute est envoyée sous régulation de niveau dans le séparateur MP 20B03. [3]

- **Four de stabilisation (20F01 A/B) :**

- Les deux fours de stabilisation sont identique, chacun étant dimensionné pour assurer 50% de service.
- La puissance des fours a été dimensionnée de manière à pouvoir évacuer aux bacs de Stockage, un mélange stabilisé (l'huile, condensats), de TVR très faible.
- L'aimantation des deux fours est constituée de :
  - L'huile brute de séparateur 20B01.
  - L'huile brute d'ATK.
  - Les condensats récupérés au niveau de l'unité de production de GPL.

- Le mélange se réchauffe à une température donnée (voisine de 65 °C) est envoyé au Séparateur MP 20B03. [3]

• **Séparateur MP (20B03) :**

- Le séparateur 20B03 d'une pression de service 3 bars absolus, reçoit les effluents chauds des fours de stabilisation.

- L'eau de gisement éventuelle est décantée, puis expédiée au bournier sous régulation de niveau.

- L'huile est envoyée sous régulation de niveau au séparateur BP.

- Le gaz MP efflué est expédié sous régulation de pression vers l'unité de compression. [3]

• **Séparateur BP (20B04) :**

- Le séparateur BP d'une pression de service 01 bar est alimenté par l'huile effluée du séparateur MP.

- Il est installé à une hauteur de 10 mètres, sur une structure métallique.

- L'eau de gisement éventuelle, est décantée, puis expédiée aux bacs de stockage.

- Le gaz BP efflué (1 bar), est expédié sous régulation de pression vers l'unité de compression. [3]

• **Séparateur HP de gaz (20B02) :**

- Le séparateur HP de pression de service 15 bars est alimenté par :

- Le gaz efflué du séparateur HP du brut (20B01).
- Le gaz HP issu de l'unité de compression (sortie compresseur 31K01).
- Le gaz venant du ATK dans une pipe de 30.

- L'eau de gisement éventuelle est décantée, puis expédiée au bournier sous régulation de niveau. [3]

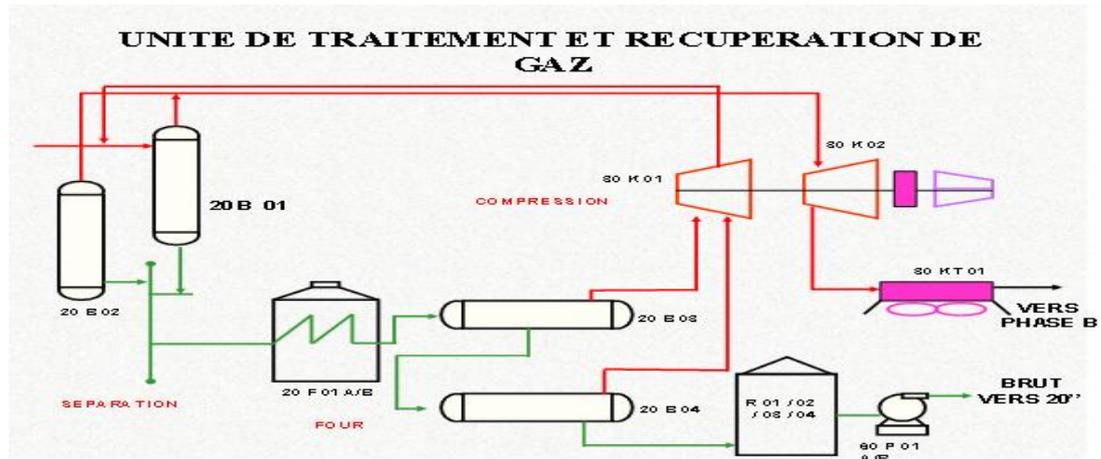


Figure I.4 : Schéma représentatif d'unité de traitement de gaz

### I.4.2 Unité 30 (unité de compression) :

- Les installations de compression des gaz sont de conception strictement identique (unité 031/032/033), chaque unité comprend essentiellement :

- Compresseur 031 K01 comprenant un étage BP et un étage MP.
- Compresseur 031 K02 comprenant un étage MP et un étage HP.
- Une turbine à gaz 031KG01 avec son auxiliaire.

- Le gaz BP venant du 20B04 arrive en alimentation du 31B01 à une pression d'environ 1 bar absolu.

- Le gaz sort du séparateur filtre 31B01 se dirigeant vers l'aspiration du 1<sup>er</sup> étage du 31B02.

- Le gaz MP venant du 20B03 arrive en alimentation du 31B02 à une pression d'environ 3 bars absolus.

- Le gaz sort du séparateur filtre 31B02 se dirigeant vers l'aspiration du 2<sup>ème</sup> étage du 31K01.

- Le gaz HP issu de 31K01 est le produit de compression des gaz MP et BP est dirigé principalement vers le séparateur filtre 31B03, puis il est dirigé vers l'aspiration 1<sup>er</sup> étage du 31K02 (3<sup>ème</sup> étage de la compression).

- Le gaz sort du compresseur à une pression de 45 bars absolus, et il se dirige vers le séparateur filtre 31B04, après son refroidissement dans les aéro-réfrigérants 31A02 et 31A01, le gaz est dirigé vers l'aspiration 2<sup>ème</sup> étage du 31K02.

- Le gaz HP sort du 31K02 à une pression de 100 bars absolus, puis il se dirige directement vers l'unité de GPL. [3]

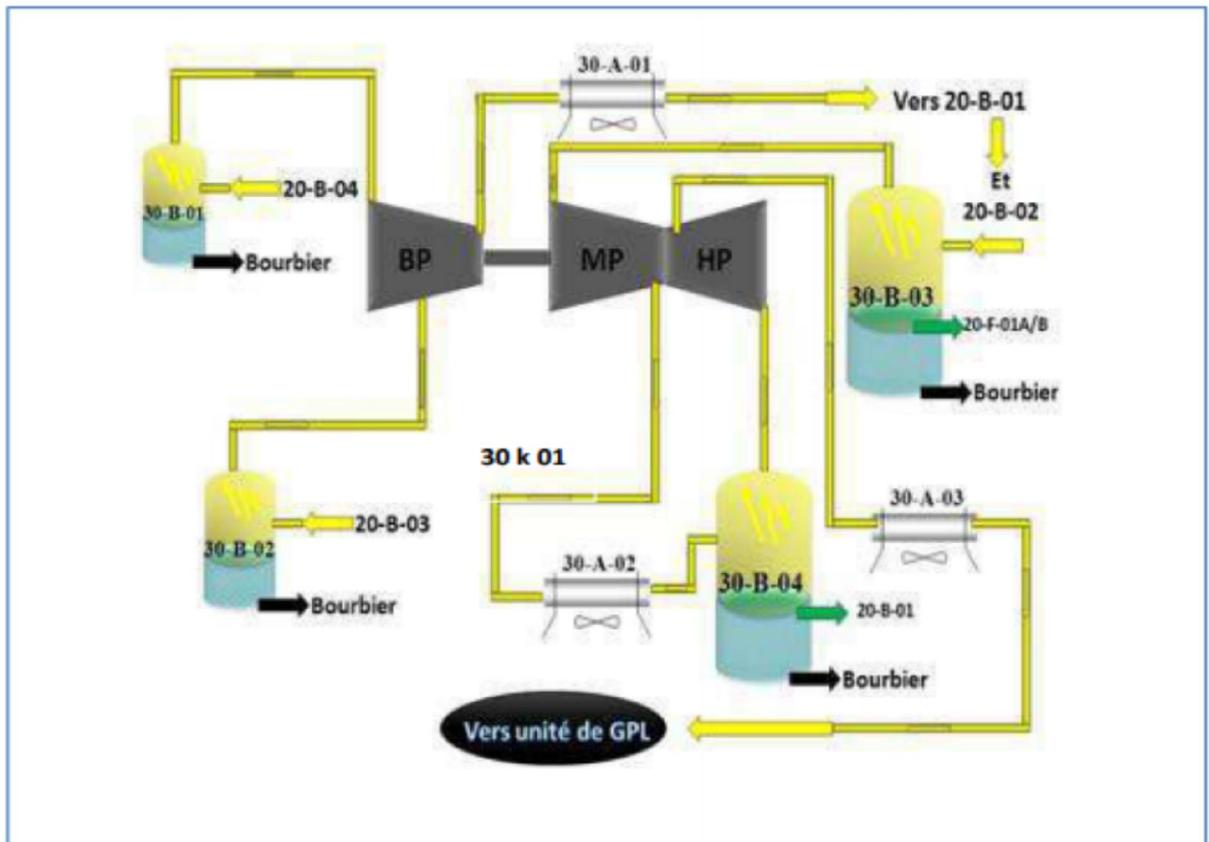


Figure I.5 : Unité de compression (Unité 30)

### I.4.3 Unité d'extraction GPL :

Les installations d'extraction sont implantées à proximité de l'unité de compression existante.

Le complexe est formé de six unités de procédés et de quatre unités auxiliaires, comme indiqué ci-dessous [4] :

- Unité 100 : section de déshydratation du gaz.
- Unité 200 : section de refroidissement et de détente.
- Unité 300 : compression du gaz traité.
- Unité 400 : section de stabilisation et fractionnement du GPL.
- Unité 500 : stockage et expédition du GPL.

- Unité 600 : système de circulation d'huile chaude.
- Unité 700 : système méthanol.
- Unité 800 : système air et gaz inerte.
- Unité 900 : réseau torche.
- Distribution gaz combustible.

### **1. Unité 100-pré refroidissement et déshydrations :**

Le but de cette unité est de sécher le gaz de procédé et de contrôler la pression et la température à l'entrée. [5]

### **2. Unité 200- Récupération du GPL :**

Le but de cette unité est de liquéfier une partie du gaz par le refroidissement à expansion au moyen de turbo expander. [5]

### **3. Unité 300- Compression :**

Le but de cette unité est de comprimer le gaz traité jusqu'à la pression de refoulement (~80 bars environ), de le refroidir à une température inférieure à 60°C et enfin de l'envoyer au gazoduc, à ATK. [5]

### **4. Unité 400- Fractionnement du GPL :**

Le but de cette unité est d'enlever le méthane et l'éthane absorbés dans le liquide condensé dans l'unité 200 et de fractionner le liquide ainsi épuré en GPL et condensat. [5]

### **5. Unité 500- Stockage du GPL :**

Cette unité est composée de deux sphères d'une capacité de 500 m<sup>3</sup> et de trois pompes d'expédition de GPL. Les deux pompes peuvent expédier la production du jour et la troisième étant en réserve. [5]

### **6. Unité 600- Huile diathermique :**

Cette unité a le but de chauffer et de faire circuler l'huile diathermique pour fournir la chaleur de l'huile est fournir par la récupération sur le gaz de décharge de la turbine 30-KT-01 et l'utilisation du four 60-F-01. [4]

### 7. Unité 700- système méthanol :

Le méthanol est stocké dans le réservoir 70B01. Il est injecté dans le processus par le billet des pompes 70P01A/B en cas de formation d'hydrate. [4]

### 8. Unité 800- air et gaz inerte :

Cette unité fournie à l'installation [4] :

- L'air de service (pour le nettoyage).
- L'air instrument (pour le fonctionnement des vannes de contrôle).
- Le gaz inerte « l'azote » (pour le refroidissement).

### 9. Unité 900 :

Une sous-station électrique couvre les besoins électriques de l'installation. [5]

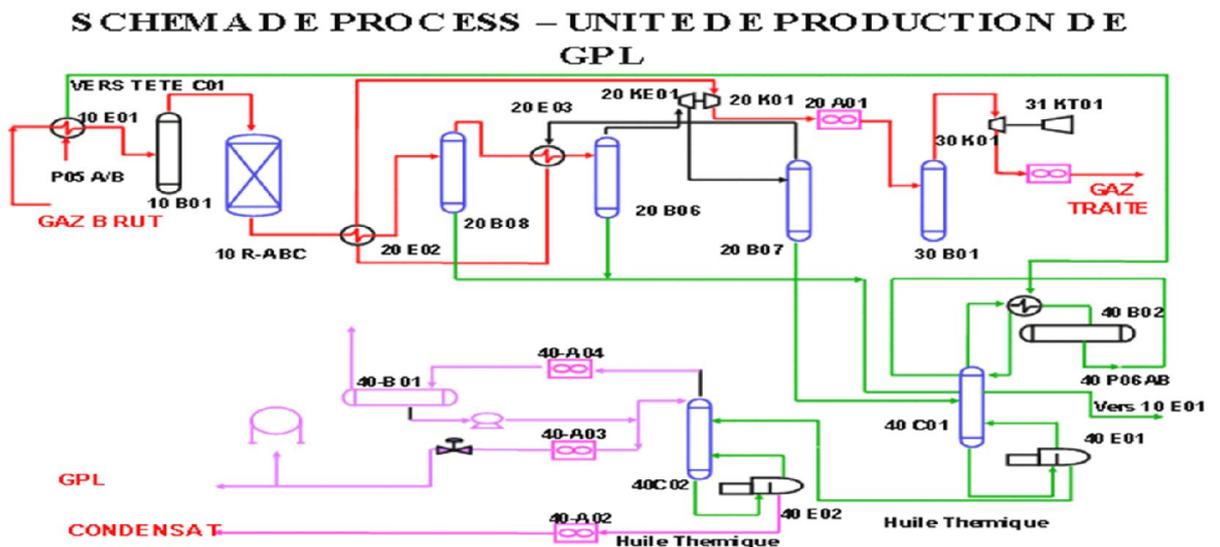


Figure I.6 : Unité de traitement de GPL

### I.5 Département de maintenance :

Les activités de département de la maintenance ont pour mission, d'accomplir toutes les tâches nécessaires pour que les équipements soient maintenus ou rétablis en bon état et ceci afin de :

- Permettre une exécution normale des opérations dans les meilleures conditions, de sécurité, de qualité et du coût (c'est le cas de production).

- La planification, le développement, l'organisation et la mise en œuvre des services techniques opérationnels et d'intervention sur toutes les installations et les centres de traitement d'huile et gaz.
- Obtenir un service dans les meilleures conditions de confort et de coût. Pour remplir cette mission il faut :
  - Dépanner les machines et le matériel dans les meilleurs délais et au meilleur coût.
  - Réparer, réviser rénover et maintenir en état les machines et le matériel.

Le département de maintenance est doté de quatre services principaux qui sont [3] :

### **I.5.1 Service Planning & Méthodes :**

Le service des méthodes est l'interface de communication avec les autres services, Il est composé de trois filières (Mécanique, Instrumentation, et électricité) qui assure :

- La préparation et la planification des travaux pour révision des installations.
- Les procédures des rapports et l'évaluation des opérations.
- Le lancement des requêtes d'approvisionnement en pièces de rechange.
- La synthèse des rapports du département de maintenance (mensuelle et annuelle).
- Le suivi des dossiers de la réparation technique que ce soit interne ou bien externe.
- Le suivie des opérations du service en utilisant un logiciel DATA STREAM 7I.

### **I.5.2 Service électricité :**

Ce service se compose d'une équipe d'intervention qui s'occupe du suivi et de l'intervention et réparation sur les équipements et machines électriques, tel que les Batteries, Moteurs électrique, éclairages industrielles, ...

### **I.5.3 Service Mécanique :**

Le service mécanique assure les inspections, les révisions, et les réparations de tout équipement tournent (Pompes. Compresseurs, Aéro-ventilateur, Turbines...) soit sur site ou

dans l'atelier si nécessaire, et des équipements statiques (échangeurs, filtre, séparateurs, vannes, etc....).

#### **I.5.4 Service Instrumentation :**

Le service instrumentation est divisé en deux sections :

##### **A) Section Régulation et instrumentation :**

Elle s'occupe de la maintenance préventive et curative, et contrôle de différents équipements et instruments des systèmes asservis de l'unité comme DCS (Distributed Control Système) et télémétrie, réparation des équipements électronique, et SCADA.

##### **B) Section Télécommunication :**

Elle assure les travaux suivants :

- Installation des postes radio téléphoniques fixes ainsi que les postes mobiles de toute la direction d'OUED NOUMER.
- Gestion et entretien du réseau téléphonique.

#### **I.6 Département production :**

Elle a pour objectif, la planification, le développement, l'organisation et la mise en œuvre des services techniques opérationnels et l'intervention sur toutes les installations des puits et le centre de traitement d'huile, réalisation des programmes de production, de traitement et d'injection des hydrocarbures établis par la direction. [3]

#### **I.7 Département Logistique :**

Elle a pour objectif, la réalisation des travaux de génie civil, l'entretien de tous les locaux et logements, électricité bâtiment, plomberie, menuiserie, transport, approvisionnement, le développement, l'organisation et la mise en disposition des matériels des équipements, outillage de construction et de gros engins. [3]

**I.8 Cellule travaux neufs :**

Elle a comme mission la planification, le développement, l'organisation et la mise en œuvre d'une capacité de construction pétrolière répondant aux besoins de développement du champ d'OUED NOUMER. [3]

**I.9 Cellule informatique :**

Elle a pour objectif, la gestion, le développement et la maintenance de l'outil informatique dans toute la région. [3]

**I.10 Service sécurité :**

Elle a pour but, le contrôle, l'organisation et le maintien d'un haut niveau de sécurité du personnel et des biens de l'entreprise, le développement de la sécurité est la principale tâche de la division sécurité. [3]

**I.11 Service gestion & paie :**

Son rôle est l'organisation et le contrôle des activités de la région du côté recrutement, formation, gestion du personnel, prestations sociales, activités culturelles et administration générale. [3]

**I.12 Service Finance :**

Son rôle est la prestation des services de trésorerie, de comptabilité générale et de gestion. [3]

**I.13 Service intendance :**

Sa tâche principale est la prestation de service de restauration, l'hébergement et la gestion des patrimoines. [3]

**I.14 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons donné une description générale sur le centre de production d'Oued Noumer SONATRACH. Nous avons visé au cours de notre stage l'unité de compression ou il y a une turbine à gaz MS5002b ; la machine de notre étude.

