

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohammed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي  
Institut de maintenance et sécurité industrielle

**Département Maintenance en Instrumentation**

## **Mémoire de fin d'étude**

Pour l'obtention de diplôme Master

**Filière :** Génie Industriel

**Spécialité :** Ingénierie de la maintenance en instrumentation

### **Thème**

**Etude de maintenance basée sur la  
fiabilité de la turbine à gaz GT26**

Présenté et soutenu publiquement par :

**MILOUD ALI Mohammed Walid**

et

**ZIGZAOUI Bilel**

**Devant le jury composé de :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Qualité</b>
BOUCHAALA Abdelghani	MCB	IMSI-Université d'Oran 2	<b>Président</b>
AOUIMER Yamina	MAA	IMSI-Université d'Oran 2	<b>Encadreur</b>
ARBI Maachia	MAA	IMSI-Université d'Oran 2	<b>Examineur</b>

## *Remerciements*

*Tout d'abord, nous remercions Dieu tout-puissant qui nous a donné la force, le courage et la volonté d'atteindre tous nos objectifs, et tous les enseignants qui ont contribué à notre composition dans tous les cycles.*

*Nous tenons à remercier avec une gratitude particulière*

*A Notre encadreur **Mme.AOUIMER Yamina***

*Qui nous a guidés, encouragés et soutenus tout au long de notre travail.*

*Nous tenons également à remercier les membres du jury de nous avoir fait*

*l'honneur d'avoir accepté dévaluer notre travail.*

*Nos remerciements s'adressent aussi, à tous les travailleurs de « S.K.E » qui ont*

*facilité notre stage pour la réalisation de ce travail.*

*Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à*

*l'accomplissement de notre travail.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à l'âme de mes parents « Hadj Miloud » et « Nakhla »*

*(رحمهم الله)*

*J'aurais souhaité que vous soyez tous les deux avec moi aujourd'hui pour  
compléter mon bonheur.*

*Je dédié ce modeste travail à :*

*Mes frères : Farouk, Abderrezak , Abdelkader*

*Mes sœurs : Nadia , Djihad , Zahia*

*Ma tante : Bedra*

*pour leurs soutient morale et financier dans les moments les plus difficiles.*

*A mes amis et mes collègues de la promotion 2023 :*

*Bilel , Chemsou , Abdelatif , Aziz , farid , faycel, maamar, Abdelhamid, malik,*

*yasser ,houcin , mehdi, hamid, smail, lakhdar , dayaa, walid, oussama*

*Sana , Mouchira, djihene, romaissa, mimi , hanane*

*A tout ce qui m'ont aidé du prés ou du loin durant les moments difficiles.*

**Walid MILOUD ALI**

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail*

*À mes parents bien-aimés,*

*Votre amour, votre soutien et votre guidance ont joué un rôle essentiel dans ma vie. Papa, ta force et ta sagesse m'ont inspiré, tandis que maman, ton amour inconditionnel et ta bienveillance ont été mon roc. Votre amour mutuel est un exemple puissant pour moi. Merci d'avoir été là à chaque étape de ma vie et de m'avoir encouragé à atteindre de nouveaux sommets. Je vous aime profondément.*

*Avec tout mon amour,*

*À mes grandes sœurs Zhor, Djamila, Fatima, je vous remercie de m'avoir soutenu au fil des années*

*À mon grand frère Bouhedjar qui a été mon pilier sans jamais flancher  
À mes neveux et nièces, je leur souhaite le bonheur et la réussite dans leur vie  
À ma grand-mère Halima que j'aime, je te souhaite un bon rétablissement et une longue vie.*

*À mon binôme Walid qui s'est dévoué corps et âme à ce mémoire, jamais je ne te remercierai assez.*

*À ma deuxième mère Djamila, merci pour le soutien.*

*À mes plus proches amis Meziane, Zaki, Kébir, Mehdi Tayeb mon cousin Moatassim, Abdennebi, Zdahmed Mustapha, avec qui j'ai passé de merveilleuses années, sans oublier, Amine, Fethi, Reda, Ali, Ferial, Chemsou, Mehdi Bouhmidi, Houcine, Yasser, Hocine, Imed, Mohamed Fellah, Oussama, Abdelrezzak Boucena, Abdelatif, Malik.*

*À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin durant les moments difficiles.*

***Bilel ZIGZAoui***

# SOMMAIRE

Introduction générale :.....	1
------------------------------	---

## Chapitre I : Généralité sur la maintenance

I.1. Introduction :.....	4
I.2. Historiques de la Maintenance :.....	4
I.3. Définition de la maintenance : .....	5
I.4. Le rôle de maintenance :.....	5
I.5. Objectifs de la maintenance : .....	6
I.6. Stratégie de maintenance : .....	7
I.7. Les niveaux de maintenance : .....	7
I.8. Concepts de maintenances : .....	7
I.9. Classification des types de maintenance : .....	8
I.9.1. Maintenance corrective :.....	8
I.9.2. Maintenance préventive :.....	9
I.10. Conclusion : .....	12

## Chapitre II : Les lois de la fiabilité

II.1. Introduction : .....	14
II.2. La maintenance basée sur la fiabilité : .....	14
II.2.1. Historique de MBF :.....	14
II.2.2. Définition de MBF :.....	15
II.2.3. Objectifs de MBF :.....	15
II.3. La Fiabilité :.....	16
II.3.1. Définition selon AFNOR :.....	16
II.3.2. Fonction de fiabilité $R(t)$ : .....	16
II.3.3. Fonction de répartition : .....	16
II.3.4. Densité de probabilité :.....	17
II.4. Défaillance :.....	17
II.4.1. Définition de défaillance : .....	17
II.4.2. Différents types de défaillances : .....	18
II.4.3. Classification en fonction de la rapidité de manifestation :.....	18
II.4.4. Classification en fonction de leur amplitude : .....	18
II.4.5. Classification en fonction des causes : .....	18
II.4.6. Taux de défaillance : .....	19
II.5. Indicateurs de maintenance : .....	20
II.6. Les lois de fiabilité : .....	21
II.6.1. Méthode de Pareto (« ABC » OU « 20/80 ») .....	21

II.6.2. La loi de weibull :	22
II.6.3. La loi exponentielle :	25
II.7. Conclusion :	25

### **Chapitre III : Le turbine à gaz GT 26**

III.1. Introduction :	27
III.2. Le centrale électrique de l'unité « S.K.E »:	27
III.2.1. Présentation de l'entreprise :	27
III.2.2. Localisation géographique :	28
III.2.3. Objectif de la centrale :	29
III.2.4. Alimentation de la centrale :	29
III.3. Généralités sur les turbines :	29
III.3.1. Turbine à gaz :	30
III.3.2. Turbine à vapeur :	34
III.4. La turbine à Gaz GT26 :	37
III.4.1. Description de TAG GT26 :	37
III.4.2. Les composants de la turbine à gaz gt26 :	38
III.4.3. La mise en marche de la TAG GT26 :	39
III.4.4. Entretien de la TAG GT26:	40
III.4.5. Lubrification de la TAG GT26:	41
III.4.6. Les pannes possibles :	42
III.5. Conclusion :	44