## Chapitre II : Description de la TAG MS5002b

La turbine à gaz est un moteur à combustion interne de tous les points de vue, elle peut être considérée comme un système autosuffisant ; en effet, elle prend et comprime l'air atmosphérique dans son propre compresseur, augmente la puissance énergétique de l'air dans sa chambre de combustion et convertit cette puissance en énergie mécanique utile pendant les processus de détente qui a lieu dans la section turbine. L'énergie mécanique qui en résulte est transmise par l'intermédiaire d'un accouplement à une machine réceptrice, qui produit la puissance utile pour le processus industriel.

Sous sa forme la plus simple une turbine à gaz comprend un compresseur axial qui aspire l'air à la pression atmosphérique ; une chambre de combustion, où l'air comprimé est réchauffé à pression constante par la combustion d'une certaine quantité de combustible (gaz naturel, gasoil ou kérosène) et en fin une turbine de détente des gaz jusqu'à la pression atmosphérique.

Une turbine à gaz se définit par :

- Son type à un arbre ou à deux arbres ;
- Par sa machine à entraîner fixe ou mobile ;
- Par la nature de son cycle thermique, simple ou avec récupération.

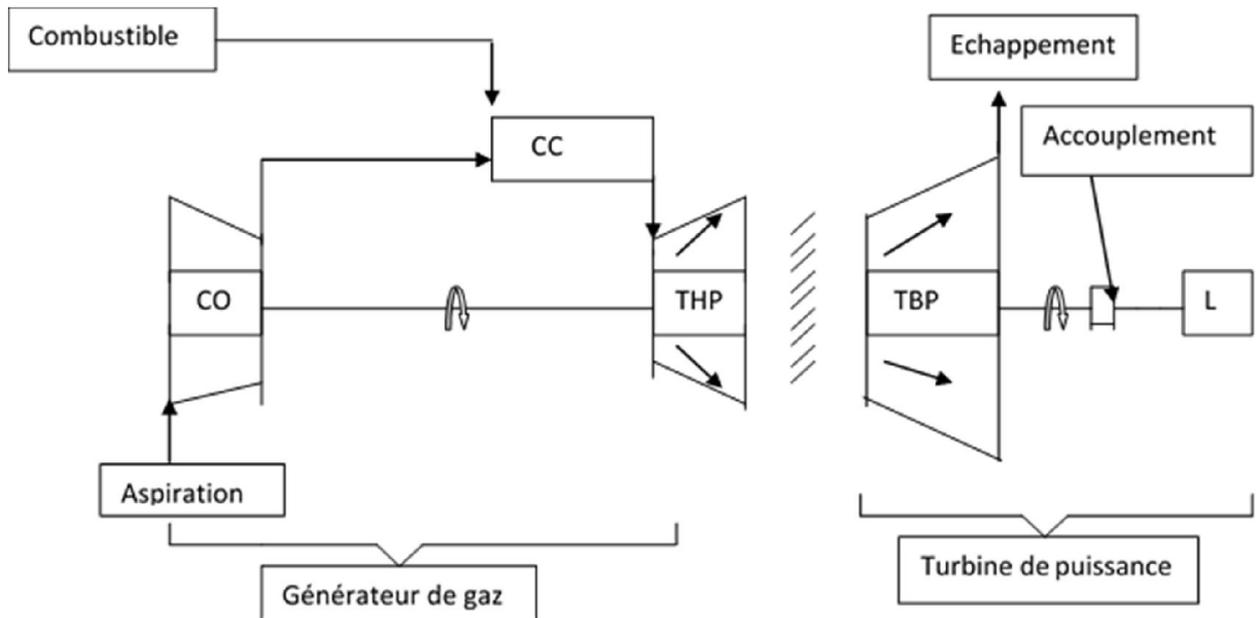
De nos jours la turbine à gaz connaît une large utilisation et dans différents domaines et en particulier dans le domaine des hydrocarbures à cause de leur grande gamme de puissance et leurs propres avantages.

Dans notre site d'accueil (ONR) utilise les turbines à gaz de type MS5002b, qui sont des turbines à deux arbres fabriquées par NUOVO PIGUONE.

### II.1 Les composantes de la turbine à gaz MS5002b :

Généralement la turbine à gaz est constituée par un filtre d'entrée d'air, un compresseur, une chambre de combustion et une turbine de détente puis un système d'échappement.

La TAG MS5002b est de type bi-arbre veut dire à deux arbres un arbre accorde mécaniquement une turbine de haute pression appelée THP avec le compresseur axial dans une partie de la turbine ; l'énergie résultante de la combustion est traitée par la deuxième turbine de basse pression TBP qui est séparée mécaniquement de la première.



**Figure II.1 :** Schéma de la turbine à gaz à deux arbres

### II.1.1 Sections principales de la turbine à gaz MS 5002b :

La TAG MS5002b se compose essentiellement de trois sections principales :

- Section de compression.
- Système de combustion (ensemble des chambres de combustion).
- Section turbine (HP et BP).

#### II.1.1.1 Section compression :

Le compresseur à écoulement axial est formé de rotor de compresseur et d'un carter qui inclut des directrices de sortie.

Dans le compresseur, l'air est confiné dans l'espace entre le rotor et les aubages du stator où il est comprimé dans 16 étages par une série de rotations alternatives du rotor et des aubes stationnaires fixes du stator, les aubes motrices assurent la force nécessaire pour la compression d'air à chaque étage et les aubes fixes guident l'air de manière qu'il entre dans l'étage suivant du rotor à l'angle adéquat. L'air qui est comprimé de 6 à 7 bars sort par le carter de refoulement du compresseur entre le revêtement de combustion et les chambres de

combustion. L'air est extrait du 10ème étage du compresseur pour le refroidissement de la turbine et pour l'étanchement de l'huile de graissage du palier. [7], [8]

Le compresseur axial est composé des éléments suivants [9] :

#### **A. Rotor du compresseur :**

Le rotor du compresseur est un assemblage composé de seize roues, d'un demi arbre, de tirants et des aubes du rotor du compresseur. Chaque roue comporte des rainures brochées dans lesquelles s'insèrent les aubes et sont maintenues en place dans le sens axial par des entretoises, elles même bloquées à chaque extrémité des rainures.

#### **B. Stator de compresseur :**

Le stator de compresseur comprend ces sections principales :

- Le corps coté aspiration de compresseur (corps d'admission).
- Le corps parie avant de compresseur.
- Le corps parie arrière de compresseur.
- Le corps de compresseur coté refoulement.

#### **B.1 Le corps coté aspiration de compresseur (corps d'admission) :**

La section d'admission a pour fonction de diriger l'air ambiant de manière uniforme dans le compresseur, elle abrite le palier N°1 ainsi que l'aubage directeur d'admission (IGV : Inlet Guide Vanes) qui est actionné par le système d'huile hydraulique.

En variant l'angle des IGV, le débit d'air peut être dirigé vers la première rangée d'ailettes du compresseur et cela avec des débits d'air variables.

Les IGV permettent à la turbine d'accélérer rapidement et en douceur sans pompage du compresseur évitant les pulsations qui sont dues à l'inversion du flux d'air à l'entrée du compresseur qui peuvent provoquer des détériorations de la turbine.

Au démarrage les IGV sont complètement fermées, 44° pour un apport minimal d'air de purge, quant au système de soutirage du 10ème étage il est ouvert. Ensuite elles commencent à s'ouvrir pour réguler le débit d'air selon les besoins de la turbine (à 95% de la vitesse du compresseur).

La section d'admission comprend les éléments principaux suivants : filtre d'admission, conduite, silencieux, coude, caisson d'admission et accessoires. L'air entre dans le filtre, traverse la conduite, le silencieux, le coude et le caisson d'admission et enfin le compresseur.

### **B.2 Le corps partie avant de compresseur :**

Le corps avant du compresseur contient les dix premiers étages du stator du compresseur (numérotés de zéro à neuf). Il transfère également les charges structurales du corps adjacent au support avant, qui est boulonné et maintenu par une cheville à la bride avant du corps. Le corps avant du compresseur est équipé de deux gros tourillons, fondus dans la masse, utilisés pour le levage de la turbine à gaz de son socle.

Les aubes du stator situées dans l'avant du compresseur sont montées des segments demi-circulaires rainurés.

L'ensemble aubes et segments du stator sont alors montés dans des rainures, usinées dans la paroi du corps d'admission.

Une longue clavette de blocage, montée dans une rainure usinée dans une bride de raccordement horizontale de la moitié inférieure du corps, empêche ces ensembles de tourner dans les rainures du stator.

### **B.3 Le corps partie arrière de compresseur :**

Contient les derniers étages du stator, les orifices d'extraction prévus dans ce corps permettent de prélever l'air au niveau du 10<sup>ème</sup> étage du compresseur. Cet air est employé pour refroidir et également assurer des fonctions d'étanchéité et contrôler les pulsations au démarrage et à l'arrêt.

### **B.4 Le corps de compresseur coté refoulement :**

Le corps de refoulement du compresseur constitue la partie finale du compresseur, c'est le corps le plus long.

Il a pour fonction d'équilibrer les pompages du compresseur, de former les parois interne et externe du diffuseur, de relier le compresseur aux stators de la turbine et sert également de support à la tuyère de la turbine de première étage. Le corps de refoulement du compresseur contient les six derniers étages (de dix à quinze).

Il abrite aussi le palier N°2. A la sortie du compresseur la vitesse de l'air est trop élevée pour une combustion optimale. Pour cela l'enveloppe inclut un diffuseur qui va diminuer progressivement la vitesse de l'air. Le diffuseur inclut des ailettes fixes EGV (Exit Guide Vanes) pour diriger le flux d'air vers les chambres de combustion.

Le rôle du compresseur axial se résume essentiellement à assurer l'alimentation des chambres de combustion avec l'air comprimé, pour l'opération de combustion et assurer un débit et une pression aussi élevés pour avoir une grande puissance utile.



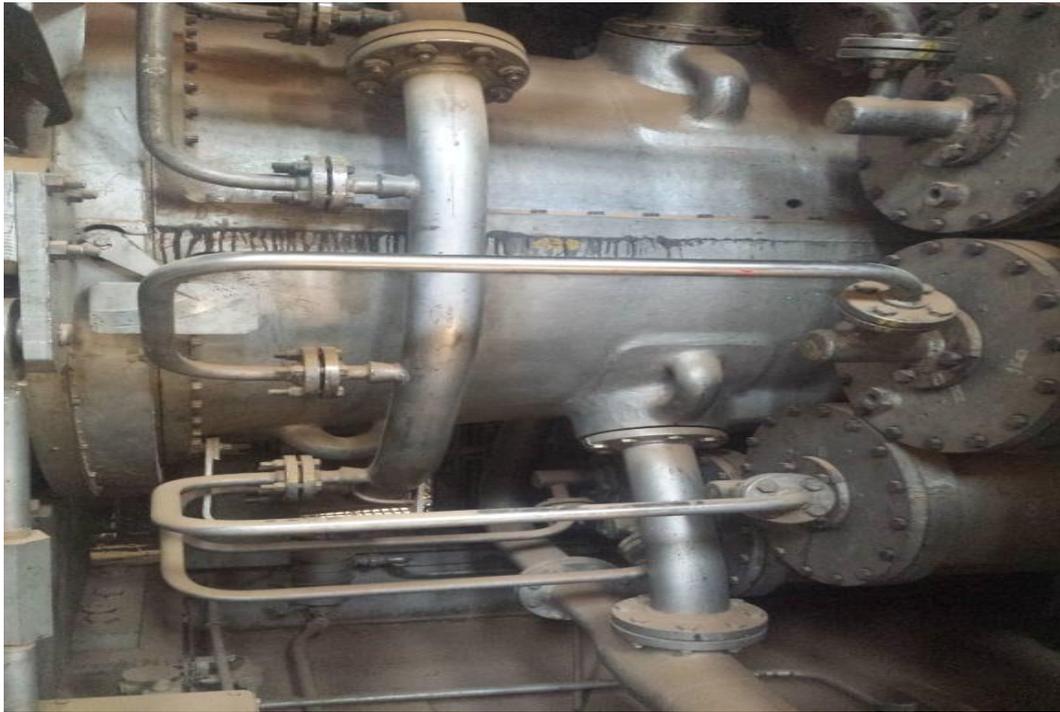
**Figure II.2** : Corps de compresseur axial de la TAG Ms5002b

### **II.1.1.2 Section combustion :**

La section combustion comporte les éléments suivants :

- L'enveloppe des chambres de combustion.
- 12 carters externes de combustion.
- 12 ensembles chapeau et chemise de combustion (Tube a flamme).
- 12 ensembles de pièces de transmission.
- 12 injecteurs de combustible.
- 02 bougies d'allumage installées dans les chambres N° (1 et 12).
- 04 détecteurs de flamme installées dans les chambres N° (3 et 10).
- 12 tubes d'interconnexion.

- Divers joints et pièces de visserie.



**Figure II.3** : Section de combustion vue externe

L'enveloppe de combustion recouvre les chambres de combustion et les pièces de transition. Elle reçoit l'air à partir du compresseur axial et le transmet aux chambres de combustion.

Le combustible est envoyé dans chaque chemise des chambres de combustion par un injecteur de combustible monté dans le couvercle de la chambre de combustion et pénétrant le chapeau du tube de flamme. La combustion du mélange air-gaz est déclenchée par la bougie.

Lorsque l'allumage se produit dans l'une des deux chambres, les gaz chauds de combustion passent dans les tubes d'interconnexion et allument le mélange air-gaz des autres chambres.

Les tubes d'interconnexion relient les douze chambres de combustion entre elles et permettent à la flamme de la chambre allumée de se propager aux chambres non allumées qui se trouvent d'un côté ou de l'autre.

Les pièces de transition relient les chambres de combustion à l'ensemble de tuyère de premier étage. Les gaz chauds qui résultent de la combustion sont dirigés vers l'ensemble de tuyère de premier étage via les pièces de transition.

Le rôle de la chambre de combustion est de fournir la quantité de chaleur nécessaire pour le cycle de la turbine à gaz. Les formes cylindriques des chambres de combustion sont étudiées pour remplir les conditions suivantes :

- La durée de vie la plus longue possible.
- Avoir un encombrement minimal.
- Garantir un bon allumage et la stabilité de la flamme.
- Assurer la combustion la plus complète possible.
- Eviter le dépôt de carbone sur les brûleurs et les parois ainsi que les fumées.
- Réduire les pertes de charges. [8,9]



**Figure II.4 :** Les tubes à flamme de la TAG Ms5002b

### **II.1.1.3 Section turbine :**

La section turbine est la partie où les gaz chauds venant de la section combustion sont convertis en énergie mécanique. Cette section comprend les éléments suivants [8] [9] :

- Corps de turbine.
- La directrice fixe de premier étage.
- Roue de turbine 1ère étage (roue HP).
- La directrice à aubes variables de deuxième étage.
- Roue de turbine 2ème étage (roue BP).
- Le diaphragme.

### A. Corps de la turbine :

C'est l'élément structurel principal de la turbine car il contient tous les organes qui constituent la voie d'écoulement des gaz depuis les chambres de combustion à travers les roues jusqu'à l'échappement. [9]

### B. La directrice fixe de premier étage :

Elle se compose de segments montés dans une bague de retenue, soutenue dans la veine des gaz par un dispositif de fixation du carter de la turbine. L'air de refoulement du compresseur en provenance du carter des chambres de combustion passe autour de la bague de retenue, puis dans les parois percées de la directrice et sort enfin par les trous de purge de la veine des gaz d'échappement. Ce flux d'air sert à refroidir les profils de la directrice. [3]



Figure II.5 : La Directrice fixe de premier étage

### C. La directrice à aubes variables de deuxième étage [6] :

Elle se compose de séparations (déflecteurs) qui forment une directrice à angle variable avec la directrice d'écoulement des gaz dans la section annulaire juste avant le deuxième étage de la turbine BP. On peut donner une rotation grâce à des axes qui dépassent des manchons prévus dans le corps de la turbine. Les leviers clavetés à l'extrémité de ces axes et sont reliés par des biellettes à des points de la couronne de contrôle qui sont actionnés par un piston hydraulique.

### D. Les deux Roues de la turbine :

La roue de turbine HP qui entraîne le compresseur axial et qui est directement boulonnée sur le demi arbre arrière du rotor du compresseur de manière à former un rotor haute pression. Ce rotor HP est soutenu par deux paliers N°1 et 2

La roue de turbine BP qui entraîne la charge (compresseur centrifuge) et qui est directement boulonnée sur un arbre pour former le rotor de turbine basse pression. Ce rotor BP est soutenu par deux paliers N°3 et 4

Les deux roues sont positionnées en ligne dans la turbine, mais sont mécaniquement indépendantes l'une de l'autre. Elles ont des aubes à queues longues coulées avec précision, et sont refroidies par l'air extrait du 10ème étage et par l'air de fuite d'étanchéité HP. Le volume de gaz augmente quand sa pression diminue en traversant la roue de turbine HP. Pour cela les pâles ou ailettes de la roue BP sont plus grandes que celles de la roue HP.

Cette section comprend aussi le diaphragme et l'étanchéité air et la veine des gaz entre les divers étages pour faciliter l'entretien, toutes les pièces du stator peuvent être fondues en deux dans le sens horizontal. [9]



**Figure II.6 :** La roue HP de premier étage



**Figure II.7 :** La roue BP de deuxième étage

### **II.1.2 Socle des auxiliaires :**

Le socle pour les auxiliaires est une structure d'acier qui est prévue pour monter (soit dessus, soit à l'intérieur) tous les auxiliaires et les équipements qui ne sont pas immédiatement connectés avec la turbine elle-même [9] :

- Réservoir d'huile de 8500 L monté à l'intérieur de la structure en mécano-soudé avec poutrelles.
- Réducteur d'entraînement des auxiliaires avec pompe de graissage principale et pompe hydraulique, plus vireur hydraulique.
- Turbine à gaz à expansion et son embrayage.
- Double filtre à huile de graissage monté sur le réservoir d'huile.
- Pompe de graissage des auxiliaires et de secours.
- Pompe hydraulique des auxiliaires et pompe pour le vireur hydraulique.
- Double filtre à huile de graissage pour l'accouplement.
- Ensemble combine vanne-arrêt / régulation et vanne de contrôle du fuel gaz.
- Armoire de jauge, vannes et interrupteurs.

### **II.1.3 Compartiment des auxiliaires :**

Il est situé à l'avant du caisson d'aspiration d'air, et comprend tous les auxiliaires nécessaires au fonctionnement indépendant de la turbine [9] :

#### **II.1.3.1 Tableau des manomètres :**

C'est un panneau vertical situé au bout de compartiment des auxiliaires et regroupe un certain nombre de manomètres permettant de contrôler la pression des fluides depuis le compartiment contrôle.

#### **II.1.3.2 Turbine de lancement :**

Il sert à entraîner l'engrenage des accessoires et le rotor haute pression de la turbine à une vitesse bien déterminée.

#### **II.1.3.3 Convertisseur de couple :**

C'est un élément qui convertit le couple donné par la turbine de lancement pour pouvoir tourner l'arbre de la turbine, il est muni d'une pompe à huile entraînée par la turbine de lancement.

#### **II.1.3.4 Embrayage de lancement :**

Un embrayage de démarrage connecte l'arbre de sortie de l'ensemble de convertisseur de couple à l'arbre principal de réducteur auxiliaire de vitesse. L'embrayage est engagé par les cylindres hydrauliques et il est désactivé par des ressorts de retour dans les cylindres.

#### **II.1.3.5 Réducteur :**

C'est un ensemble de roues dentées actionné directement par le rotor de la turbine et il est utilisé pour entraîner les divers auxiliaires. Le réducteur auxiliaire qui est placé sur le socle des auxiliaires, comprend le train d'engrenages nécessaires à permettre une réduction de vitesse pour mener les systèmes auxiliaires aux vitesses désirées, le déclencheur de survitesse de la turbine haute pression est monté sur l'extérieur du corps qui peut mécaniquement déverser l'huile dans le circuit de déclenchement, ce qui provoque l'arrêt de la turbine à gaz lorsque la vitesse du premier étage de la turbine excède les limites prescrites dans les spécifications de contrôle.

Les accessoires entraînés par le réducteur auxiliaire, comprennent la pompe hydraulique principale ainsi que la pompe à huile de graissage principale.

Pendant le démarrage, le réducteur transmet le couple communiqué par la turbine de lancement à expansion vers la turbine à gaz.

#### **II.1.3.6 Accouplement :**

Les fonctions de base des accouplements élastiques du type à dentures utilisé sur cette turbine sont :

- Relier deux arbres en rotation, de manière à transmettre le couple de l'un à l'autre.
- Compenser les trois types des alignements (parallèles, angulaires et la combinaison des deux.
- Compenser tout mouvement axial des arbres, de manière qu'aucun des deux n'exerce une poussée excessive sur l'autre.

Les accouplements utilisés sur cette turbine sont destinés à accoupler le réducteur des auxiliaires à l'arbre de la turbine et l'arbre de la turbine à l'équipement de puissance.

### **II.1.3.7 Vireur Hydraulique :**

C'est une motopompe pour aider la turbine de lancement pendant le moment de démarrage. Pour éviter la flèche de l'arbre turbine il fait tourner l'ensemble de 1/4 de tour chaque trois mn.

Le vireur est utilisé pour le positionnement de la ligne d'arbre.

### **II.1.4 Partie Auxiliaire :**

#### **II.1.4.1 Section d'échappement :**

La section échappement se compose essentiellement du plenum ou cadre d'échappement ainsi que le caisson d'échappement.

##### **– Plenum d'échappement :**

C'est une structure rectangulaire en forme de boîte dans laquelle les gaz d'échappement de la turbine sont évacués avant d'être conduits aux silencieux et ensuite libérés dans l'atmosphère. Situé à l'extrémité arrière de la base de la turbine il loge le châssis d'échappement, le diffuseur et les aubes de la turbine. Il supporte aussi les paliers N° 3 et 4, la tuyauterie d'alimentation et de retour d'huile et la tuyauterie d'air de refroidissement et d'étanchéité. En service les gaz d'échappement prévenants de la turbine sont déchargés dans le diffuseur et passent à travers des aubes qui dirigent ces gaz vers la bêche d'échappement. [10]

##### **– Caisson d'échappement :**

C'est une structure rectangulaire en forme de boîte dans laquelle les gaz d'échappement de la turbine sont déchargés puis libérés vers atmosphère. Il comporte le cadre d'échappement et les silencieux. Le plenum et le caisson d'échappement sont reliés par des joints de dilatation. La conception de l'échappement est devenue assez complexe afin de minimiser le bruit au maximum. La cheminée doit être assez élevée pour permettre un refroidissement progressif des fumées et le dégagement de celle-ci dans des endroits sécurisés. [10]

#### **II.1.4.2 Paliers :**

La turbine à gaz possède quatre paliers portants principaux de type à patins oscillant qui supportent le rotor du compresseur axial et celui de la turbine ainsi qu'un palier de butée prévus pour supporter les charges de poussée engendrées sur les surfaces rétorques de la turbine à gaz :

- Palier N°1 : se trouve dans le corps d'admission du compresseur axial.
- Palier N°2 : se trouve dans le corps de refoulement du compresseur axial.
- Paliers N°3 et 4 : supportent le rotor de turbine BP. [9]

## **II.2 Les systèmes principaux de la turbine :**

Il existe plusieurs systèmes qui assurent le bon fonctionnement de la turbine :

### **II.2.1 Système d'admission :**

Les turbines à gaz consomment une grande quantité d'air pour la combustion et le refroidissement des pièces internes. Cet air doit être filtré pour éviter la pénétration de particules qui peuvent avec le temps éroder les ailettes des rotors et stators du compresseur d'air et entraîner des pertes de performances dues aux pertes de charge au niveau du compresseur axial.

Les particules de saleté peuvent aussi colmater les orifices et passages de l'air utilisé pour le refroidissement des différentes pièces de la turbine. L'aspiration de la turbine est une enceinte ou compartiment qui abrite les filtres et relié au caisson d'admission de la turbine.

Ce compartiment est muni de portes permettant un accès facile aux filtres pour les besoins de maintenance. [9]

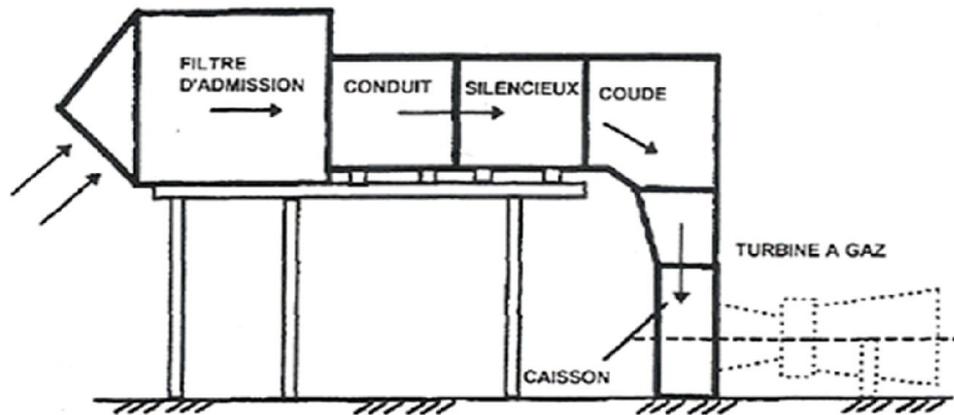


Figure II.8 : Schéma de système d'admission de la TAG

### II.2.2 Système de démarrage :

Pendant la séquence de démarrage, la turbine à gaz est entraînée par une turbine à détente dite de lancement à une roue ; alimenté par du gaz naturel à une pression entre 15 et 20 bar, elle fait accélérer le rotor haute pression de la turbine depuis l'arrêt jusqu'à 22% de sa vitesse nominale pendant trois minutes, à ce moment en assurant le cycle de purge de compresseur axiale. A 32% de la vitesse nominale en assurant l'allumage, puis contribue à l'accélération jusqu'au désaccouplement à 62% de sa vitesse nominale et elle devient autonome. [7]

### II.2.3 Système de graissage :

La lubrification de la turbine est assurée par un système d'huile sous pression en boucle fermée comprenant, un réservoir d'huile, des pompes, des régénérateurs (réfrigérateurs d'huile), des filtres, valves et des divers dispositifs qui assurent la commande et la protection du système.

L'huile de lubrification du système est envoyée aux quatre paliers principaux de la turbine, les accessoires de la turbine et l'équipement de charge entraîné. [7,8]

Capacité du réservoir .....8500L.

Pression du collecteur des palier..... 1.73 bar.

Soupape régulatrice de pression..... VPR2. [10]

Le système de graissage est équipé de trois pompes :

- **Pompe principale :**

C'est une pompe volumétrique montée et entraînée par réducteur auxiliaire. Elle pompe l'huile de graissage de réservoir vers différents points de graissage de l'installation durant la marche normale. [9]

– **Caractéristiques:**

Rendement nominale.....2500L/min.

Pression de refoulement.....8.5 bar. [10]

• **Pompe auxiliaire :**

La pompe auxiliaire pour l'huile de graissage est du type vertical à un seul étage et une seule aspiration, fonctionnant en centrifuge et entraînée par un moteur a courant alternatif.

Elle sert à fournir la pression d'huile lors du lancement et de la mise à l'arrêt de la turbine, alors que la pompe principale ne fournit pas une pression suffisante pour la sécurité du fonctionnement à des vitesses inférieures à 80 % de la vitesse nominale de la turbine. [7]

– **Caractéristiques :**

Pression de refoulement.....8.5 bar.

Puissance nominale moteur.....85 KW, 2900t/min, 380 v, 50Hz.

Rendement.....2500L/min [10]

• **Pompe de secours :**

La pompe de secours pour l'huile de graissage est également une pompe du type verticale, submergé, à un seul étage et à une seule section, cette pompe centrifuge fonctionne en cas ou la pompe auxiliaire a été forcée hors service ou elle est incapable de maintenir la pression adéquate de l'huile de graissage : toute fois, elle est entraînée par un moteur a courant continue. [7,11]

– **Caractéristiques:**

Rendement nominale.....1600L/min.

Pression de refoulement.....1.41 bar.

Puissance nominale moteur.....6.6 KW, 2000t/min ; 110v cc. [10]

## II.2.4 Système d'air de refroidissement et d'étanchéité :

L'air ambiant et l'air d'extraction en provenance du compresseur à flux axial de la turbine servent à refroidir certaines pièces de la turbine et à pressuriser les étanchéités des paliers. L'air d'extraction se compose de l'air de fuite des joints d'air haute pression du compresseur, de l'air de refoulement du compresseur et de l'air d'extraction du dixième étage de compression.

Les éléments refroidis sont les suivants :

- Roues de premier et deuxième étage.
- Ensemble de la directrice de premier étage.
- Carter du rotor de la turbine.
- Support du cadre d'échappement.
- Les tubes de flamme des chambres de combustible. [8]

**II.2.5 Système de gaz combustible :** Le rôle de ce système est d'assurer l'alimentation des chambres de combustion par le combustible (le gaz naturel pour le cas de la turbine étudiée), avec la pression et le débit appropriés pour satisfaire à toutes les exigences de lancement.

Le gaz doit arriver à la turbine sous pression, après filtrage, à travers deux vannes situées en série : la vanne arrêt/détente SRV et la vanne de contrôle du combustible GCV (SRV servo commande la vanne SRV et GSV servo commande la vanne GCV). Le combustible, parfaitement dosé, parvient au brûleur (1 par chambre de combustion) à travers un distributeur annulaire. La vanne arrêt/détente a la double fonction d'arrêter et de régler la pression du gaz en aval (cette vanne étant commandée par le système de protection de la turbine). A cette régulation il faut ajouter celle exercée par la vanne de contrôle du combustible (GCV) laquelle s'ouvre en fonction linéaire par rapport au signal qu'elle reçoit de l'armoire de commande et de contrôle. [11]

### **II.2.6 Système de protection :**

Le système de protection est constitué par un certain nombre de systèmes secondaires et primaires dont certains travaillent à chaque démarrage ou à chaque arrêt. Les autres systèmes et composants sont réservés pour des conditions de marche anormales ou des cas d'urgence demandant l'arrêt de la turbine à gaz.

- **Système de protection de survitesse :**

Lors d'un problème de survitesse un signal est émis par le contrôleur électrique pour arrêter le carburant. Au-delà d'une valeur limite, une sorte de freinage mécanique (arrêt de la machine) est déclenché automatiquement.

La masse de survitesse HP est assemblée dans l'arbre du réducteur des auxiliaires. La masse de survitesse BP est placée dans l'arbre de la turbine seconde étage. [11]

• **Système de protection de dépassement de température :**

Le système de protection de dépassement de température est l'un des systèmes de protection primaires de la turbine à gaz. Le système déclenche une alarme dès que la température dépasse la limite fixée. [9]

• **Système de protection et de détection des vibrations :**

La protection contre les vibrations est généralement assurée par des capteurs de vitesse, deux sur la turbine à gaz, et un sur la charge entraînée. Les transmetteurs de ces capteurs produisent un signal proportionnel à la vitesse de la vibration. Le système de déclenchement est réglé par un point de consigne spécifié par les spécifications de la commande. Au cas où il se produirait un circuit ouvert, un court-circuit ou un point de masse dans l'un des trois canaux indépendants, une alarme est émise, mais le groupe peut rester en marche. Une carte d'étalonnage est fournie afin de régler et de vérifier chaque canal. [7]

• **Système de protection et de détection de flamme :**

Le système sert pour les trois fonctions principales suivantes :

➤ Lorsque la vanne de régulation qui contrôle l'arrivée du combustible pour l'allumage est en fonctionnement et que les circuits d'allumage sont sous tension dans la séquence de démarrage. La vanne d'arrêt de combustible se déclenche si la flamme n'est pas détectée dans le temps réglé du temporisateur d'allumage (généralement 60 secondes). Et les circuits d'allumage ne sont plus sous tension. Cela permet d'éviter un excès de concentration de combustible dans la turbine et dans le système d'échappement pour éviter tout risque d'explosion dans les conduites.

➤ Lorsque la flamme est établie et détectée au moment de l'allumage dans la séquence de démarrage, la détection de la flamme est utilisée pour commander d'autres phases de la séquence de démarrage pour la montée en régime de la turbine.

➤ S'il y a une disparition de flamme après que l'allumage ait été établi, la totalité du débit de combustible à la turbine est immédiatement arrêté pour empêcher le combustible non brûlé de pénétrer dans l'échappement. [9,11]

• **Système de protection contre les pulsations au démarrage et à l'arrêt :**

Le pompage est marqué par la rupture complète de l'écoulement continu à travers le compresseur axial et résulte en larges oscillations de débit avec le temps ce qui ferait des endommagements importants sur les organes mécaniques

La protection contre le pompage est donc une nécessité. Deux modes de protection sont appliquées :

- Débit entrant réglable (variable) : En amont du compresseur axial est placé un étage d'aubes mobiles en rotation (variables), la fermeture de ces aubes permette de limiter le débit d'air admis et cela lors du démarrage, où la vitesse du rotor est encore faible, l'ouverture de ces aubes croît progressivement avec l'accélération de la turbine, jusqu'à atteindre une ouverture complète correspondante au maximum de débit et vitesse de rotation.
- Vanne anti-pompage (VAP) : Un piquage au niveau du 10ème étage du compresseur vers l'atmosphère, sert à évacuer une partie de l'air admis à l'atmosphère afin d'éviter la pulsation du débit (retour de l'écoulement). [11]

Les caractéristiques de pression et de débit du compresseur sont telles qu'elles demandent un équipement spécial et une séquentielle des composants de la turbine pour empêcher le pompage du compresseur au cours de l'accélération pour prendre sa vitesse dans la séquence de démarrage.