### **Chapitre IV : Analyse de la fiabilité de TAG GT26**

IV.1. Introduction :	46
IV.2. Etude de la fiabilité de la turbine gt26 :	46
IV.3. Calcul temps de bon fonctionnement :	47
IV.3.1. Classement de TBF calcul F (ti) :	47
IV.4. Estimation des paramètres de la loi Weibull ( $\eta, \beta, \gamma$ ) :	48
IV.4.1. Présentation générale de Minitab :	48
IV.4.2. L'environnement de Minitab :	48
IV.4.3. Examen de la feuille de travail :	49
IV.4.4. Représentation graphique des données :	50
IV.4.5. Etude de la loi de Weibull :	51
IV.4.6. Test de Kolmogorov-Smirnov:	53
IV.5. Calcul la fiabilité de la TAG G26 :	54
IV.5.1. Calcul de R(t), F(t), $\lambda(t)$ :	55
IV.5.2. La fiabilité R(t) :	55
IV.5.3. La fonction de répartition :	56

IV.5.4. Taux de défaillance :.....	56
IV.5.5. Densité de probabilité de défaillance :.....	57
IV.5.6. Etude de maintenabilité :.....	58
IV.5.7. Etude de disponibilité instantanée : .....	60
IV.6. Conclusion : .....	61

## LISTE DES FIGURE

Figure 1. <i>Classification des types de la maintenance</i> .....	8
Figure 2. <i>Maintenance systématique réalisée à intervalles constants</i> .....	11
Figure 3. <i>Maintenance préventive conditionnelle</i> .....	11
Figure 4. <i>Maintenance préventive prévisionnelle</i> .....	12
Figure 5. <i>Fonction de fiabilité et réparation</i> .....	17
Figure 6. <i>Taux de défaillance <math>\lambda(t)</math> en fonction du temps</i> .....	19
Figure 7. <i>Diagramme des temps moyens</i> .....	20
Figure 8. <i>Diagramme de pareto "ABC"</i> .....	22
Figure 9. <i>Représentation sur graphique à échelle fonctionnelle de la distribution de Weibull (graphique d'Allan Plait)</i> .....	23
Figure 13. <i>Centrale électrique à cycle combiné TERGA (1200 MW)</i> .....	28
Figure 14. <i>La géographie de centrale TERGA</i> .....	28
Figure 15. <i>Classification des turbines</i> .....	30
Figure 16. <i>Turbine à gaz</i> .....	31
Figure 17. <i>Schéma d'une turbine à gaz mono-arbre</i> .....	32
Figure 18. <i>Schéma d'une turbine à gaz deux arbres</i> .....	33
Figure 19. <i>Principe de fonctionnement d'une turbine à vapeur</i> .....	34
Figure 20. <i>Turbine à vapeur sans condensation</i> .....	35
Figure 21. <i>Turbine à vapeur à condensation</i> .....	35
Figure 22. <i>Turbine à vapeur à condensation</i> .....	36
Figure 23. <i>Turbine à gaz GT26</i> .....	38
Figure 24. <i>Section verticale du système de combustion séquentielle de la turbine à gaz GT24/GT26</i> .....	39
Figure 25. <i>Ouverture d'une feuille de travail</i> .....	49
Figure 26. <i>Examen d'une feuille de travail</i> .....	49
Figure 27. <i>Représentation graphiques des données</i> .....	50
Figure 28. <i>Analyse de répartition</i> .....	51
Figure 29. <i>Estimation des données</i> .....	52
Figure 30. <i>Papier de WeiBull en logiciel Minitab</i> .....	53
Figure 31. <i>La Courbe De la Fonction Fiabilité</i> .....	55
Figure 32. <i>La Courbe De Fonction Répartition</i> .....	56
Figure 33. <i>Le courbe taux de défaillance</i> .....	57
Figure 34. <i>La Courbe de la densité de probabilité de défaillance</i> .....	58
Figure 35. <i>La courbe de la maintenabilité</i> .....	59
Figure 36. <i>Disponibilité instantané</i> .....	60

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. <i>Les pannes possibles de la turbine à gaz GT26</i> .....	43
Tableau 2. <i>historique des pannes de TAG GT26</i> .....	47
Tableau 3. <i>Classement de TBF calcul <math>F(t_i)</math></i> .....	47
Tableau 4. <i>Les différentes valeurs utilisées pour la distribution de Weibull</i> .....	54
Tableau 5. <i>Calcul de la fiabilité</i> .....	55
Tableau 6. <i>Fonction de répartition <math>F(t)</math></i> .....	56
Tableau 7. <i>Calcul le taux de défaillance</i> .....	56
Tableau 8. <i>Calcul la fonction de la densité de probabilité</i> .....	57
Tableau 9. <i>Etude de maintenabilité</i> .....	59
Tableau 10. <i>Disponibilité instantané</i> .....	60

## LISTE DES ABREVIATIONS

**AFNOR** : Agence Française de NORmalisation.

**MTBF** : Mean Time Between Failure (temps moyen entre deux défaillances)

**MTTF** : Mean Time To first Failure (temps moyen de bon fonctionnement avant la première défaillance)

**MBF** : La maintenance basée sur la fiabilité

**MSG**: Maintenance Steering Group

**RCM**: Reliability Centered Maintenance

**OMF** : Optimisation de la maintenance par la fiabilité

**MUT** (Mean Up Time) : durée moyenne de bon fonctionnement après réparation

**MDT** (Mean Down Time) : durée moyenne de défaillance comprenant la détection de la panne, la durée d'intervention, le temps de la réparation et le temps de remise en service.

**MTTR** (Mean Time To Repair) : temps moyen de réparation.

**TAG GT 26** : La turbine à gaz gt26

**TBF** : Temps de bon fonctionnement

**TTR** : Moyenne des temps de réparation

**$\mu$** : Taux de réparation

**$\eta$**  : Paramètre d'échelle

**$\beta$**  : Paramètre de forme

**$\gamma$**  : Paramètre de position

**R (t)** : la fiabilité

**$\lambda$** : taux de défaillance

**$f(t)$** : Densité de probabilité de défaillance

**M(t)** : la maintenabilité

**D(t)** : la disponibilité

## Résumé :

La maintenance basée sur la fiabilité est une approche proactive de gestion de la maintenance visant à prévenir les défaillances et à maximiser la disponibilité des équipements. Au lieu de suivre un calendrier préétabli, cette approche se fonde sur les données de fiabilité et les informations en temps réel pour prendre des décisions de maintenance préventive.

L'objectif de notre travail est d'étudier la maintenance de la turbine. Nous calculons les paramètres de la distribution de Weibull à l'aide du logiciel Minitab, puis les testons à l'aide du test de Kolmogorov-Smirnov. Nous examinons également la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité de la turbine.

**Mots clés :** fiabilité, turbine, weibull, maintenabilité, disponibilité.

## ملخص:

الصيانة المعتمدة على الموثوقية هي نهج استباقي لإدارة الصيانة يهدف إلى منع الأعطال وزيادة توافر المعدات إلى أقصى حد. بدلاً من اتباع جدول محدد مسبقاً ، يعتمد هذا النهج على بيانات الموثوقية والمعلومات في الوقت الفعلي لاتخاذ قرارات الصيانة الوقائية

الهدف من عملنا هو دراسة صيانة التوربين. نحسب معالمات توزيع Weibull باستخدام برنامج Minitab ثم نختبرها باستخدام اختبار Kolmogorov-Smirnov نحن ننظر أيضاً إلى موثوقية التوربين وقابليته للصيانة وتوافره.

**الكلمات المفتاحية:** الموثوقية ، التوربينات ، ويبل ، الصيانة ، التوفر .

## Abstract:

Reliability-centered maintenance is a proactive approach to maintenance management that aims to prevent failures and maximize equipment availability. Instead of following a predetermined schedule, this approach relies on reliability data and real-time information to make preventive maintenance decisions.

The objective of our work is to study turbine maintenance. We calculate the parameters of the Weibull distribution using Minitab software, and then test them using the Kolmogorov-Smirnov test. We also examine the reliability, maintainability, and availability of the turbine.

**Keywords:** reliability, turbine, Weibull, maintainability, availability.

---

# Introduction générale

---

### Introduction générale :

La maintenance est un facteur concurrentiel puisqu'il influe sur la production, la qualité et la dépense. Il est important d'augmenter l'espérance de vie et les actifs de l'entreprise. Il est devenu de plus en plus important et s'est avéré être l'une des fonctions clés de l'entreprise. Alors que les tendances vers un degré plus élevé d'automatisation et une complexité accrue de la machine ne font qu'accroître le besoin de l'entreprise d'une approche formelle et structurée de la fonction de maintenance.

Dans les entreprises industrielles, le plan de maintenance fourni par le constructeur avec les équipements est souvent standard, ce qui peut ne pas répondre de manière économique ou satisfaisante aux exigences spécifiques de la charge de travail des machines. C'est pourquoi il est essentiel d'adopter une approche plus optimisée et proactive pour assurer la fiabilité des équipements. La maintenance basée sur la fiabilité est un processus utilisé pour élaborer un plan de maintenance préventive qui vise à réduire la probabilité de défaillance fonctionnelle. Ce travail de recherche se concentre sur l'amélioration de la politique de maintenance dans un chantier d'ammoniac, en identifiant en premier lieu les équipements critiques ayant des répercussions significatives sur l'entreprise, telles que la sécurité, la disponibilité, la fiabilité et la maintenabilité. Il est essentiel de reconnaître que la maintenance joue un rôle concurrentiel crucial, car elle influence la production, la qualité et les dépenses d'une entreprise. De plus, avec l'automatisation croissante et la complexité accrue des machines, une approche formelle et structurée de la fonction de maintenance devient de plus en plus importante. En augmentant la disponibilité et la fiabilité des équipements de production, en réduisant les pannes grâce à des interventions périodiques et en maintenant un niveau de sécurité adéquat, la maintenance contribue également à la réduction des accidents. Ainsi, pour améliorer la production, il est nécessaire d'analyser quantitativement et qualitativement les systèmes de toutes les entreprises industrielles, en utilisant des techniques et des méthodes d'analyse visant à accroître la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité des équipements, et à améliorer globalement les performances des systèmes de production. En outre, il est important de comprendre la différence entre l'entretien et la maintenance, ainsi que d'étudier les concepts de maintenance ancienne et moderne pour mettre en place une approche adaptée et efficiente.

## Introduction générale

---

Le travail effectué dans ce mémoire est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente une description générale sur la gestion de la maintenance et ses différentes méthodes.

Le deuxième chapitre présente le MBF et les lois mathématiques de fiabilité.

Le troisième chapitre présente une généralité sur les turbines et description générale de la turbine à gaz GT26.

Enfin, le quatrième chapitre est une application d'un cas réel dont le but est de valider notre recherche sur la fiabilité de turbine à gaz.

# **Chapitre I**

---

## **Généralité sur la maintenance**

---

## I.1. Introduction :

Aujourd'hui, il ne s'agit pas seulement de réparer est prévenir, il faut aussi savoir empêcher de tomber en panne, plus qu'une simple technique d'intervention efficace sur le fonctionnement, la maintenance est devenue une technique d'anticipation, d'organisation et de gestion.

La maintenance industrielle, qui a pour but d'assurer le bon fonctionnement des outils de production, est une fonction stratégique dans les entreprises. Intimement liée au continuuel développement technologique, à l'apparition de nouvelles méthodes et organisations, à la nécessité de réduire les coûts de production, elle est en constante évolution.

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord rappeler des notions et généralités sur la maintenance; définition, rôle, objectifs, et type de maintenance.

## I.2. Historiques de la Maintenance :

Avant la révolution industrielle, la maintenance était principalement assurée par des artisans, tels que des menuisiers, forgerons ou maçons, qui réparaient les bâtiments, machines et moyens de transport de l'époque [1].

Les défaillances étaient réparées par la fabrication de nouvelles pièces ou la réparation de l'ancienne, et la conception et la réparation étaient fortement intégrées. Les approches de maintenance ont évolué à partir de la révolution industrielle, avec l'apparition progressive de concepts tels que les pièces de rechange et l'augmentation de la complexité des machines à maintenir.

Jusqu'en 1940, seule la maintenance corrective était pratiquée et considérée comme un coût inévitable. Pendant la Seconde Guerre mondiale, la maintenance préventive a été largement pratiquée, en particulier par les Allemands, qui ont accordé une importance stratégique à la maintenance.

Depuis les années 1950, les modèles de recherche opérationnelle ont été utilisés pour étudier et optimiser les politiques de maintenance [2].

Dans les années 1970, des approches plus intégrées de la maintenance ont émergé, en reconnaissant le lien direct entre la fiabilité et la maintenabilité. Le coût de la maintenance est devenu un composant important du coût global du cycle de vie, en particulier dans l'aviation civile aux États-Unis et avec la pratique de la maintenance productive totale au Japon[3].

Dans les années 1990, des insuffisances ont été observées dans les pratiques de maintenance. Elle ne devrait pas être considérée uniquement dans un contexte opérationnel, mais également en prenant en compte les retombées économiques et les normes nationales et internationales de plus en plus exigeantes. Cette évolution a conduit à diverses pratiques de maintenance en entreprise.

### I.3. Définition de la maintenance :

Selon la norme **AFNOR NF-X 60 000**, la maintenance est « l'ensemble des activités ayant pour objectif de maintenir ou rétablir un bien dans un état spécifié de fonctionnement pour établir une fonction requise. ».

Le document d'introduction à la maintenance vient compléter la définition de l'AFNOR en précisant que : « Le document d'introduction à la maintenance vient compléter la définition de l'AFNOR en précisant que ».

Notons que les actions de maintenance ne sont pas seulement techniques : l'action technique est encadrée, piloté par des actions de gestion (économie et administration) et de management, ce qui implique une large polyvalence. On remarque dans cette terminologie la notion suivante :

- **Maintenir** : contient la notion de « surveillance » et « prévention » sur bien en fonctionnement normal.
- **Rétablir** : contient la notion de « correction » consécutive à une perte de fonction.
- **État spécifié** ou **service déterminé** : implique la prédétermination d'objectif à atteindre, avec quantification des niveaux caractéristiques.
- **Coût optimal** : qui conditionne l'ensemble des opérations dans un souci d'efficacité [4].