La protection contre le pompage est également nécessaire pendant la séquence d'arrêt et de décélération lorsque la turbine est déclenchée et qu'il n'y a plus de flamme dans le système de combustion. Le pompage dans les cycles de décélération et d'accélération est habituel dans les compresseurs à haut rendement.

C'est pourquoi, pour empêcher tout dommage important à la turbine et à son compresseur, les équipements et composants ci-dessous jouent un rôle très important pour empêcher le pompage du compresseur axial :

- Deux vannes d'extraction sont prévues sur le manifold du dixième étage.

- Le compresseur axial est équipé à son admission d'aubage de pré-rotation avec un mécanisme de commande pour la couronne qui entraîne les aubages orientables.
- Les contacteurs de fin de course sur les vannes d'extraction du compresseur.

### II.3 Caractéristiques de la turbine à gaz MS5002b :

- Marque.....Générale Electric
- Fabricant.....NOUVO PIGNONE
- Série de modèle .....MS 5002b
- Application .....Entrainement mécanique
- Cycle.....Simple
- Rotation de l'arbre..... Sens inverse des aiguilles d'une montre
- Type de fonctionnement .....Continu
- Vitesse de l'arbre HP..... 5100 tr/min
- Vitesse de l'arbre BP..... 4670 tr/min
- Commande.....MARK II
- Système de démarrage.....Turbine à détente
- Rendement thermique.....28%

#### ❖ Section Compresseur :

- Nombre d'étages du compresseur axial .....16
- Type du compresseur .....Flux axial, Industriel
- Plan de joint.....Bride horizontale
- Type d'aubes directrices d'entrée .....Variable

#### ❖ Section Turbine :

- Nombre d'étages de turbine .....02
- Plan de joint .....Horizontale
- Directrice du premier étage.....Fixe
- Directrice du deuxième étage.....Variable

#### ❖ Section Combustion :

- Type.....12 multiples foyers, types à flux inverses
- Configuration des chambres.....Concentrique autour du compresseur

- Combustible.....Gaz naturel
- Bougies d'allumage.....Deux, types électrodes à ressort auto rétractile
- Détecteur de flamme.....2, type ultraviolet

❖ **Ensemble paliers :**

- Quantité.....04
- Lubrification.....Sous pression

❖ **Pompe d'huile de graissage :**

- Pompe de graissage.....entraînée par arbre intégral avec le réducteur auxiliaire
- Pompe de graissage auxiliaire.....entraînée par moteur, verticale, centrifuge immergée
- Pompe de graissage de secours.....entraînée par moteur, verticale, centrifuge immergée

## **II.4 Principe de fonctionnement de la turbine à gaz MS5002b d'ONR :**

Grace à une turbine de lancement (démarrage), le rotor de la turbine haute pression HP est lancé à 20 % de sa vitesse nominale. Le compresseur axial aspire l'air de l'atmosphère et le comprime à une pression plus élevée (peut atteindre jusqu'au 6 à 7 bars), ce dernier est refoulé dans les chambres de combustion ou et à l'aide d'une des deux bougies appelées (bougies d'allumage) placées dans les chambres 1 et 12 un apport de combustible permettra de produire un fluide moteur (fuel gaz) à pression constante.

Les gaz chauds ainsi produits se détendent sur deux étages à travers des roues indépendantes mécaniquement, la première roue dite haute pression HP est destinée uniquement à l'entraînement du compresseur d'air et les accessoires attelés à l'arbre tandis que la deuxième roue dite roue BP (Roue de puissance) est reliée à la charge (récepteur) pour s'échapper ensuite dans l'atmosphère, d'où un travail utile est produit pour entraîner les compresseurs centrifuges, à partir du rotor de la roue BP.

## **II.5 Conclusion :**

Depuis les différents types des TAG, notre cas d'étude est la TAG MS5002b, un modèle installé au sein de centre de production de ONR, c'est pour ça on a essayé de donner une description des composants de cette TAG et son principe de fonctionnement.

### **III.1 Introduction :**

La maintenance et la fiabilité jouent un rôle important dans l'industrie. La bonne connaissance d'utiliser ces derniers, permet de développer et optimiser leurs outils ce qui influe positivement sur le rendement des installations (les turbines par exemple) et aussi permet minimiser les coûts direct et indirect de la maintenance.

Ce chapitre c'est un aperçu bibliographique sur les différents théorèmes de maintenance et FMD pour but fixer les taches nécessaires d'améliorer et d'optimiser la durée de vie des turbines à gaz. Il est devisé en deux parties :

La première partie est de la maintenance industrielle ou on trouve par exemple les titres suivants :

- La définition de la maintenance.
- Les types de la maintenance.
- Les opérations de la maintenance.
- Une définition de la méthode ABC.

La deuxième partie est de la fiabilité. Cette partie contient :

- La définition de la fiabilité.
- Les fonctions de probabilité.
- La maintenabilité.
- La disponibilité.

### **III.2 La maintenance industrielle :**

Selon la définition de l'AFNOR, la maintenance vise à maintenir ou à rétablir un bien dans un état spécifié afin que celui-ci soit en mesure d'assurer un service déterminé.

La maintenance regroupe ainsi les actions de dépannage et de réparation, de réglage, de révision, de contrôle et de vérification des équipements matériels (machines, véhicules, objets manufacturés, etc.) ou même immatériels (logiciels). [12]

### III.2.1 Les types de la maintenance :

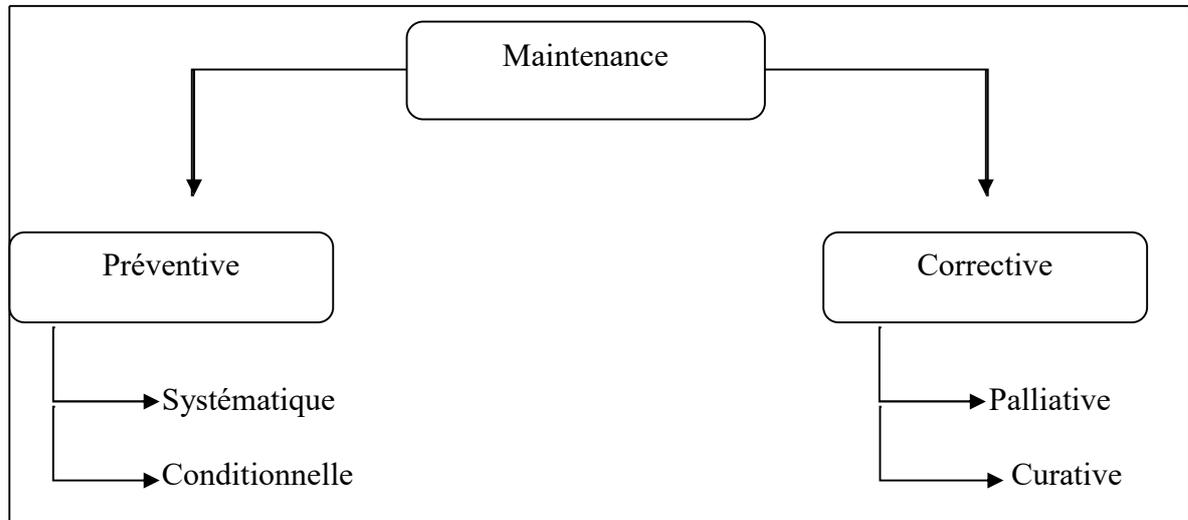


Figure III.1 : Les types de la maintenance

#### III.2.2.1 Maintenance préventive :

Elle vise à diminuer la probabilité de défaillance d'un système, pour cela elle s'appuie sur la maintenance systématique et la maintenance conditionnelle.

La maintenance préventive se divise en deux formes essentielles. [13]

##### A. Maintenance préventive systématique :

C'est la maintenance qui est effectuée selon un échéancier établi en fonction du temps, ou du nombre d'unités d'usage. Elle se pratique quand on souhaite procurer un équipement pour une sécurité de fonctionnement. [13]

##### B. Maintenance préventive conditionnelle :

C'est une maintenance subordonnée à un type d'événement prédéterminé révélateur de l'état de dégradation du bien. Cette forme de maintenance permet d'assurer une surveillance continue des points sensibles de l'équipement au cours des visites préventives dont le rôle est d'éliminer les pannes accidentelles ou de les réduire à un niveau acceptable. [13]

### **III.2.2.2 Maintenance corrective :**

D'après la norme AFNOR X 60-010, c'est une opération de maintenance effectuée après défaillance. [13]

#### **A. Maintenance curative :**

Réparation (donc durable) consistant en une remise en l'état initial. [13]

#### **B. Maintenance palliative :**

Dépannage (donc provisoire) de l'équipement, permettant à celui-ci d'assurer tout ou partie d'une fonction requise ; elle doit toutefois être suivie d'une action curative dans les plus brefs délais. [13]

### **III.2.3 Les opérations de maintenance [14] :**

#### **III.2.3.1 Dépannage :**

C'est une action ou opération de maintenance corrective sur un équipement en panne en vue la remettre en état de fonctionnement.

Cette action de dépannage peut s'accommoder de résultats provisoires et de conditions de réalisation hors règles de procédures, de cout et de qualité, et dans ce cas sera suivie de la réparation.

Souvent les interventions de dépannage sont de courtes durées mais peuvent être nombreuses et n'exigent pas la connaissance du comportement des équipements et des modes de dégradation.

#### **III.2.3.2 Réparation :**

C'est une intervention définitive et limitée de maintenance corrective après panne ou défaillance.

L'équipement réparé doit assurer les performances pour lesquelles il a été conçu.

### **III.2.3.3 Visites :**

Ce sont des opérations de surveillance qui dans le cadre de la maintenance préventive systématique, s'opèrent selon une périodicité prédéterminée.

Ces interventions correspondent à une liste d'opérations définies au préalable qui peuvent entraîner d'organes et une immobilisation du matériel.

### **III.2.3.4 Contrôles :**

Ils correspondent à des vérifications de conformité par rapport à des données préétablies suivies d'un jugement.

Le contrôle peut, comporter une activité d'information, inclure une décision, acceptation, rejet ajournement, déboucher comme les visites sur des opérations de maintenance corrective.

Les opérations de surveillance (inspection, visite, contrôle) sont nécessaires pour maîtriser l'évolution de l'état réel du bien, effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage.

### **III.2.3.5 Révisions :**

Ensemble des actions d'examen, de contrôle des interventions effectuées en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique, pendant un temps ou pour un nombre d'unités d'usage donné.

Il est d'usage de distinguer suivant l'étendue de cette opération les révisions partielles, des révisions générales. Dans les deux cas, cette opération implique la dépose de différents sous-ensembles.

### **III.2.4 Définition de la méthode ABC (Pareto) :**

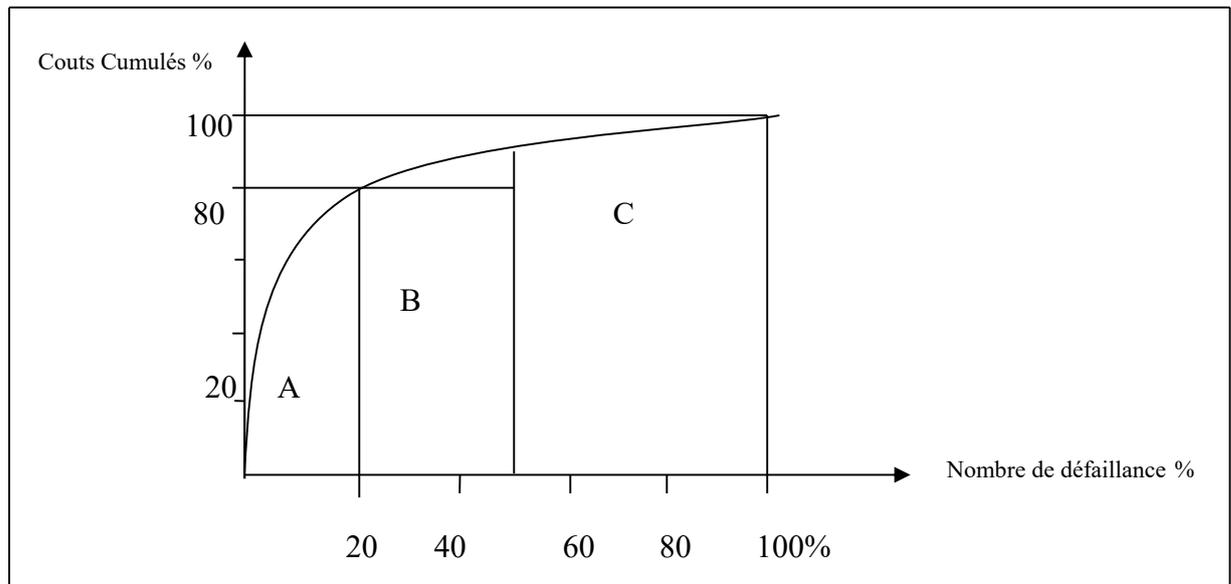
La méthode ABC est un moyen objectif d'analyse, elle permet de classer les éléments qui représentent la fraction la plus importante du caractère étudié, en indiquant les pourcentages pour un caractère déterminé.

La méthode ABC apporte une réponse. Elle permet l'investigation qui met en évidence les éléments les plus importants d'un problème afin de faciliter les choix et les priorités.

On classe les événements (pannes par exemple) par ordre décroissant de coûts (temps d'arrêts, coût financier, nombre, etc.), chaque événement se rapportant à une entité.

On établit en suite un graphique faisant correspondre les pourcentages de coûts cumulés aux pourcentages de types de pannes ou de défaillances cumulés. Sur le schéma (figure III.2), on observe trois zones.

1. Zone A : 20% des pannes occasionnent 80% des coûts.
2. Zone B : les 30% de pannes supplémentaires ne coûtent que 15% supplémentaires.
3. Zone C : les 50% de pannes restantes ne concernent que 5% du coût global. [15]



**Figure III.2 : La Courbe Pareto**

### III.2.5 But de la méthode ABC :

L'exploitation de cette loi permet de

- Déterminer les éléments les plus pénalisants afin d'en diminuer leurs effets
- Diminuer les coûts de maintenance.
- Améliorer la fiabilité des systèmes. Justifier la mise en place d'une politique de

maintenance. [16]

### **III.3 Fiabilité des équipements et FMD :**

#### **III.3.1 Définitions la fiabilité :**

Probabilité qu'une entité puisse accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné  $[t_1, t_2]$  ; que l'on écrit  $R(t_1, t_2)$ .

#### **III.3.2 Objectifs de la fiabilité :**

La fiabilité a pour objectif de :

- Mesurer une garantie dans le temps.
- Evaluer rigoureusement un degré de confiance.
- Déchiffrer une durée de vie.
- Evaluer avec précision un temps de fonctionnement.
- Déterminer la stratégie de l'entretien.
- Choisir le stock.

#### **III.3.3 Les fonctions de probabilité [16] :**

##### **III.3.3.1 La fonction de fiabilité :**

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

La probabilité d'avoir au moins une défaillance avant le temps  $(t)$ , qui représente la probabilité cumulative des défaillances, est appelé : « probabilité de défaillance »

##### **III.3.3.2 Fonction de répartitions :**

C'est la probabilité pour que le dispositif soit en panne à l'instant  $t_i$

$$F(t_i) = P(T < t_i) \quad (\text{III.1})$$

##### **III.3.3.3 Densité de probabilité :**

La densité de probabilité de l'instant de la défaillance  $T$  s'obtient en dérivant la fonction de répartition  $F(t)$  :

$$f(t) = \frac{df(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (\text{III.2})$$

### III.3.3.4 Taux de défaillance :

Probabilité pour qu'une entité perde sa capacité à accomplir une fonction pendant l'intervalle  $[t, t+dt]$ , sachant qu'elle n'a pas été défaillante entre  $[0, t]$ . [16]

### III.3.4 Les courbes de fiabilité :

#### A. La courbe de la loi normale :

Dans la plupart des cas d'usure présente les caractères d'une distribution normale ou gaussienne.

La formule donnant la densité de probabilité de la loi normale s'écrit :

$$P(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (\text{III.3})$$

Où  $T$  : désigne la vie moyenne et  $t$  le temps de fonctionnement accumulé.