### I.4. Le rôle de maintenance :

Pendant longtemps, la maintenance est considérée par les gestionnaires plus comme une fatalité qu'un ensemble d'activités ayant pour d'accomplir toutes les tâches nécessaires pour que l'équipement soit maintenu ou rétabli dans un état spécifié ou en mesure de :

- Permettre une exécution normale des opérations dans les meilleures conditions de coûts, de sécurité et de qualité (le cas de la production) ;
- Obtenir un service dans les meilleures conditions de confort et de coût (c'est le cas, par exemple, des services vendus en général mais surtout des transports, des hôpitaux).

Donc pour nous, entretenir, consiste à dépanner, réparer, réaliser des opérations préventives dont le but principal est d'assurer le fonctionnement de l'outil de production d'une manière globale entretenir c'est subir. Outre cela le progrès technologique ainsi que l'évolution de la conception de la gestion des entreprises ont fait que la maintenance est devenue de nos jours une fonction importante de l'entreprise dont le rôle dans l'atteinte des objectifs de l'entreprise est loin d'être négligeable. Donc la fonction maintenance est l'affaire de tous et doit être omniprésent dans les entreprises et les services. Elle est devenue un enjeu économique considérable pour tous les pays qui souhaitent disposer d'outils de production disponibles, performants. Si l'entretien ne se traduisait que par des interventions, nous pouvons dire que la maintenance est tout autre chose. C'est d'abord un état d'esprit, une manière de penser, ensuite une discipline nouvelle dotée de moyens permettant d'intervenir dans de meilleures conditions, d'appliquer les différentes méthodes en optimisant le coût global. La maintenance vise à éviter les pannes et les temps morts que celles-ci entraînent. La maintenance ne doit pas être perçue comme une fonction secondaire et elle doit bénéficier de toute l'attention voulue. Actuellement la modernisation de l'outil de production impose une évolution fondamentale dans le domaine de maintenance. Cette évolution se traduit par un changement profond pour les entreprises (remplacement de la fonction entretien par la fonction maintenance), par une évolution de mentalités. Cette mutation nécessite des structures nouvelles, des moyens nouveaux et pour le personnel un état d'esprit « Maintenance » [5].

### **I.5. Objectifs de la maintenance :**

L'objectif est d'assurer la disponibilité des équipements de production tout en réduisant les pannes, car celles-ci entraînent :

- Coûts de maintenance (intervention)
- Coûts d'indisponibilité (non production)
- Problèmes de sécurité (biens et personnes)

La maintenance intègre également :

- Amélioration de la sécurité des biens et des personnes,
- Intégration de nouveaux biens,
- Organisation des activités de maintenance
- L'animation et l'encadrement des équipes d'intervention [6]

## I.6. Stratégie de maintenance :

La stratégie de maintenance est une méthode de management utilisée en vue d'atteindre les objectifs de maintenance. Les choix de stratégie de maintenance permettent d'atteindre un certain nombre d'objectifs de maintenance :

- Développer, adapter ou mettre en place des méthodes de maintenance.
- Elaborer et optimiser les gammes de maintenance.
- Organiser les équipes de maintenance.
- Internaliser et/ou externaliser partiellement ou totalement les tâches de maintenance.
- Définir, gérer et optimiser les stocks de pièces de rechange et de consommables.
- Etudier l'impact économique (temps de retour sur investissement) de la modernisation ou de l'amélioration de l'outil de production en matière de productivité et de maintenabilité [7].

## I.7. Les niveaux de maintenance :

**Niveaux 1 :** Réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement, ou échanges d'éléments consommables accessibles en toute sécurité, tels que voyants ou certains fusibles, etc.

**Niveaux 2 :** Dépannages par échange standard des éléments prévus à cet effet et opérations mineures de maintenance préventives, telles que graissage ou contrôle du bon fonctionnement.

**Niveaux 3 :** Identification et diagnostic des pannes, réparations par échange de composants ou éléments fonctionnels, réparations mécaniques mineures, et toutes opérations courantes de maintenance préventive telles que réglage général, réalignement des appareils de mesure.

**Niveaux 4 :** Tous les travaux importants de maintenance corrective ou préventive à l'exception de la rénovation et de la reconstruction. Ce niveau comprend aussi le réglage des appareils de mesure utilisés pour la maintenance, et éventuellement la vérification des étalons de travail par les organismes spécialisés.

**Niveaux 5 :** Rénovation, reconstruction ou exécution des réparations confiées à un atelier central ou à une unité extérieure [8].

## I.8. Concepts de maintenances :

L'analyse des différentes formes de maintenance repose sur 4 concepts :

**a. Les événements à l'origine de l'action** : il s'agit des facteurs qui déclenchent l'action de maintenance, comme un échéancier, un diagnostic automatique, une information de capteur, une mesure d'usure ou une défaillance.

**b. Les méthodes de maintenance** : ces méthodes sont associées à chaque type d'événement de maintenance. Il existe trois types de méthodes de maintenance : la maintenance préventive systématique, la maintenance préventive conditionnelle et la maintenance corrective.

**c. Les opérations de maintenance** : ce sont les actions concrètes effectuées pendant la maintenance, telles que l'inspection, le contrôle, le dépannage, la réparation, etc.

**d. Les activités connexes** : il s'agit de toutes les autres activités liées à la maintenance, telles que l'amélioration de la maintenance, la rénovation, la reconstruction, la modernisation, les travaux neufs et la sécurité [9].

### I.9. Classification des types de maintenance :

Les stratégies de classification de maintenance peuvent être répertoriées en deux grandes catégories : **la maintenance corrective** et **la maintenance préventive**, comme il est montré sur la (figure 1) [10].

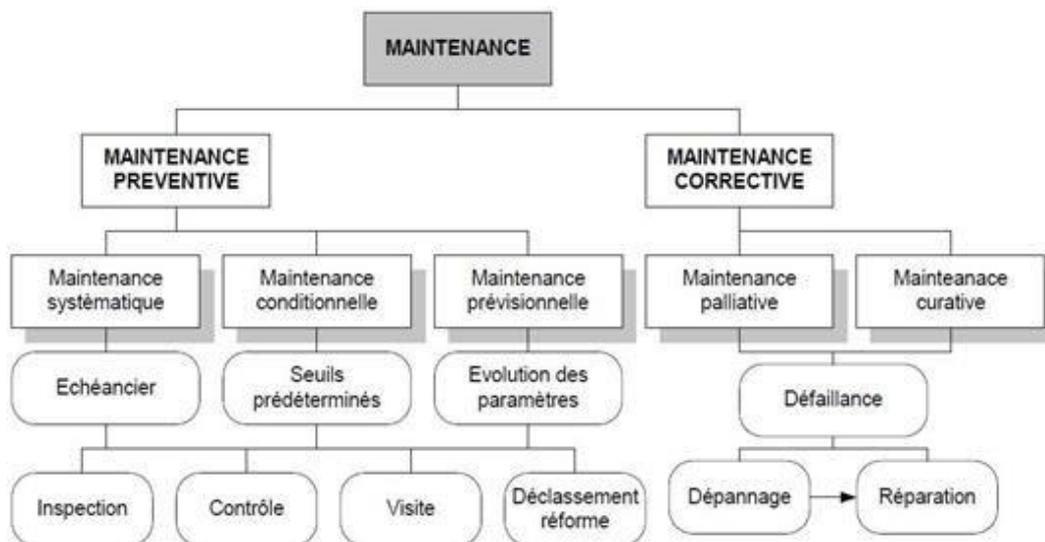


Figure 1. Classification des types de la maintenance

#### I.9.1. Maintenance corrective :

C'est « l'ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement : ces activités comportent notamment la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification, le contrôle du bon fonctionnement ».