$\sigma$  : l'écart type de durée de vie par rapport à la moyenne **Erreur ! Signet non défini.**

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (t - T)^2} \quad (\text{III.4})$$

$n$  : le nombre de pannes

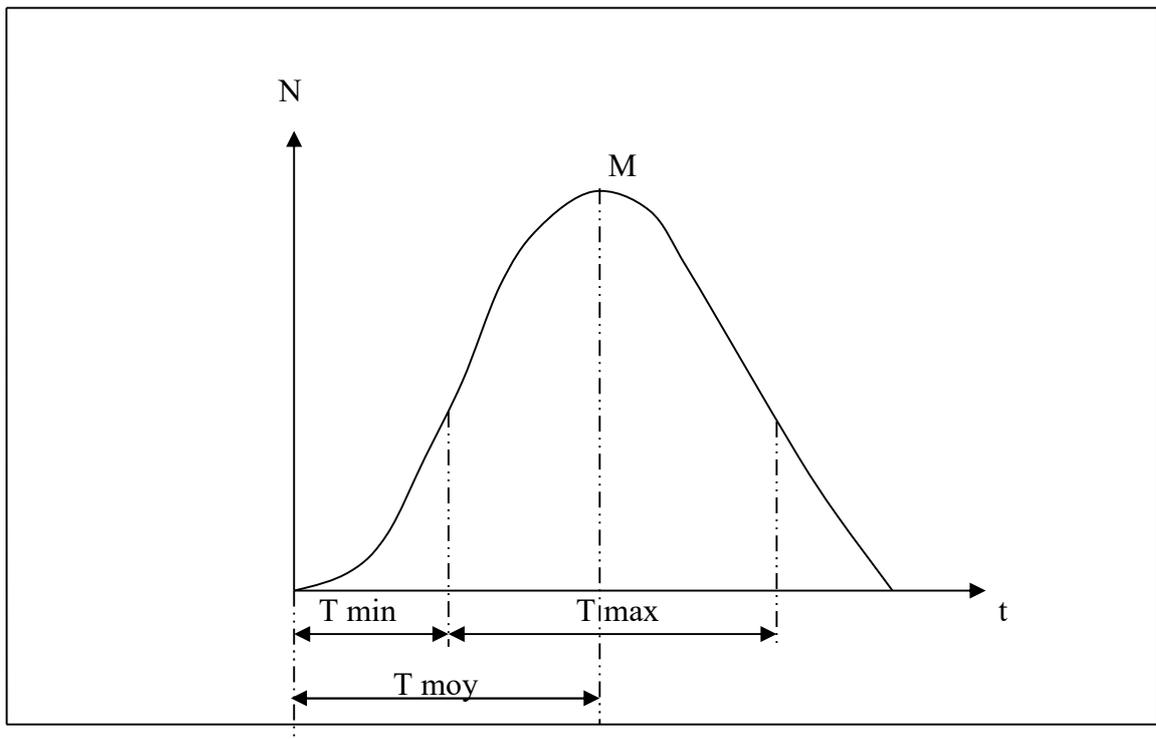
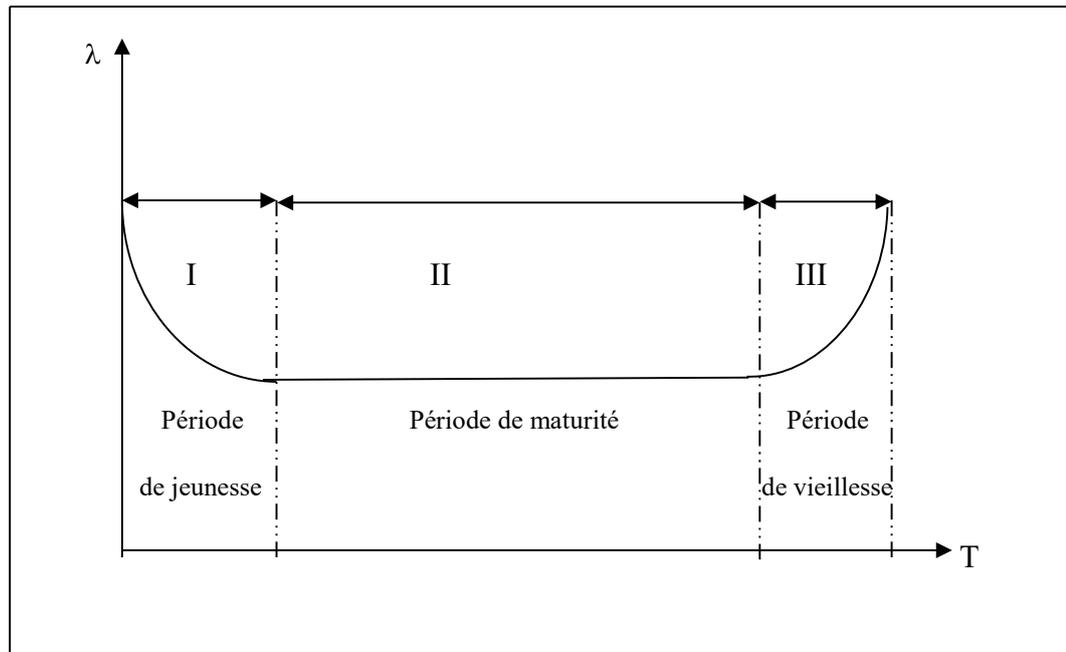


Figure III.3 : Courbe de la loi normale

Comme on le voit à partir de cette courbe de la loi normale, la probabilité de pannes par usure croît avec l'âge de manière extrêmement lente au début, mais à mesure que l'âge se rapproche de la vie moyenne cet accroissement devient très rapide. [17]

### B. Courbe des modes de défaillances ou courbe en baignoire :



**Figure III.4 :** Courbe en baignoire [17]

Zone I : Epoque de jeunesse.

Zone II : Epoque de maturité, fonctionnement normal, défaillance aléatoire indépendante du temps.

Zone III : Epoque d'obsolescence, défaillances d'usure ou pannes de vieillesse.

Le taux de défaillance, noté  $\lambda(t)$ , est un indicateur de la fiabilité. Il représente une proportion de dispositifs survivants à un instant. [17]

### III.3.5 Les lois principales de fiabilité :

#### III.3.5.1 Les lois discrètes :

Une loi est dite discrète si elle prend ses valeurs dans  $N$  c'est à dire des valeurs entières comme par exemple celle qui compte le nombre de pannes. [19]

**-Loi binomiale :**

Soit une défaillance D avec sa probabilité de survenir P, la probabilité d'apparaître k défaillances en N essais est [17] :

$$P(X=K) = C_N^K P^K (1-p)^{n-k} \quad (\text{III.5})$$

**-Loi de Poisson :**

La probabilité qu'une panne survienne n fois dans le temps t est donnée par [17] :

$$P(n, t) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^n}{n!} \quad (\text{III.6})$$

**III.3.5.2 Les lois continues :****-Loi Exponentielle :**

On applique la loi exponentielle lors le composant à un taux défaillance constant. [17]

La fonction de fiabilité :  $R(t) = e^{(-\lambda_0 t)}$  (III.7)

La probabilité de défaillance est :  $F(t) = 1 - R(t)$  (III.8)

La densité de probabilité est :  $f(t) = \lambda_0 e^{(-\lambda_0 t)}$  (III.9)

Et  $MTBF = \frac{1}{\lambda_0}$  (III.10)

**-Loi normale (Laplace-Gauss) :**

Cette loi est utilisée pour représenter la distribution des durées de vie des dispositifs en fin de vie (usure) ou le taux de défaillance est croissant. [17]

La fonction de fiabilité est :

$$R(t) = \int_t^0 \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1(t-\mu)^2}{2\sigma_0^2}\right]} \quad (\text{III.11})$$

Avec  $\mu$  est la moyenne (Espérance mathématique)

**-Loi log normal :**

Pour cette loi, le logarithme de la durée de vie suit une distribution normale. Cette loi peut être utilisée dans les cas où la distribution des données n'est pas symétrique. [17]

La fonction de fiabilité est :

$$R(t) = \int_0^t \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2} \frac{(\ln(t)-\mu)^2}{\sigma_0^2}\right]} \quad (\text{III.12})$$

Avec  $\mu$  est la moyenne (Espérance mathématique)

**-Loi Weibull :**

C'est un modèle particulièrement bien adapté à l'étude statistique des défaillances [B.Z], Weibull a donné le taux d'avarie  $Z(t)$  une formule générale dépendant de trois paramètres :  $\eta$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ . [17]

$\beta$ : Paramètre de forme ( $\beta > 0$ )

$\eta$ : Paramètre d'échelle ( $\eta > 0$ )

$\gamma$ : Paramètre de position ( $\geq \gamma > 0$ )

La fonction de fiabilité est :

$$R(t) = e^{\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right]} \quad (\text{III.13})$$

Le taux de défaillance est :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (\text{III.14})$$

La densité de probabilité pour la distribution de Weibull est :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right]} \quad (\text{III.15})$$

Et le MTBF :

$$MTBF = A\eta + \gamma \quad (\text{III.16})$$

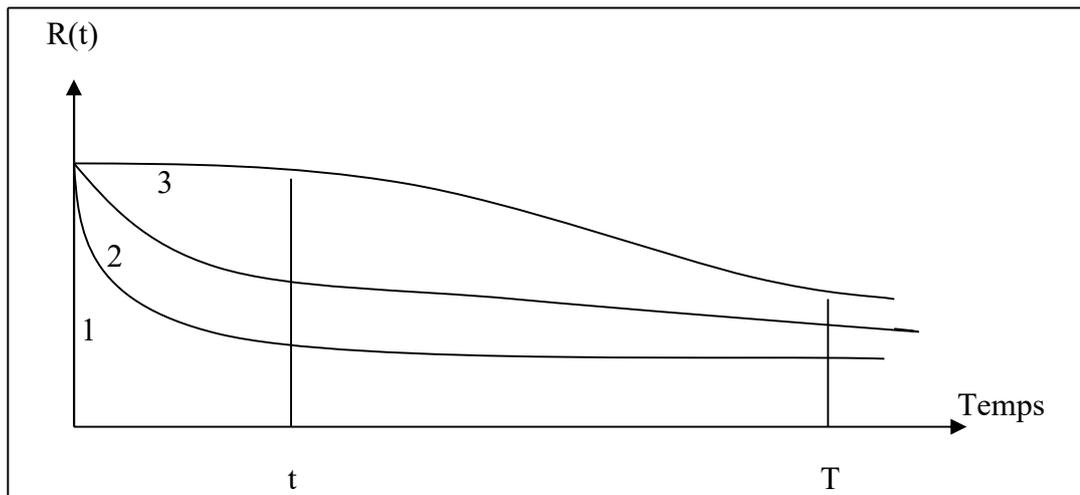
L'écart type des temps de fonctionnement :  $\sigma = B\eta$

$$(\text{III.17})$$

Nous pouvons connaître la variance :

$$V = \sigma^2 \quad (\text{III.18})$$

Pour la fonction de  $R(t)$  on distingue trois allures de graphe :



**Figure III.5** : Différentes formes de  $R(t)$ . [17]

Courbe 1 : Signifie la présence de défauts de jeunesse ( $\beta < 1$ )

Courbe 2 : l'équipement n'est pas encore sujet de vieillissement ( $\beta = 1$ )

Courbe 3 : Signifie la présence du phénomène d'usure ( $\beta > 1$ ). [18]

### III.3.6 Définition de la Maintenabilité :

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

Maintenabilité = être rapidement dépanné

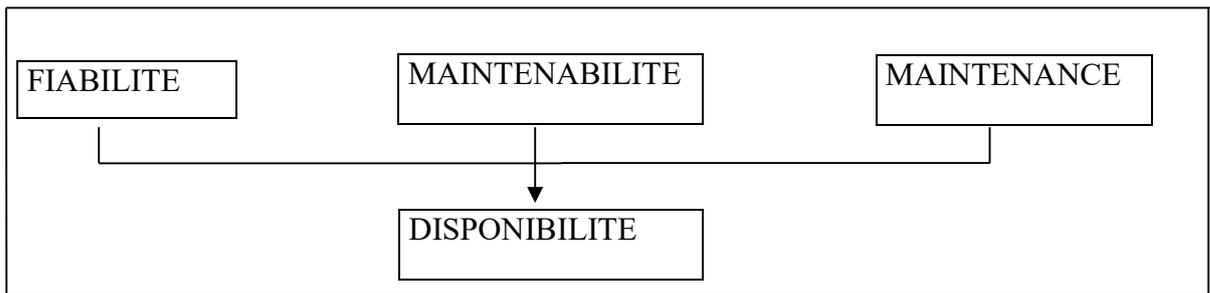
$$MTTR = \frac{\sum \text{Temps d'interventions n pannes}}{\text{Nombre de pannes}} \quad (\text{III.19})$$

La maintenabilité peut se caractériser par sa MTTR (Mean Time To Repair) ou encore Moyenne des Temps Techniques de Réparation. [19]

#### III.3.6.1 Maintenabilité et maintenance :

Pour un technicien de maintenance, la maintenabilité est la capacité d'un équipement à être rétabli lorsqu'un besoin de maintenance apparaît. L'idée de « facilité de maintenir » se matérialise par des mesures réalisées à partir des durées d'intervention. [19]

### III. 3.6.2 Maintenabilité et disponibilité :



**Figure III.6 :** Les composantes de la disponibilité d'un équipement

Le schéma ci-dessus rappelle les composantes de la disponibilité d'un équipement. Il met en évidence :

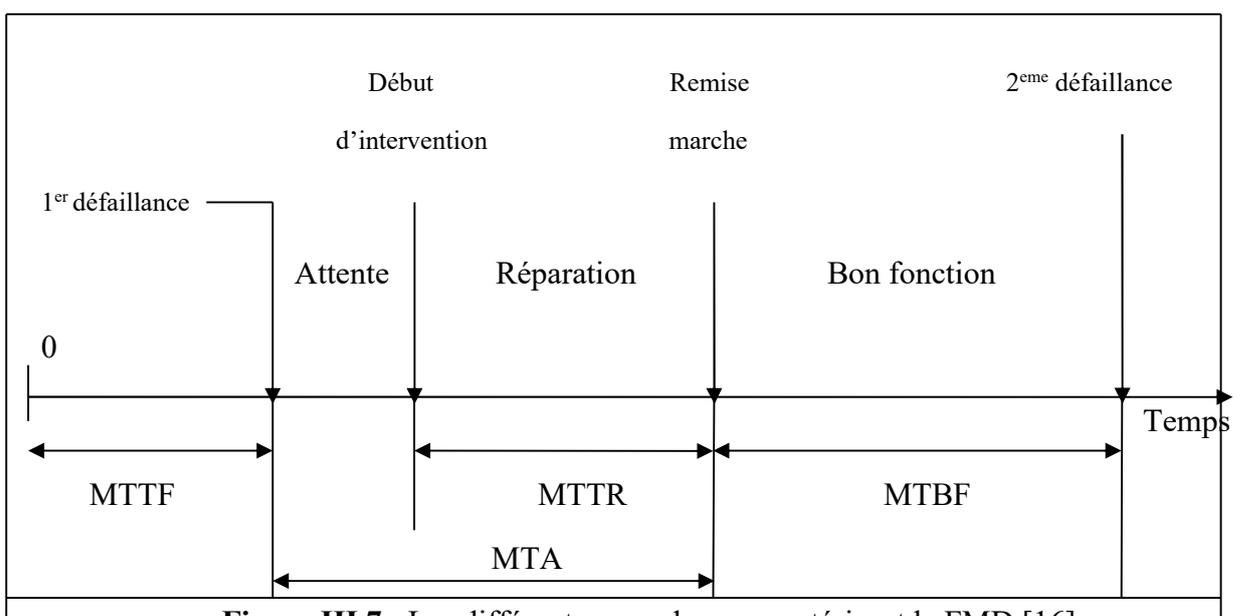
- Que la maintenabilité est un des leviers d'action pour améliorer la disponibilité et donc la productivité d'un équipement.
- Que la fiabilité et la maintenabilité sont 2 notions parallèles de même importance (et dont les démarches d'analyse sont semblables).

### III.3.7 Définition Disponibilité :

La disponibilité est l'aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné. [19]

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (III.20)$$

### III.3.8 Relation entre les différentes grandeurs caractérisant la FMD d'un équipement:



**Figure III.7 :** Les différentes grandeurs caractérisant la FMD [16]

- **MTA :**

Temps moyen pendant lequel le système est indisponible.

Il comprend le temps de détection de la panne, le temps de déplacement du service maintenance, le temps d'approvisionnement du matériel en panne, le temps de réparation.

- **MTBF:**

Temps moyen entre deux défaillances d'un système réparable.

- **MTTF:**

Temps moyen de bon fonctionnement avant la première défaillance.

- **MTTR :**

- Moyenne des temps techniques de réparation.

### **III.4 Conclusion :**

L'aperçu bibliographique sur la maintenance et la Fiabilité nous a permis, dans le prochain chapitre, d'étudier le cas d'une turbine à gaz MS5002b, et d'analyser son état de fonctionnement.

## **Chapitre IV : Intervention effectuée sur la TAG MS5002b et Recommandations**

### **IV.I Introduction :**

Les éléments principaux de la turbine à combustion industrielle ont été réalisés selon des normes éprouvées dérivées des études. Les exigences d'inspection et de réparation de la turbine se prêtent à la réalisation d'un programme régulier d'examens, commencent par des travaux dont l'importance augmente progressivement d'une inspection mineure jusqu'à ce qu'on arrive à une visite majeure, après quoi en recommence le cycle.

Les pièces particulières à la section de combustion de la TAG sont celles associées avec le processus de combustion parmi celles-ci citons les injecteurs combustible, les brides des chambres, les chambres de combustion, les pièces de transition, les tubes à flamme, les directrices de la turbine et les aubes ; généralement appelées « parties chaudes ».