### I.9.1.1. Les opérations de la maintenance corrective :

Les opérations de la maintenance corrective fait donc apparaître 5 notions :

- **Dépannage** : la maintenance palliative a le caractère provisoire et la maintenance curative au caractère permanent des actions effectuées.
- **Localisation** : localisation de l'équipement, module ou composant défaillant.
- **Diagnostic** : Identification de la fonction perdue, de la nature de la panne, de sa (ou ses cause(s)).
- **Remise en l'état avec ou sans modification** : la correction inclut-elle l'idée d'amélioration? Pour la palliative c'est non. Pour la curative cela peut-être oui.
- **Contrôle** : Essais de bon fonctionnement.

### I.9.1.2. Les types de maintenance corrective :

On peut distinguer deux types de maintenance corrective : **la maintenance curative** et **la maintenance palliative** [11].

#### a. Maintenance curative :

Ce type de maintenance permet de remettre définitivement en état le système après l'apparition d'une défaillance. Cette remise en état du système est une réparation durable.

#### b. Maintenance palliative :

La maintenance palliative revêt un caractère temporaire, provisoire. Elle est principalement constituée d'opérations qui devront toutefois être suivies d'opérations curatives (réparations).

### I.9.2. Maintenance préventive :

C'est la maintenance qui permet d'éviter la défaillance du matériel pendant son utilisation, l'analyse du cout doit mettre en évidence un grain par rapport à la défaillance qu'elle permet d'éviter.

#### I.9.2.1. Les objectifs de la maintenance préventive :

- Augmenter la durée de vie des matériels.
- Diminuer la probabilité des défaillances en service.
- Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne.
- Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective.
- Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions.
- Éviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, de pièces détachées, etc.

- Améliorer les conditions de travail du personnel de production.
- Diminuer le budget de maintenance.
- Supprimer les causes d'accidents graves.

### **I.9.2.2. Les opérations de la maintenance préventive :**

Elles peuvent être regroupées en 3 familles : les inspections, les contrôles, les visites. Elles permettent de maîtriser l'évolution de l'état réel du matériel. Elles peuvent être effectuées de manière continue ou à des intervalles, prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage [12].

**L'inspection** : Activité de surveillance s'exerçant dans le cadre d'une mission définie. Elle n'est pas obligatoirement limitée à la comparaison avec des données préétablies. Pour la maintenance, cette activité s'exerce notamment au moyen des rondes. Ex : inspection des extincteurs, écoute de bruits dans un compresseur. Les activités d'inspection sont en général exécutées sans outillage spécifique et ne nécessitent pas d'arrêt de l'outil de production ou des équipements.

**La visite** : Opération de maintenance préventive qui se traduit par un examen détaillé et prédéterminé de tout ou partie du bien. Ex : visite périodique des ascenseurs, des équipements entraîner des démontages partiels des éléments à visiter (et donc d'entraîner une immobilisation du matériel) ainsi que des opérations de maintenance corrective.

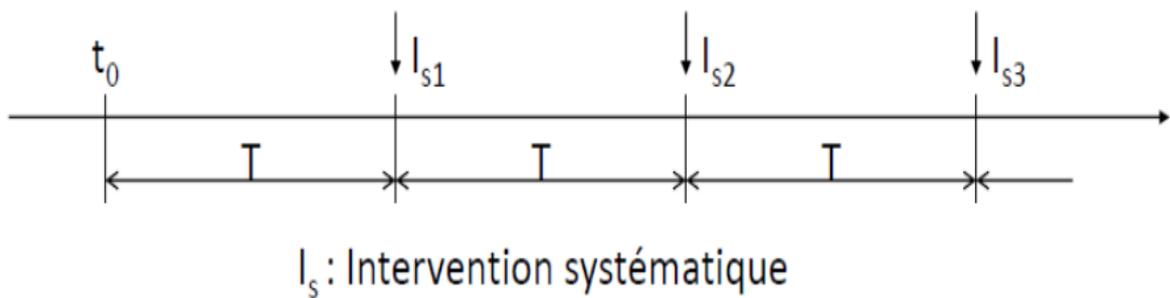
**Le contrôle** : Vérifications de conformité par rapport à des données préétablies, suivies d'un jugement. Ex : contrôle du niveau d'isolement d'une installation BT, contrôle du jeu fonctionnel dans un mécanisme. Le contrôle peut comporter une activité d'information, inclure une décision (acceptation, rejet, ajournement), déboucher sur des actions correctives. La périodicité du contrôle peut être constante (durant la phase de fonctionnement normal du matériel) ou variable (et de plus en plus courte dès que le matériel rentre dans sa phase d'usure).

### **I.9.2.3. Les types de la maintenance préventive :**

#### **a. Maintenance systématique :**

Les activités de maintenance systématique sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage.

L'intervalle  $T$  peut être exprimé en :



**Figure 2.** Maintenance systématique réalisée à intervalles constants

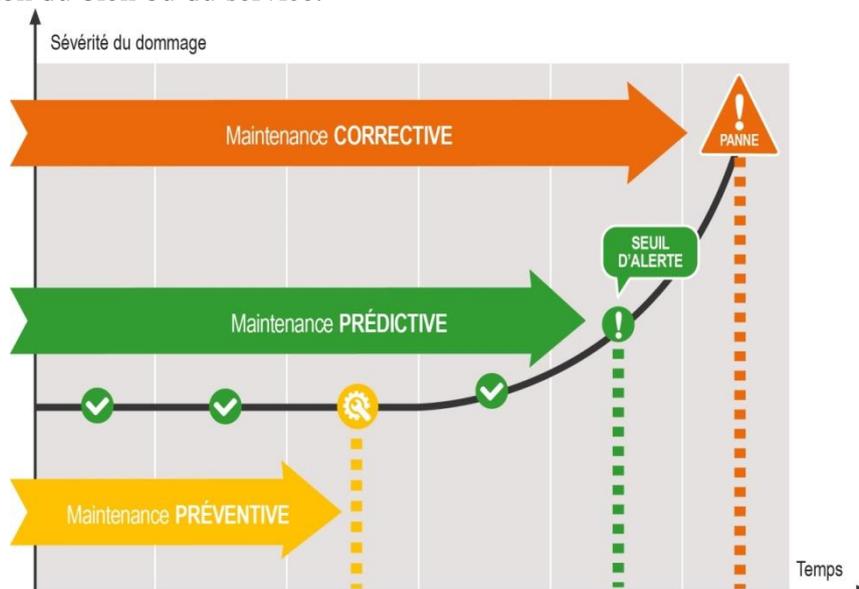
- Temps
- Nombre de cycles
- Distance
- Tonnage

Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision complète ou partielle.

Cette méthode nécessite de connaître :

- Le comportement du matériel
- Les modes de dégradation
- Le temps moyen de bon fonctionnement entre deux avaries

**b. Maintenance conditionnelle** : Les activités de maintenance conditionnelle (prédictive) sont déclenchées suivant des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service.



**Figure 3.** Maintenance préventive conditionnelle

### c. Maintenance prévisionnelle :

Maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien, permettant de retarder et de planifier les interventions.

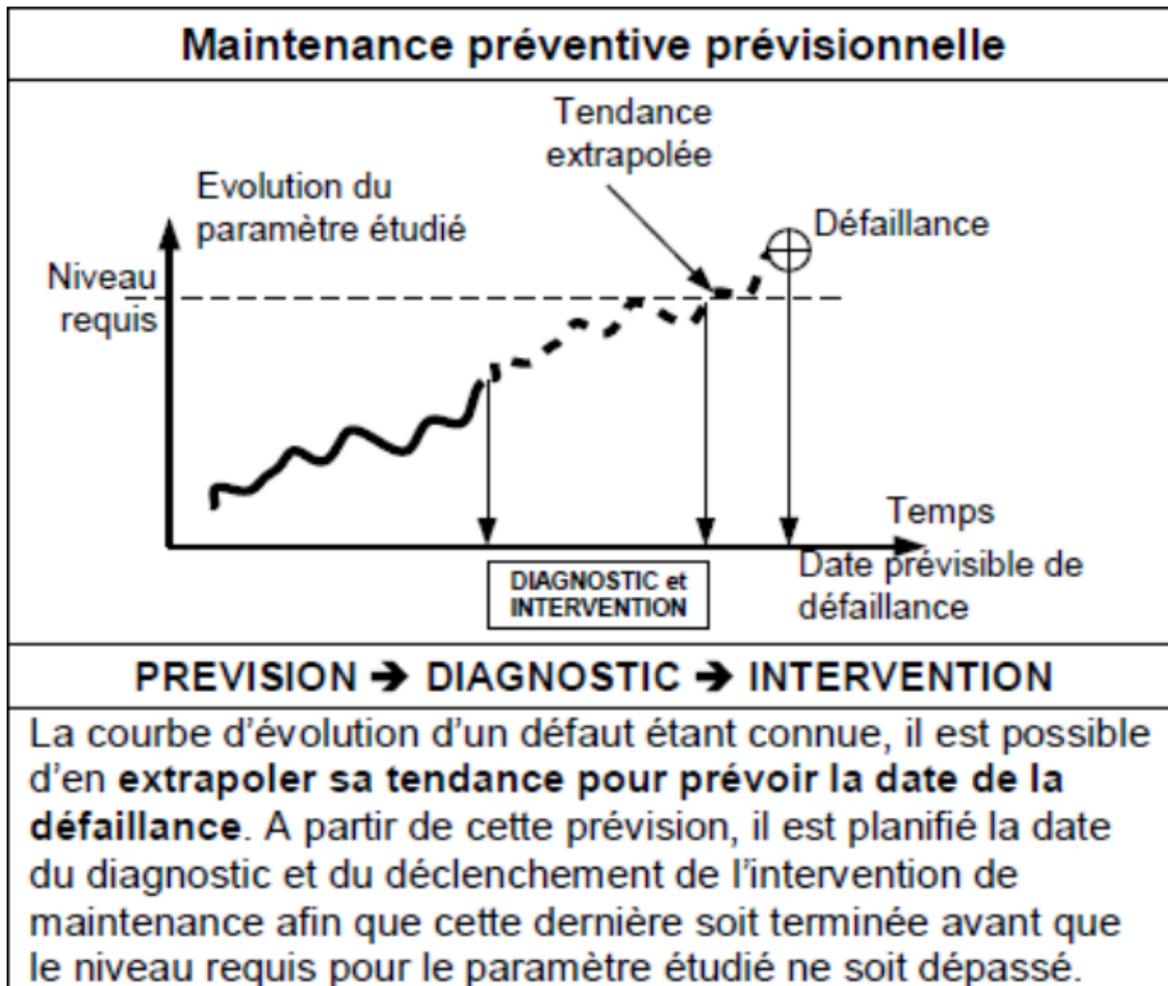


Figure 4. Maintenance préventive prévisionnelle

### I.10. Conclusion :

La maintenance générale est essentielle pour assurer le bon fonctionnement, la durabilité et la fiabilité des équipements, systèmes et infrastructures. Elle englobe des activités telles que la maintenance préventive et corrective, permettant de prévenir les pannes, d'optimiser les performances et de réduire les interruptions de service. Grâce à une stratégie claire, des programmes de maintenance bien définis et l'utilisation de technologies modernes, les organisations peuvent améliorer leur productivité, leur efficacité opérationnelle et leur rentabilité, tout en prolongeant la durée de vie de leurs actifs et en assurant la satisfaction des utilisateurs.

# Chapitre II

---

## Les lois de la fiabilité

---

## II.1. Introduction :

La maintenance basée sur la fiabilité (MBF) est une méthode de maintenance préventive qui vise à améliorer la disponibilité, la fiabilité et la performance des équipements et des systèmes. Elle repose sur une analyse approfondie de la fiabilité des équipements, en prenant en compte leurs modes de défaillance, leurs effets et leurs conséquences sur la production. La MBF permet de planifier les activités de maintenance en fonction du risque associé à chaque équipement, en utilisant des données de fiabilité pour établir des programmes de maintenance adaptés. Elle permet ainsi de réduire les coûts de maintenance, d'optimiser les ressources et d'améliorer la sécurité des travailleurs. La MBF est largement utilisée dans l'industrie pour assurer la disponibilité et la fiabilité des équipements critiques, tels que ceux utilisés dans l'aéronautique, l'industrie pétrolière et gazière, les centrales électriques, les usines chimiques et les équipements de transport.

## II.2. La maintenance basée sur la fiabilité :

### II.2.1. Historique de MBF :

C'est le secteur aéronautique qui a été précurseur en élaborant la méthode MSG (Maintenance Steering Group) à la fin des années 1960 pour définir les programmes de maintenance préventive des avions. Elle est à l'origine de la RCM (Reliability Centered Maintenance) développée aux États-Unis pour l'aviation militaire, puis reprise et adaptée par les exploitants de centrales nucléaires. Une norme de la en a repris les principes sous l'appellation francisée de MBF (Maintenance Basée sur la Fiabilité) pour en assurer une large diffusion à l'ensemble des secteurs industriels. Pour une présentation générale de ces méthodes et de leur historique, on pourra se reporter à l'article « Méthodes d'optimisation des stratégies de maintenance ». C'est en 1990 que, sur la base du MSG et de la RCM, EDF a commencé à développer la méthode d'optimisation de la maintenance par la fiabilité (OMF) pour réviser la maintenance préventive de ses centrales. Les premières études pilotes ont eu des résultats encourageants en montrant la faisabilité et les avantages de cette méthode.