En plus de la turbine à gaz proprement dite, le dispositif de commande, les éléments de contrôle du débit combustible, et autres auxiliaires doivent être entretenus, la nature exacte du matériel dépend du genre d'application. Les cas extrêmes des applications des turbines à gaz vont de la machine commandée à distance, à la machine qui fait directement partie d'un processus de fabrication.

Les inspections et les réparations pour ces deux applications sont effectuées selon une séquence comprenant une inspection en marche, une inspection du système de combustion, l'entretien des dispositifs de commande, et une visite principale après quoi cette séquence se répète à nouveau, ces inspections devront être planifiées pour garder la machine en bon état.

### **IV.2 La maintenance appliquée sur les turbines à gaz MS5002b :**

Elle nécessite le démontage de la turbine à différents degrés :

#### **IV.2.1 Inspection du système combustion (combustion inspection CI) :**

Chaque 8000 h de fonctionnement une inspection (Partiel) du système combustion réclame un temps d'arrêt relativement court de la turbine à gaz afin de vérifier l'état des éléments suivants :

- Brûleur.
- Chambre de combustion (chemise, chapeau, douille d'écoulement).
- Tubes d'interconnexion.
- Bougies d'allumage.
- Détecteurs de flammes.

**Tab IV.1 : Inspections typiques de système de combustion**

<b>Elément</b>	<b>Objective d'inspection</b>
Chemise de combustion	Corps étrangers
Chapeau de combustion	Usure anormale
Bruleur	Fissures
Pièce de transition	Trous refroidissement obstrués
Tubes d'interconnexion	Condition TBC
Vanne de purge	Oxydation/corrosion/Erosion
Clapets anti-retour	Traces de température excessive locale
Bougies d'allumage	Perte de petites particules intérieures
Détecteurs de flammes	Jeux
Conduits de combustible aux bruleurs	Inspection au boroscope

TBC : Revêtement de Protection Thermique. Protection extérieure des chambres de combustion et des pièces de transition.

Le boroscope : se compose d'un générateur de lumière, d'un conducteur de lumière flexible et d'un appareil optique rigide avec lentille haute qualité [21]

#### **IV.2.2 Inspections de la veine des gaz chauds (hot gaz path inspection HPGI) :**

Chaque 16000 h de fonctionnement, le but de ce niveau d'inspection (Partiel) est d'examiner les Pièces de la turbine les plus soumises aux contraintes par les températures élevées du système des gaz de combustion, cette visite comprend essentiellement :

- Directrices, tous les étages.
- Aubes du rotor, tous les étages.
- Anneaux de protection extérieure, tous les étages [21]

**Tab IV.2 : Inspection typique de veine des gaz chauds**

<b>Elément</b>	<b>Objet d'inspection</b>
Système de combustion	voir le tableau 1
Directrice, tous les étages	Corps étranges
Anneau de protection extérieure	Fissures Les trous de refoulement sont obstrués
Joint à labyrinthes	Etat de revêtement
Thermocouple de l'espace de roue	Oxydation/Corrosion/Erosion
Carter d'échappement de turbine	Traces de la température excessive locale Perte de petites particules intérieures

**IV.2.3 Révision générale (major inspection MI) :**

C'est une révision générale qui est faite chaque 32000 h de fonctionnement. Le but d'une révision générale est d'examiner toutes les pièces intérieures du stator et du rotor et de l'admission de la chambre des filtres jusqu'aux systèmes d'échappement y compris le réducteur de charge et la machine conduite. [21]

**Tab IV.3 : Inspection typique de révision générale**

<b>Elément</b>	<b>Objet d'inspection</b>
Système de combustion	Voir tableau 1
Veine des gaz chauds	Voir tableau 2
Aubes du compresseur	Corps étrangers
Roues de la turbine	Usure anormale
Queues d'aronde des aubes	Fissures
Zone supportée de l'arbre	Trace de fuites intérieures
Paliers	Oxydation/Corrosion/Erosion
Joints à labyrinthes	Perte de petites particules intérieures
Système d'admission et d'échappement	Distorsion et déformations
Autre système auxiliaire	Jeux

**IV.2.4 La maintenance conditionnelle :**

Elle comprend la somme des observations faites durant le fonctionnement de l'unité. Des données en opération doivent être enregistrées pour permettre d'évaluer les performances de

l'équipement, les besoins d'entretien et d'intervention, lorsque ces relevés indiquent des alarmes qui vont déclencher la turbine par la suite.

Les paramètres importants à contrôler sont les suivants [21] :

- Vitesse de rotation de la turbine HP et BP.
- Température à l'échappement.
- Température à l'entrée de la turbine.
- Vibration au niveau des paliers.
- Risque de pompage.
- $\Delta P$  filtre à air.
- Température sortie du compresseur.
- Contrôle présence de la flamme.
- Haute température des paliers.
- Température d'huile de graissage.

### IV.3 Intervention et constatation :

Après démontage de la machine, on a fait la constatation suivante :

#### IV.3.1 Section d'admission :

Après avoir fait le démontage du panneau d'admission, on a constaté que le couloir d'écoulement d'air renferme des restes de plumes et morceaux d'herbes sèches, avec d'autres déchets des pigeons, donc il faut mieux faire un nettoyage en accédant par les deux trappes d'admission.



**Figure IV.1** : Plumes, herbes et déchets dans le Couloir d'écoulement d'air

### IV.3.2 Section de combustion :

Après démontage une couche de carbone et rouille enveloppent les différentes parties de la section, à savoir les chambres de combustion, les tubes à flamme, avec un dépôt de calamine sur les nez d'injecteurs.

#### IV.3.2.1 Injecteurs :

Dépôt de carbone colmaté sur la face des nez, et usures variables des contours des nez à cause du frottement avec les collars des tubes à flamme, après une inspection visuelle, trois (03) nez ont été changés par d'autres réparés.



Figure IV.2 : Dépôt calamine et usure sur les nez

#### IV.3.2.2 Longuettes de revenue :

Une inspection visuelle. Trois (03) pièces affichent des traces d'usure sur les lèvres qui est dû au frottement avec les crossfires, et changement des pièces en question.



Figure IV.3 : Usure des lèvres sur la fourchette et fissure de trois pièces

#### IV.3.2.3 Tubes d'interconnexion :

Une inspection visuelle. Neuf (09) tubes affichent des usures variables qui sont dues au frottement avec les collars des tubes à flammes.

Les nouvelles pièces ont une longueur supérieure aux reste pour cette raison les trois autres ont été changés.



**Figure IV.4** : Usure des tubes d'interconnexion



**Figure IV.5** : différence de longueur des tubes d'interconnexion

#### IV.3.2.4 Tubes à flammes :

Après inspection visuelle, aucunes anomalies pour l'ensemble, les mêmes pièces ont été reconduites pour un autre cycle de vie.



**Figure IV.6** : Tubes à flamme

### IV.3.2.6 Chambres de combustions :

L'état est acceptable, présence d'une couche de carbone et de rouille qui a envahi tous les plans joint des chambres de combustion, pas de fissures de la soudure des crochets, pas de changement.



Figure IV.7 : Chambres de combustion

### IV.3.3 Inspection boroscopique :

Par l'intermédiaire des trous du boroscope situés sur les caisses de la machine, une inspection boroscopique des différentes parties a été faite, l'ensemble est en bon état, pas de trace de fissures ou arrachements de métal.

Les parties concernées par l'inspection sont :

- 1- Les aubes de la directrice première étage :



Figure IV.8 : Vue d'ensemble des aubes directrice 1<sup>er</sup> étage

2- Les aubes de la directrice deuxième étage :



**Figure IV.9** : Vue aubes directrice 2<sup>ème</sup> étage

3- Les aubes de la roue HP :



**Figure IV.10** : Aube de la roue HP

4- Les aubes de la roue BP :



**Figure IV.11** : Aubes de la roue BP

#### **IV.4 Recommandations :**

A l'issue de cette révision, il est important de mettre en évidence les points suivants :

- 1- Le bon fonctionnement d'une turbine à gaz et de l'équipement entraîné dépend essentiellement du système de graissage et de filtration à air, il est nécessaire que tous les facteurs contribuent à une bonne lubrification et filtration soient présentes pour que tout le système soit maintenu en bon état.
- 2- Respecter les périodes des révisions des machines données par le constructeur, et cela pour maintenir l'équipement en bonne condition.
- 3- Les pièces jugées usées peuvent être inspectées et réparées au niveau des ateliers de maintenance pour qu'elles soient réutilisées pour d'autres révisions.

#### **IV.5 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons démontrés le déroulement d'une intervention effectuer sur une TAG, ou l'équipe de maintenance a pu remplacer et réparer des pièces trouver défectueuses comme :

- 03 nez d'injecteur.
- 03 languette de revenue.
- 09 tube d'interconnexion...

Les travaux sont déroulés dans des bonnes conditions, les consignes de sécurité ont été pris avec rigueur pour éviter tout risque d'accident, grâce l'ensemble des personnels, turbomachine et méthode de leurs coopérations et soutiens durant la période de la révision.

Toutes les pièces jugées défectueuses ont été remplacées en respectant les normes et les procédures recommandées par le constructeur. Les travaux n'ont pas été réalisés dans les délais à cause des imprévus.

Le retard enregistré dans les travaux occasionnés par différentes entraves rencontrées durant la révision (20jours).

## Chapitre V : Analyse et Calcul FMD de la TAG MS5002b

### V.1 Introduction :

La fiabilité a subi trois essors en premier temps elle est née avec les câbles sous-marins dont les réparations étaient coûteuses, puis l'activité aéronautique. Enfin elle a subi un essor avec l'électronique ou la fiabilité permet de supprimer une partie des pannes préventivement, ce que la maintenance ne pourrait faire.

Après avoir mentionné dans le chapitre III les méthodes d'analyse et les différentes lois de fiabilité, nous allons les appliqués afin d'étudier un cas d'une TAG Ms5002b installée au sein de centre de production d'ONR.

Notre étude est basée sur des données obtenu de la direction d'ONR ; un historique de l'année 2018 de la TAG MS5002b connue sous le nom de (031KG01).

### V.2 Historique des pannes TAG MS5002b :

Le tableau suivant résume l'historique des pannes de la TAG MS5002b (031KG01) de l'unité 30 (unité de compression) d'ONR :

**Tab V.1** : Historique de la TAG MS5002b

N°	Date	TBF (Heures)	TTR (Heures)
1	19/01/18	456	02
2	21/02/18	790	05
3	02/03/18	211	19
4	27/03/18	581	09
5	12/04/18	375	43
6	14/05/18	725	04
7	04/06/18	500	02
8	03/07/18	694	596
9	02/08/18	124	10
10	06/09/18	830	19
11	07/10/18	725	18
12	01/11/18	582	392
13	01/12/18	328	82
14	31/12/18	638	

### V.3 L'application de la méthode ABC :

L'application de la méthode ABC consiste à classer en premier temps, le temps des pannes de la turbine d'une façon décroissante, puis calculer ses cumule et pourcentage.

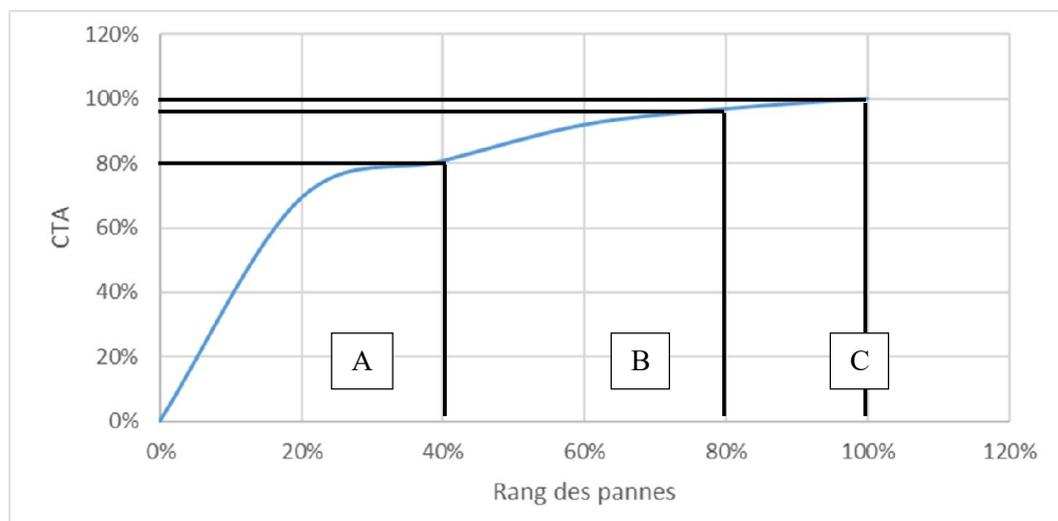
En deuxième temps calculer le cumul et le pourcentage des rangs des pannes dans le temps, comme illustré dans le tableau ci-dessous :

**Tab V.2 : Résultats des calculs ABC**

Rang	Les pannes	Temps d'arrêt (TA)	Classement décroissant TA		Cumul de TA	Rang en %	Cumul de TA en %
1	Vibrations	43	Haute température au niveau multiplicateur	265	265	20%	69%
2	Fuite d'huile au niveau des accouplements	19	Défaut d'automate	44	309	40%	81%
3	Défaut d'automate	44	Vibrations	43	352	60%	92%
4	Haute température au niveau multiplicateur	265	Fuite d'huile au niveau des accouplement	19	371	80%	97%
5	Défaut au niveau des panne d'entrée et de sortie	12	Défaut au niveau des panne d'entrée et de sortie	12	383	100%	100%

#### V.3.1 Courbe (ABC) :

La figure suivante montre la courbe de Pareto ou la courbe dite ABC, cette courbe est le pourcentage de cumul de temps d'arrêt en fonction de pourcentage de cumul des fréquences.



**Figure V.1 : La Courbe ABC.**

D'après cette figure, on observe que la courbe ABC contient trois zones d'où :

**Zone "A"** : les 81% des heures de panne représentent 40% des pannes, cette zone contient les éléments les plus tombent en panne : (Problème d'automate et Haute température au niveau de palier de multiplicateur).

Cette zone nécessite une intervention systématique a un intervalle de temps bien étudier.

**Zone "B"** : les 16% des heures de panne représentent 40% des pannes, cela représente les pannes (Vibrations et les fuite d'huile au niveau des accouplement).

La maintenance appliquer dans la zone B est la maintenance conditionnelle.

**Zone "C"** : les 3% des heures de panne représentent 20% des pannes.

#### V.4 Application de la méthode de Weibull :

Notre étude est basée sur un historique des données de l'année 2018 de la TAG MS5002b (031KG01), comme indiquez dans le (Tab IV 1).

##### V.4.1 Calcule de la fréquence relative F(i) :

Pour appliquer la méthode de Weibull, il faut tout d'abord classer les temps de bon fonctionnement de la TAG en ordre croissant, en suit il faut calculer la fréquence relative pour chaque TBF<sub>i</sub>, par la méthode de rang médians :

$$\text{- Si } N > 50 ; F(i) = \frac{i}{N}$$

$$\text{- Si } 20 < N < 50 ; F(i) = \frac{i}{N+1}$$

$$\text{- Si } N < 20, F(i) = \frac{i-0.3}{N+0.4} \text{ (notre cas)}$$

(N=14 nombre d'arrêts).

**Tab V.3** : Résultats de calcule F(i)

N <sub>i</sub>	TBF <sub>i</sub> (Heures)	F <sub>i</sub>	F <sub>i</sub> en (%)
1	124	0,04861111	5%
2	211	0,11805556	12%
3	328	0,1875	19%
4	375	0,25694444	26%
5	456	0,32638889	33%
6	500	0,39583333	40%
7	581	0,46527778	47%

8	582	0,53472222	53%
9	638	0,60416667	60%
10	694	0,67361111	67%
11	725	0,74305556	74%
12	725	0,8125	81%
13	790	0,88194444	88%
14	830	0,95138889	95%

#### V.4.2 Détermination des paramètres de Weibull :

Pour cela en trace la courbe de Weibull sur le papier d'Allan Pallit (voir annexe B).

- Sur l'axe **A** les valeurs **TBF<sub>i</sub>**.
- Sur l'axe **B** les valeurs de **F (i)** associées.

On obtient un nuage de point, si ce dernier peut être représenté approximativement par une droite  $D_1$ .

Donc:  $\gamma = 0$

- La droite  $D_1$  coupe l'axe  $(t; \eta)$  en  $\eta$

$$\eta = 660$$

- Nous traçons la droite  $D_2 // D_1$ , passant par le point 1(X, Y).