Elles ont donc conduit à prendre la décision de l'appliquer sur une grande échelle à ensemble des installations. Ensuite, l'analyse de nombreux systèmes a permis de démontrer l'intérêt économique de ces études. La méthode n'est pas restée cantonnée au nucléaire et, après avoir subi diverses adaptations, elle a été appliquée aux lignes de transport d'électricité et aux turbines à gaz. Puis la démarche a été complétée pour y inclure une analyse des matériels «passifs» tels que les tuyauteries et les supportages. Cette approche qui tient compte des particularités de ce type de matériel est appelée «OMF-structures ». L'intérêt suscité par ces

développements a fait tache d'huile et la méthode a été à nouveau adaptée pour être appliquée aux centrales conventionnelles, aux micro-turbines à combustion, aux éoliennes, aux aménagements hydrauliques, aux systèmes de compression d'air, etc. Enfin, les principes de l'OMF ont été utilisés pour considérer la maintenance et le soutien logistique dans la phase de conception des futurs réacteurs nucléaires. Les résultats de ces travaux sont devenus des recueils d'informations qui peuvent servir à alimenter de nouvelles études comme par exemple la définition des stocks de pièces de rechange, les effets sur la maintenance de nouveaux modes d'exploitation, la prévision de la durée d'exploitation de matériels ou de systèmes, etc. [13]

### **II.2.2. Définition de MBF :**

La maintenance basée sur la fiabilité (RCM) est un cadre stratégique permettant d'évaluer les besoins en matière de maintenance d'un système dans ses conditions d'exploitation. C'est un mélange de stratégies de maintenance qui peuvent être utilisées pour optimiser les coûts de maintenance et assurer la disponibilité du système. La RCM implique le développement d'activités de maintenance nécessaires sur les ressources physiques dans leur environnement opérationnel pour réaliser leur fiabilité inhérente en incorporant un mélange approprié de méthodes de maintenance réactive, préventive, basée sur l'état et proactive. La RCM peut être utilisée pour développer des programmes de maintenance préventive et améliorer la fiabilité et la disponibilité d'un système [14]. Des recherches récentes ont proposé de nouveaux modèles et méthodes pour la RCM, notamment un modèle robuste à deux étapes pour la planification de la RCM [15].

### **II.2.3. Objectifs de MBF :**

- Optimiser les politiques de maintenance en se concentrant sur la fiabilité de l'équipement.
- Découvrir, évaluer et classer les faiblesses, les anomalies et les origines des causes de dysfonctionnements.
- Chercher les solutions appropriées et les actions correctives pour les éliminer.
- Développer un programme de maintenance préventive optimisé ayant pour but la sûreté de fonctionnement et la sécurité des moyens de production en tenant compte des aspects économiques.
- Mettre en place un plan de maintenance optimisé et une nouvelle organisation de service technique basée sur une démarche participative et une limitation systématique de l'étude aux éléments les plus critiques, adaptée aux besoins et spécificités des PME [16].

### II.3. La Fiabilité :

L'un des éléments clés de la qualité d'un produit est sa fiabilité, qui est considérée comme un critère fondamental dès la phase de conception lors de son élaboration.

#### II.3.1. Définition selon AFNOR :

La fiabilité est l'Aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant un temps donné.

La notion de temps peut prendre la forme :

- De nombre de cycles effectués → machine automatique.
- De distance parcourue → matériel roulant.
- De tonnage produit → équipement de production [11].

#### II.3.2. Fonction de fiabilité $R(t)$ :

Nous introduisons la variable aléatoire  $T$  qui représente le temps écoulé depuis la mise en service du dispositif à l'instant  $t = 0$  jusqu'à l'instant de sa première défaillance. La variable aléatoire  $T$  représente donc la durée de vie du dispositif ou, de manière équivalente, l'instant de sa défaillance.

La variable aléatoire  $T$  est positive, elle est de plus supposée absolument continue.

La fonction de fiabilité est définie par :

$$R(t) = P(T \geq t), t \geq 0 \quad (1)$$

Pour un  $t$  fixé. Elle représente la probabilité de bon fonctionnement du dispositif étudié sur l'intervalle de temps  $[0, t]$ .

La fiabilité est donc une fonction du temps, encore appelée fonction de survie.

Remarque :

$R(t)$  est une fonction monotone décroissante à valeurs dans  $[0,1]$ .

Nous notons  $F(t)$  la fonction de répartition de la variable aléatoire  $T$ . L'absolue continuité de  $T$  nous permet de définir sa densité de probabilité, notée  $f(t)$  [17].

#### II.3.3. Fonction de répartition :

La fonction de répartition de la variable aléatoire  $T$  est :

$$F(t) = P(T < t) = 1 - R(t) \quad (2)$$

Pour un  $t$  fixé, elle représente la probabilité de défaillance à un instant quelconque précédent l'instant  $t$ .

Par définition, on a  $F(t) = 0$  pour  $t < 0$  [17]

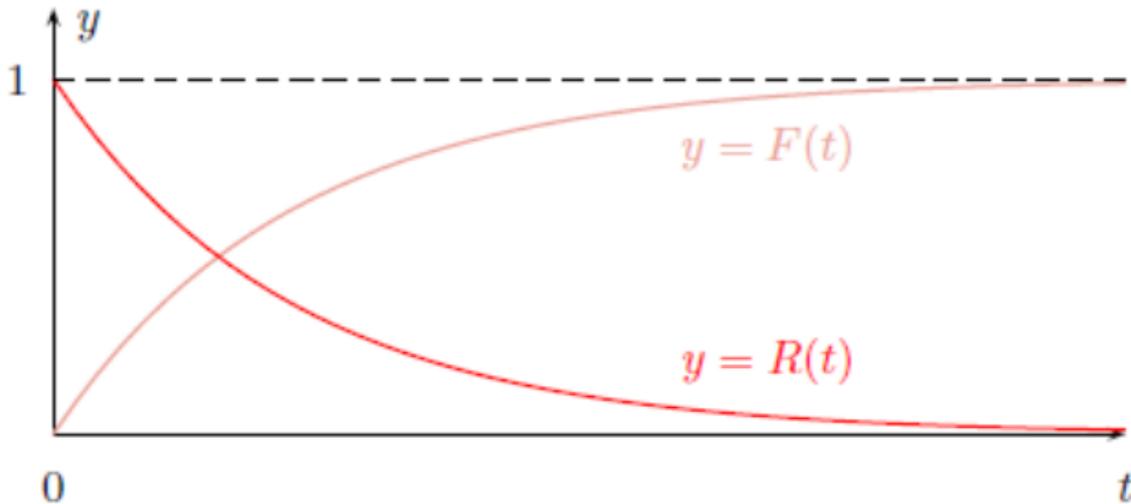


Figure 5. Fonction de fiabilité et réparation

### II.3.4. Densité de probabilité :

La densité de probabilité est une fonction  $f(t) \geq 0$  telle que pour tout  $t \geq 0$ ,

$$F(t) = \int_0^t f(u) du \quad (3)$$

En admettant que la fonction de répartition admette une dérivée au point  $t$ , nous pouvons écrire :

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(u) du = \int_t^{\infty} f(u) du \quad (4)$$

Il en résulte que :

$$f(t) = - \frac{dR(t)}{dt} \quad (5)$$

## II.4. Défaillance :

### II.4.1. Définition de défaillance :

Altération ou cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise. Après défaillance d'une entité, celle-ci est en état de panne. La défaillance est un passage d'une entité d'un état de fonctionnement normal à un état de fonctionnement anormal ou de panne [19].