Cette droite  $D_2$  coupe l'axe  $(\beta, b)$  en  $\beta$   $\beta = 2$

#### V.4.3 Calcul de MTBF :

On utilise la table de Weibull pour extraire les valeurs d'A et B (voir annexe A), telles que :

- $MTBF = A\eta + \gamma$
- L'écart type des temps de fonctionnement :  $\sigma = B\eta$

Nous pouvons connaître la variance :  $V = \sigma^2$

Les résultats sont au tableau suivant :

**Tab V.4 : Résultats de calcul MTBF, V et  $\sigma$**

$\beta$	2
$\eta$	660
$\gamma$	0
A	0.88623
B	0.46325
MTBF	585 Heures
$\sigma$	306
V	93480

#### V.4.4 Détermination des fonctions de probabilité par Weibull :

On a : A chaque instant t, nous pouvons ainsi, graphiquement ou analytiquement, déterminer :

$$\text{- La fiabilité : } R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{V.1})$$

$$\text{- La fonction de répartition : } F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{V.2})$$

$$\text{- La densité de défaillance : } f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{V.3})$$

$$\text{- Le taux de défaillance instantané : } \lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (\text{V.4})$$

##### V.4.4.1 Les valeurs des fonctions de probabilité en fonction de MTBF :

###### 1. La fiabilité :

$$R(\text{MTBF}) = e^{-\left(\frac{585}{\eta}\right)^\beta}$$

$$R(\text{MTBF}) = 0,455827652 = 45,58 \%$$

On a : 45.58 % pour que le Turbine à gaz ne tombe pas en panne a  $t = 585$  H.

## 2. La fonction de répartition :

$$F(MTBF) = 1 - e^{-\left(\frac{585}{\eta}\right)^\beta}$$

$$F(MTBF) = 0,544172348 = 54.42 \%$$

Dans ce cas on à 54.42 % de probabilité pour que la Turbine à gaz tombe en panne entre (0 et 585 H).

## 3. La densité de défaillance :

$$f(MTBF) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{585}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{585}{\eta}\right)^\beta}$$

$$f(MTBF) = 0,00122433 = 0.12 \%$$

On a : 0.12 % de probabilité pour que la Turbine à gaz ne tombe pas en panne au bout de 585 Heures.

## 4. Le taux de défaillance :

$$\lambda(MTBF) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{585}{\eta}\right)^{\beta-1}$$

$$\lambda(MTBF) = 0,00268595 = 0,0027 \text{ H}^{-1}$$

La turbine enregistre 0.0027 pannes par heure. Autrement dit, il faut en moyenne 370 heures de fonctionnement pour que la turbine enregistre une panne.

### V.4.4.2 Calcul du temps souhaitable pour une intervention systématique :

On suppose un seuil de 80 % comme une fiabilité souhaitable :

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

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

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

$$t = 312 \text{ Heures}$$

Pour une fiabilité de 80 % de la TAG il faut une intervention systématique chaque 312 heures surtout pour les pannes trouvées dans la zone A de l'analyse ABC.

#### V.4.4.3 Etude des fonctions de probabilité à chaque instant (t) :

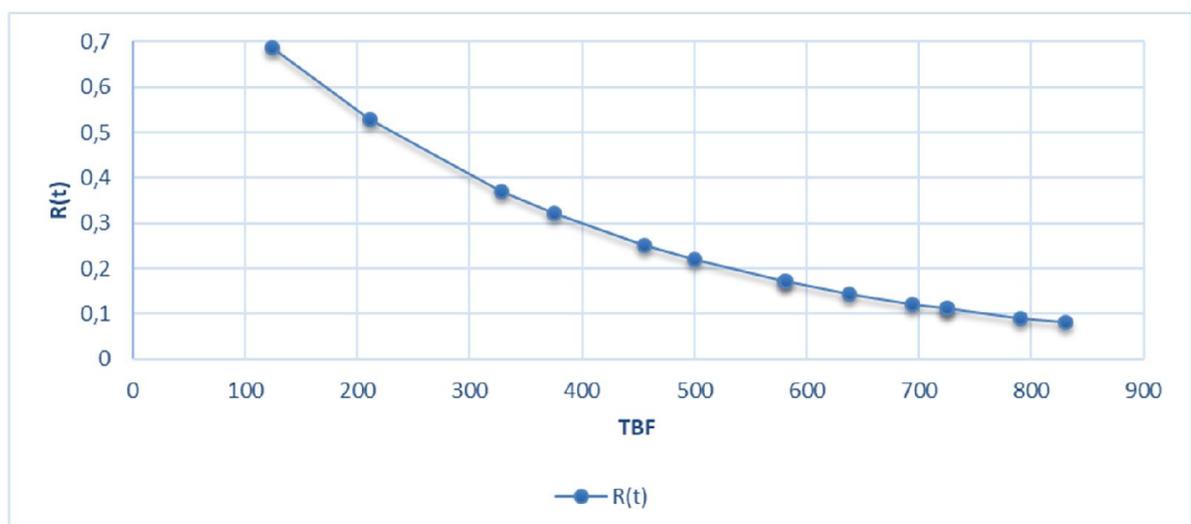
##### A- Etude de fiabilité R(t) :

Piquons les valeurs  $TBF_i$  de (Tab V.1) et par l'application de l'équation (V.1) on a arrivé de calculer la fiabilité R(t), comme indiquez dans le tableau ci-dessous :

**Tab V.5** : Résultat de la fiabilité à chaque instant

TBF <sub>i</sub>	R(t)
124	0,9653179
211	0,9028434
328	0,7811572
375	0,7240965
456	0,620422
500	0,5633123
581	0,4607345
582	0,459506
638	0,392804
694	0,3309844
725	0,2991922
725	0,2991922
790	0,238655
830	0,205667

La courbe suivante représente la fiabilité calculer en fonction de TBF



**Figure V.2** : La courbe R(t)

Notez bien que la fiabilité ce décroît rapidement au premier temps jusque à  $t = \text{MTBF}$  puis elle a la tendance de se stabilisée (devenir constante). La chute de la fiabilité signifie que le turbine à gaz étudié a subi plusieurs arrêts dus à des défauts : de fabrication, conception, assemblage ou bien à un contrôle de qualité insuffisant. De plus cette décroissance est due probablement à une mauvaise utilisation ou par l'absence d'une maintenance adéquate.

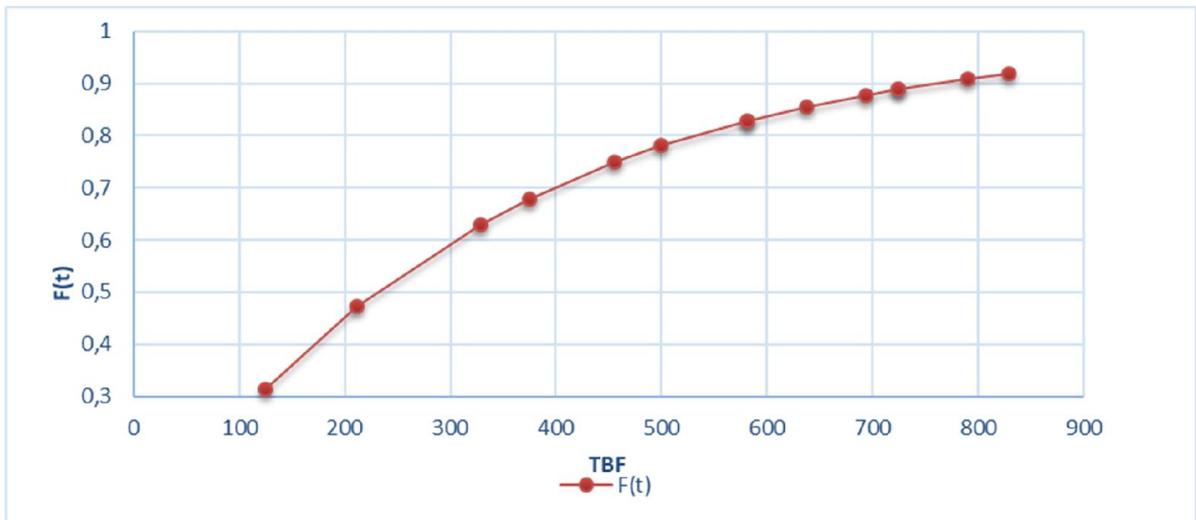
### B- Etude de la fonction de répartition $F(t)$ :

Prendrons les  $\text{TBF}_i$  de (Tab V.1) et par l'application de l'équation (V.2) on a pu calculés la fonction de répartition  $F(t)$ . Les résultats sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

**Tab V.6** : Résultats de la fonction de répartition

$\text{TBF}_i$	$F(t)$
124	0,3132312
211	0,4723879
328	0,6298842
375	0,6790159
456	0,7488784
500	0,7802251
581	0,8280594
582	0,8285796
638	0,8553348
694	0,8779141
725	0,8888606
725	0,8888606
790	0,9087306
830	0,9191493

La courbe suivante représente La répartition en fonction de TBF :



**Figure V.3 :** La courbe de la fonction F(t)

La courbe montre que la probabilité cumulée de défaillance est croissante, ce qui signifie que la Turbine à gaz étudié a subi de plus en plus de problèmes.

Cela veut dire que plus on n'intervient pas à temps et plus le risque d'arrêts augmente.

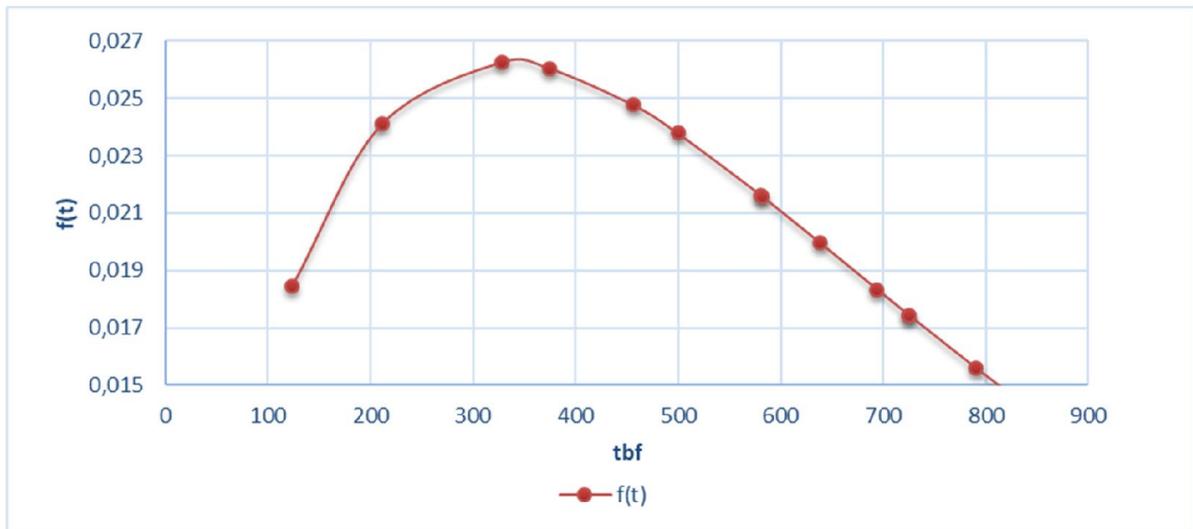
### C- Etude de la densité de probabilité :

Avec les valeurs  $TBF_i$  de (Tab V.1) et par l'application de l'équation (V.3) on a calculé la densité de défaillance  $f(t)$ . Comme indiqué dans le tableau suivant :

**Tab V.7 :** Résultats de la fonction  $f(t)$

$TBF_i$	$f(t)$
124	0,0184328
211	0,0240966
328	0,0262766
375	0,0260539
456	0,024786
500	0,0237852
581	0,0216228
582	0,0215945
638	0,0199776
694	0,0183393
725	0,0174407
725	0,0174407
790	0,0156067
830	0,0145251

La courbe suivante représente la densité de défaillance en fonction de TBF :



**Figure V.4 :** La courbe de la densité de défaillance  $f(t)$

L'intérêt de cette fonction et de voir comment se distribue la densité de défaillances autour de MTBF d'un matériel. En effet, la courbe montre que la plupart des défaillances arrivent dans un intervalle très faible est proche de la MTBF (entre 200 h et 585 h). Au-delà de  $t=MTBF = 585$  h la fréquence de défaillance est plus faible (intervalle de temps de mise en panne important avec probabilité instantanée de défaillance plus faible).

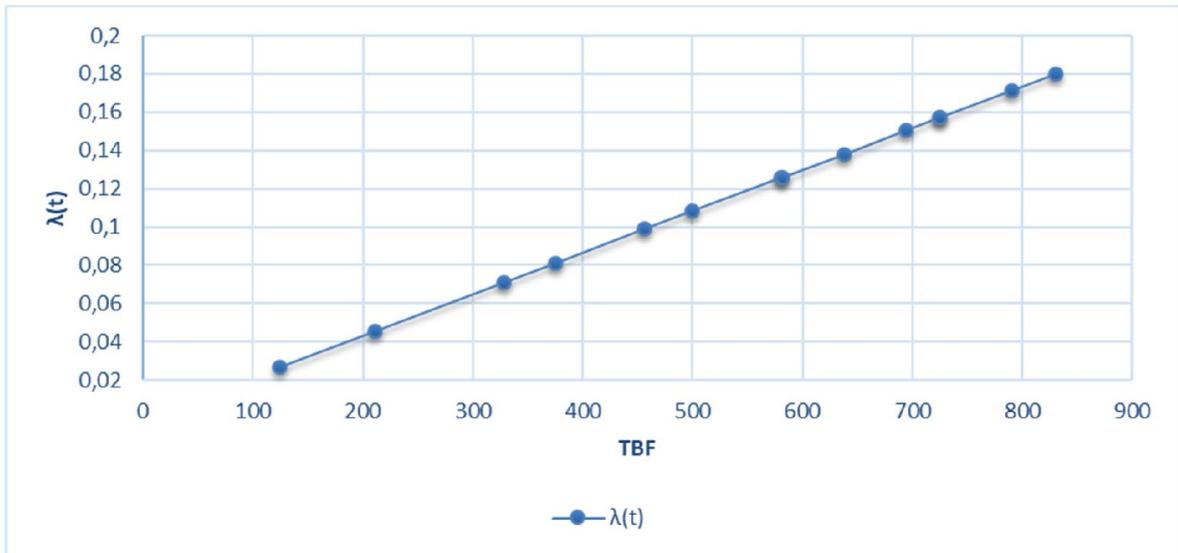
#### **D- Etude de taux de défaillance $\lambda(t)$ :**

Appliquons l'équation (V.4) par l'utilisation des valeurs  $TBF_i$  de (Tab V.1) on a calculé le taux de défaillance dans le tableau suivant :

**Tab V.8 :** Résultats des taux de défaillance

TBF <sub>i</sub>	taux(t)
124	0,0268398
211	0,045671
328	0,0709957
375	0,0811688
456	0,0987013
500	0,1082251
581	0,1257576
582	0,125974
638	0,1380952
694	0,1502165
725	0,1569264
725	0,1569264
790	0,1709957
830	0,1796537

La courbe suivante représente le taux de défaillance en fonction de TBF :



**Figure V.5 :** La courbe de taux de défaillance

Après les 100 heures de marche le risque de défaillance est très petit qui augmente au fil du temps. Le taux de défaillance croissant. L'allure de la courbe est typique de période de vieillesse (courbe en baignoire).

### V.5 Estimation de la maintenabilité :

La fonction de la maintenabilité est donnée par :  $M(t) = 1 - e^{-\mu t}$  (V.5)

#### V.5.1 Calcul de la fonction M(t) et MTTR :

$$\text{On a : } MTTR = \frac{\sum TTR}{N}$$

TTR : temps de réparation.

N : nombre de panne = 13

$$MTTR = \frac{1201}{13} = 92.38 \text{ Heures}$$

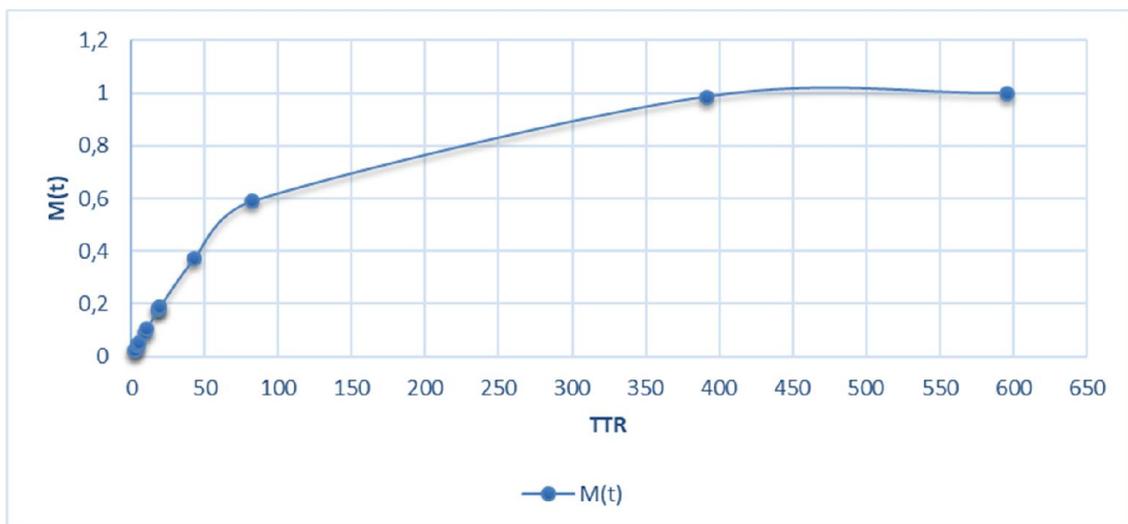
$$\mu \text{ (Taux de réparation)} = \frac{1}{MTTR} = \frac{1}{92.38} = 0,01082 \text{ intervention / Heure.}$$

Prendrons les valeurs TTR de (Tab V.1) et appliquons l'équation (V.5) pour calculé la maintenabilité  $M(t)$ . Comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

**Tab V.9** : Résultat de la fonction  $M(t)$

N°	TTR (Heures)	M (t)
1	02	0,02141
2	02	0,02141
3	04	0,04236
4	05	0,05266
5	09	0,09279
6	10	0,10255
7	18	0,17697
8	19	0,18582
9	19	0,18582
10	43	0,37203
11	82	0,58821
12	392	0,98561
13	596	0,99842

La courbe suivante représente la maintenabilité en fonction de TBF :



**Figure V.6** : La courbe de la maintenabilité

La courbe de la maintenabilité est croissante avec le temps. Elle possède une asymptote égale à 1 car l'on peut supposer qu'elle sera réparée au bout d'un temps donné sinon cette entité ne serait d'aucune utilité. La maintenabilité d'une entité dépend étroitement des moyens et compétences mis en œuvre.

La notion de maintenabilité dépend de l'état initial de l'entité étudiée. Au plan pratique. On observe presque 30.76% des TTR sont des temps inférieurs ou égales à 5 heures, ce qui justifier la bonne maintenabilité de Turbine à gaz, et que le service maintenance de l'entreprise peut faire la remise en état de fonctionnement de Turbine à gaz après chaque panne.

## V.6 Estimation de la disponibilité :

### V.6.1 Disponibilité intrinsèque au asymptotique :

$$Di = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{585}{585 + 92.38} = 0.86362$$

$$Di = 86.36\%$$

### V.6.2 Disponibilité instantané D (t) :

$$D(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (V.6)$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{1}{MTBF} \rightarrow \frac{1}{585} = 0.001709$$

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \rightarrow \mu = \frac{1}{MTTR} = \frac{1}{92.36} = 0.010827$$

$$\mu + \lambda = 0.010827 + 0.001709 = 0.012536$$

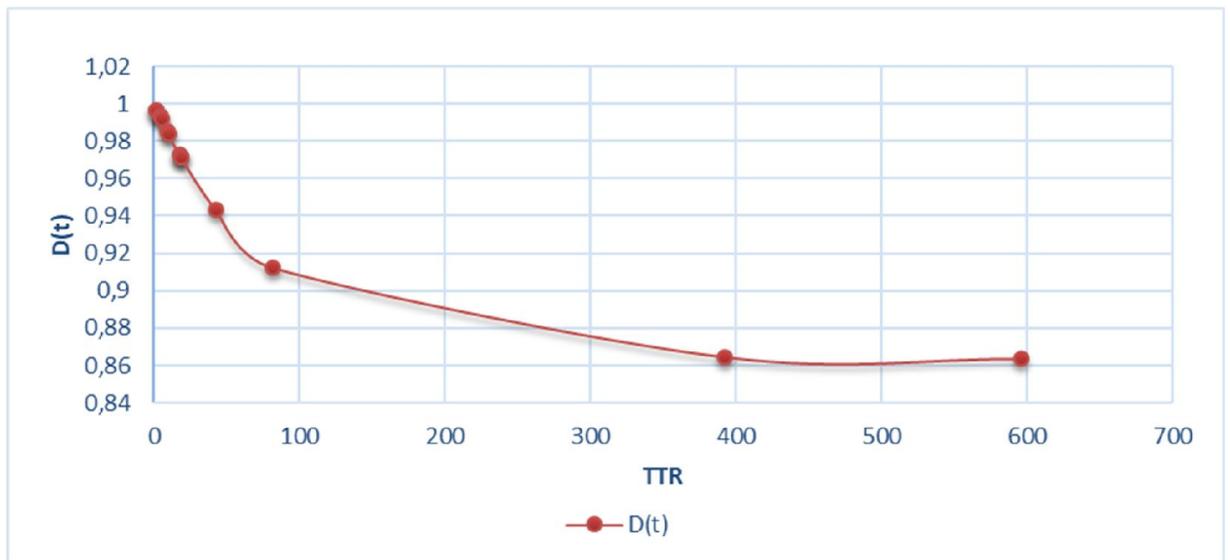
$$D(t) = \frac{0.010827}{0.012536} + \frac{0.001709}{0.012536} e^{-(0.012536) \cdot TTR}$$

Piquons les valeurs TTR de (Tab V.1) et par l'application de l'équation (V.6), on a calculé la disponibilité instantanée. Comme indiqué dans le tableau suivant :

**Tab V.10 : Résultats de la disponibilité**

N°	TTR (Heures)	D(t)
1	2	0,99662
2	2	0,99662
3	4	0,99333
4	5	0,99172
5	9	0,98545
6	10	0,98394
7	18	0,97246
8	19	0,97111
9	19	0,97111
10	43	0,94319
11	82	0,91244
12	392	0,86467
13	596	0,86375

La courbe suivante représente la disponibilité en fonction de TBF :



**Figure V.7 : La courbe de la disponibilité**

On remarque que la courbe de la disponibilité est décroissante avec le temps, puis elle a la tendance de se stabiliser au bout des 400 Heures, cela confirme la nécessité d'une application de la maintenance systématique pour diminuer les arrêts et réduire le temps de réparation.

### **V.7 Conclusion :**

Le chapitre V est un chapitre purement pratique (un chapitre de calcul), ou on a essayé de faire une analyse par la méthode ABC sur les pannes les plus apparentes de la TAG Ms5002b ; suivie par une interprétation et recommandations.

A base d'un historique de marche de la TAG nous avons effectués des calculs et donnée des interprétations de :

- La fiabilité  $R(t)$ .
- La fonction de répartition.
- La densité de Probabilité.
- Le taux de défaillance.
- La maintenabilité.
- La disponibilité.

Les résultats obtenus sont présentés dans des tableaux et par des graphes.

Finalement on est arrivés à la nécessité de l'application d'une stratégie de maintenance systématique et préventive sur la TAG (031KG01) afin de diminuer les arrêts, améliorer sa performance et minimiser les couts de la maintenance corrective.

## Conclusion général

Notre stage pratique a été effectuée dans le cadre de la mise en situation professionnelle au niveau de la direction d'Oued Noumer, nous a permis d'enrichir nos connaissances, joindre la théorie à la pratique et se familiariser avec les différents équipements des unités à savoir les turbines à gaz ou on a pu connaître la stratégie de la maintenance des TAG appliqué par l'équipe de maintenance, et prendre des données et des informations qui nous a aidées de faire nos analyses et calculs afin d'identifier l'état d'une TAG et de choisir une stratégie de maintenance a appliqué sur la TAG pour au moins améliorer son rendement et minimiser ses arrêts.

Après une intervention et une inspection visuel de la TAG MS5002b et en particulier la section d'admission et de combustion, et une inspection boroscopique des roues HP et BP ; l'équipes de maintenance a pu constater quelques défauts sur quelques pièces. Enfin on est arrivés à des recommandations comme suite :

- La bonne lubrification des pièces et la filtration sont importantes pour un bon état de la TAG.
- Il faut respecter la période de révision donnée par le constructeur.
- La réparation des pièces jugées usées est importante pour la réutilisation dans une autre révision.

A base de l'historique de marche de la TAG MS5002b (031KG01) récupéré de la direction d'ONR nous avons fait une analyse ABC des défaillances de la TAG, ou on les a classés on trois zones :

Zone A : les défaillances les plus influents sur la TAG (la nécessité d'une maintenance systématique).

Zone B : les défaillances moins influent (maintenance conditionnelle).

Zone C : les défaillances rarement apparentes.

Eventuellement, on a utilisé la loi de Weibull et ses paramètres pour arriver à un calcul de fiabilité bien détaillé. Alors on a obtenu les résultats suivants :

- 312 heures une période de maintenance systématique sur les pannes de la zone A de l'analyse ABC pour une fiabilité souhaitable de 80%.
- La fiabilité  $R(t)$  de la TAG est décroissante avec le temps ce qui signifié l'absence d'une maintenance adéquate.
- La fonction de répartition  $F(t)$  augmente avec le temps, cela veut dire que la TAG subi de plus en plus des défaillances.
- La densité de défaillance  $f(t)$  est forte entre 200h et 585h (MTBF).
- Le taux de défaillance  $\lambda(t)$  est croissant avec le temps.
- La maintenabilité s'augmente avec le temps contrairement à la disponibilité.

## Références bibliographiques

- [01] B.HACHMAOUI, «Etude d'impact de changement de dimensionnement des tamis moléculaires 4A° par 5A° sur le fonctionnement de l'unité de déshydratation de Oued Noumer», mémoire de fin de formation, encadré par : Mr. A.DJEMMANE, Direction régional Hassi R'mel Sonatrach, (2018).
- [02] Document de l'entreprise, fichier électronique, centre de production d'Oued Noumer, (2016).
- [03] Document de l'entreprise, Manuel opératoire : Récupération des gaz associés, Centre de production d'Oued Noumer.
- [04] Document de l'entreprise, Manuel opératoire : Récupération du GPL, Centre de production d'Oued Noumer.
- [05] N.HADJ KOUIDER, «Etude d'un groupe électrogène et son démarrage», Rapport de stage, Centre de production d'Oued Noumer, (2017).
- [06] A.BELHADJ ; « Simulation numérique de la combustion dans une chambre de combustion d'une turbine à gaz MS 5002C », Mémoire master, encadré p[08] Document de l'entreprise NUOVO PIGNONE; « Manuel d'instruction, opération et d'entretien (volume 1) », SONATRACH.
- [09] S.ZEMIRI, «Etude, vérification et amélioration des paramètres de service de la turbine à gaz MS5002b», mémoire fin de formation, encadré par : Mr. A.DJEMMANE, Centre de production d'Oued Noumer (2018).
- [10] I.Maatoub, «Etude et préparatifs pour le démarraar : Mr. N.HEBBIR, Université de biskra, (2014).
- [07] Document de l'entreprise, General Electric Service, « Installation & Service Engineering International Departement », SONATRACH.
- ge de la turbine MS5002b», mémoire de fin de formation, encadré par : Mr. M.ABERBOUR, Direction régional Hassi R'mel Sonatrach.
- [11] H.MOSLI, D.BEN SEDDIK, S.BRAHIMI SMAIL, «Etude de turbine à gaz MS5002b», mémoire master professionnel, encadré par : Mr. A.ZEROUATI, Université Kassdi Merbah Ouergla, (2013).
- [12] Site web : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Maintenance>.
- [13] B. BOUMAD ,M.HALLAL : «Passage et comparaison entre l'ancienne et la nouvelle technologie apportée à la turbine à gaz MS5002b», mémoire d'ingénieur d'Etat, encadré par : Mr.HALIMI, université de Boumerdas, (2006).

- [14] A.HATHAT,H.DEBLAOUI : «Etude analytique FMD d'une turbine DR990»,mémoire master, encadré par : Mr. R.KAREK, Université Kasdi Merbah-Ouargla, (2015).
- [15] A.DAFDAF, O.FAID : « Optimisation de la fiabilité d'un système électromécanique», mémoire master, encadré par : Mr. Z.GHEMARI, université Mohamed Boudiaf – M'sila, (2018).
- [16] A.HERZALLAH : « Etude thermodynamique, maintenance et fiabilité d'un turbine à gaz MS5002b», mémoire d'ingénieur d'Etat, encadré par : Mr. ZOUGAB, université de Boumerdas, (2007).
- [17] A.ABDICHE : «ETUDE THERMODYNAMIQUE, MAINTENANCE ET FIABILITE D'UNE TURBINE A GAZ MS 5002b», mémoire d'ingénieur d'Etat, encadré par : Mr. ZOUGAB, université de Boumerdas.
- [18] H.KAHAL : «Réseaux Bayésiens Dynamiques: Application aux réseaux électriques», mémoire MAGISTERE, encadré par : Mr. L.MESREF, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran.
- [19] Pr. A.BELLAOUAR, M.A. S.BELEULMI. « FIABILITE MAINTENABILITE DISPONIBILITE », Livre, université Constantine 1, (2014).
- [21] Document de l'entreprise, "Manuel de maintenance ", centre de production Oued Noumer, (2001).

## ANNEXE A

$\beta$	A	B	$\beta$	A	B	$\beta$	A	B	$\beta$	A	B
0,05	2,43290E+18	9,03280E+23	1,75	0,89062	0,52523	3,45	0,89907	0,28822	5,15	0,91974	0,20505
0,1	3,62880E+06	1,55977E+09	1,8	0,88929	0,51123	3,5	0,89975	0,28473	5,2	0,92025	0,20336
0,15	2,59357E+03	1,21993E+05	1,85	0,88821	0,49811	3,55	0,90043	0,28133	5,25	0,92075	0,20170
0,2	1,20000E+02	1,90116E+03	1,9	0,88736	0,48579	3,6	0,90111	0,27802	5,3	0,92125	0,20006
0,25	2,40000E+01	1,99359E+02	1,95	0,88671	0,47419	3,65	0,90178	0,27479	5,35	0,92175	0,19846
0,3	9,26053E+00	5,00780E+01	2	0,88623	0,46325	3,7	0,90245	0,27164	5,4	0,92224	0,19688
0,35	5,02914E+00	1,99761E+01	2,05	0,88589	0,45291	3,75	0,90312	0,26857	5,45	0,92272	0,19532
0,4	3,32336E+00	1,04382E+01	2,1	0,88569	0,44310	3,8	0,90379	0,26558	5,5	0,92320	0,19379
0,45	2,47859E+00	6,46009E+00	2,15	0,88561	0,43380	3,85	0,90445	0,26266	5,55	0,92368	0,19229
0,5	2,00000E+00	4,47214E+00	2,2	0,88562	0,42495	3,9	0,90510	0,25980	5,6	0,92414	0,19081
0,55	1,70243E+00	3,34530E+00	2,25	0,88573	0,41652	3,95	0,90576	0,25701	5,65	0,92461	0,18935
0,6	1,50458E+00	2,64514E+00	2,3	0,88591	0,40848	4	0,90640	0,25429	5,7	0,92507	0,18792
0,65	1,36627E+00	2,17887E+00	2,35	0,88617	0,40080	4,05	0,90704	0,25162	5,75	0,92552	0,18651
0,7	1,26582E+00	1,85117E+00	2,4	0,88648	0,39345	4,1	0,90768	0,24902	5,8	0,92597	0,18512
0,75	1,19064	1,61077	2,45	0,88685	0,38642	4,15	0,90831	0,24647	5,85	0,92641	0,18375
0,8	1,13300	1,42816	2,5	0,88726	0,37967	4,2	0,90894	0,24398	5,9	0,92685	0,18240
0,85	1,08796	1,28542	2,55	0,88772	0,37319	4,25	0,90956	0,24154	5,95	0,92729	0,18107
0,9	1,05218	1,17111	2,6	0,88821	0,36696	4,3	0,91017	0,23915	6	0,92772	0,17977
0,95	1,02341	1,07769	2,65	0,88873	0,36097	4,35	0,91078	0,23682	6,05	0,92815	0,17848
1	1,00000	1,00000	2,7	0,88928	0,35520	4,4	0,91138	0,23453	6,1	0,92857	0,17721
1,05	0,98079	0,93440	2,75	0,88986	0,34963	4,45	0,91198	0,23229	6,15	0,92898	0,17596
1,1	0,96491	0,87828	2,8	0,89045	0,34427	4,5	0,91257	0,23009	6,2	0,92940	0,17473
1,15	0,95170	0,82971	2,85	0,89106	0,33909	4,55	0,91316	0,22793	6,25	0,92980	0,17351
1,2	0,94066	0,78724	2,9	0,89169	0,33408	4,6	0,91374	0,22582	6,3	0,93021	0,17232
1,25	0,93138	0,74977	2,95	0,89233	0,32924	4,65	0,91431	0,22375	6,35	0,93061	0,17113
1,3	0,92358	0,71644	3	0,89298	0,32455	4,7	0,91488	0,22172	6,4	0,93100	0,16997
1,35	0,91699	0,68657	3,05	0,89364	0,32001	4,75	0,91544	0,21973	6,45	0,93139	0,16882
1,4	0,91142	0,65964	3,1	0,89431	0,31561	4,8	0,91600	0,21778	6,5	0,93178	0,16769
1,45	0,90672	0,63522	3,15	0,89498	0,31135	4,85	0,91655	0,21586	6,55	0,93216	0,16657
1,5	0,90275	0,61294	3,2	0,89565	0,30721	4,9	0,91710	0,21397	6,6	0,93254	0,16547
1,55	0,89939	0,59252	3,25	0,89633	0,30319	4,95	0,91764	0,21212	6,65	0,93292	0,16439
1,6	0,89657	0,57372	3,3	0,89702	0,29929	5	0,91817	0,21031	6,7	0,93329	0,16332
1,65	0,89421	0,55635	3,35	0,89770	0,29550	5,05	0,91870	0,20853	6,75	0,93366	0,16226
1,7	0,89224	0,54024	3,4	0,89838	0,29181	5,1	0,91922	0,20677	6,8	0,93402	0,16121

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

F(i)