### II.4.2. Différents types de défaillances :

Afin de mieux comprendre et intervenir efficacement face aux défaillances qui peuvent avoir des causes, manifestations et conséquences très variées, il est essentiel de différencier plusieurs types [19].

### II.4.3. Classification en fonction de la rapidité de manifestation :

**a. Défaillance progressive :** défaillance due à une évolution dans le temps des caractéristiques d'une entité.

**b. Défaillance soudaine :** c'est la défaillance qui ne se manifeste pas par une perte progressive des performances et qui n'aurait pas pu être prévue par un examen ou surveillance antérieurs [19].

### II.4.4. Classification en fonction de leur amplitude :

**a. Défaillance partielle :** c'est la défaillance résultante de déviation d'une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiées mais telle qu'elle n'entraîne pas une disparation complète de la fonction requise.

**b. Défaillance complète :** C'est la défaillance résultante de déviation d'une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiées telle qu'elle entraîne une disparition complète de la fonction requise [19].

### II.4.5. Classification en fonction des causes :

#### **a. Défaillance première :**

Défaillance d'une entité dont la cause directe ou indirecte n'est pas la défaillance d'une autre entité. Généralement une réparation d'une entité est nécessaire pour le remettre en état de fonctionnement.

#### **b. Défaillance seconde :**

Il s'agit d'une situation où une entité tombe en panne en raison de la défaillance directe ou indirecte d'une autre entité qui n'a pas été correctement évaluée et dimensionnée. En général, il est nécessaire de réparer cette entité pour la remettre en état de fonctionnement. Les défaillances d'autres entités, les conditions environnementales spécifiques et les erreurs humaines peuvent également être à l'origine de cette situation.

### c. Défaillance de commande :

Défaillance d'une entité dont la cause directe ou indirecte est la défaillance d'autre entité et pour laquelle cette entité a été qualifiée et dimensionnée. Généralement une réparation d'une entité n'est pas nécessaire pour le remettre en état de fonctionnement. On est présence d'une telle défaillance lorsque l'entité change l'état à la suite de l'émission de signaux de commande ou de contrôle intempestive [19].

### II.4.6. Taux de défaillance :

Prenons maintenant une pièce ayant servi pendant une durée  $t$  et encore survivante. La probabilité qu'elle tombe en panne entre l'âge  $t$  qu'elle a déjà et l'âge  $T + dt$  est représentée par la probabilité conditionnelle qu'elle tombe en panne entre  $T$  et  $T + dt$ , sachant qu'elle a survécu jusqu'à  $T$ . D'après le théorème des probabilités conditionnelles cette probabilité est égale à [20]

$$\lambda(t) = \frac{F(t + dt) - F(t)}{R(t)} = \frac{dF(t)}{1 - F(t)} \quad (6)$$

S'exprime également par l'inverse d'un temps, mais n'est pas une densité de probabilité.

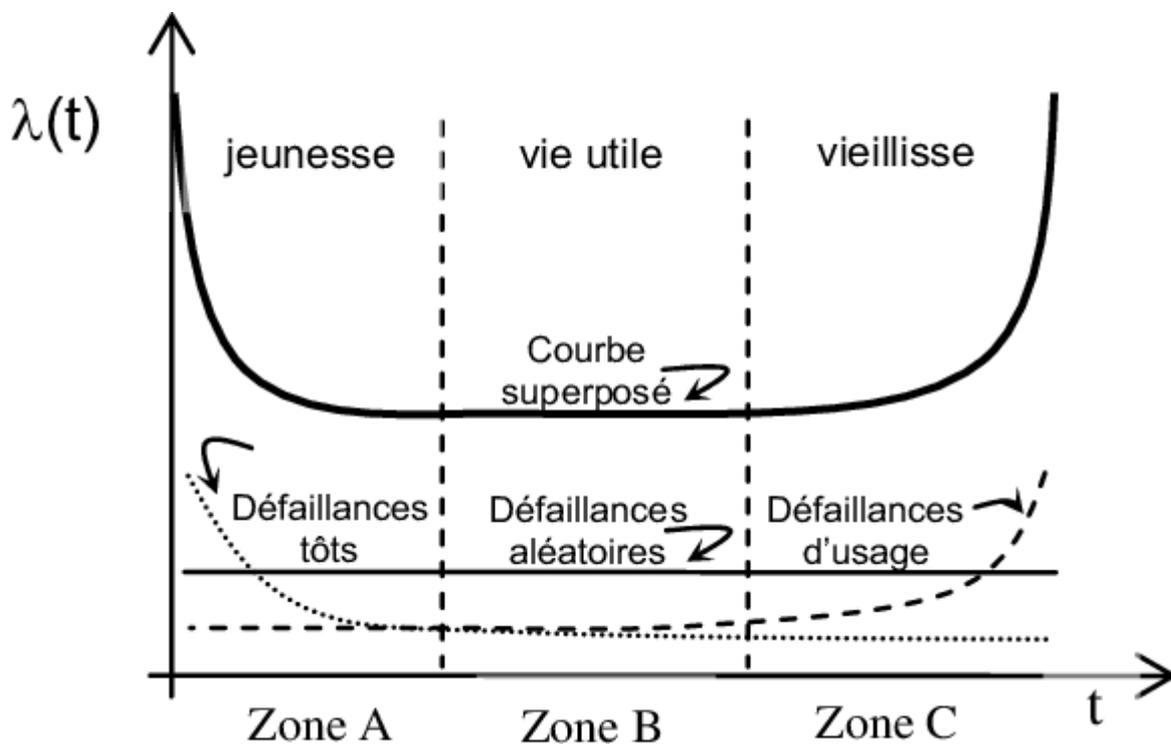


Figure 6. Taux de défaillance  $\lambda(t)$  en fonction du temps

Cette courbe représente trois périodes :

- **La période de jeunesse ou de rodage** : correspond à l'apparition de défaillances, dues à des maux façons ou à des contrôles insuffisants. Dans la pratique, le fabricant procède à un rodage de son matériel afin d'éviter que cette période ne se produise après l'achat du matériel.
- **La période de bon fonctionnement** : dans cette période, le taux d'avaries est sensiblement constant, les avaries surviennent de manière aléatoire et ne sont pas prévisibles par examen du matériel ; ces défaillances sont dues à un grand nombre de causes et sont liées à la fabrication des dispositifs.
- **La période de vieillissement** : le taux d'avaries est croissant, cette période correspond à une dégradation irréversible des caractéristiques du matériel, d'où une usure progressive.

### II.5. Indicateurs de maintenance :

Elles permettent de mesurer les performances de l'équipement

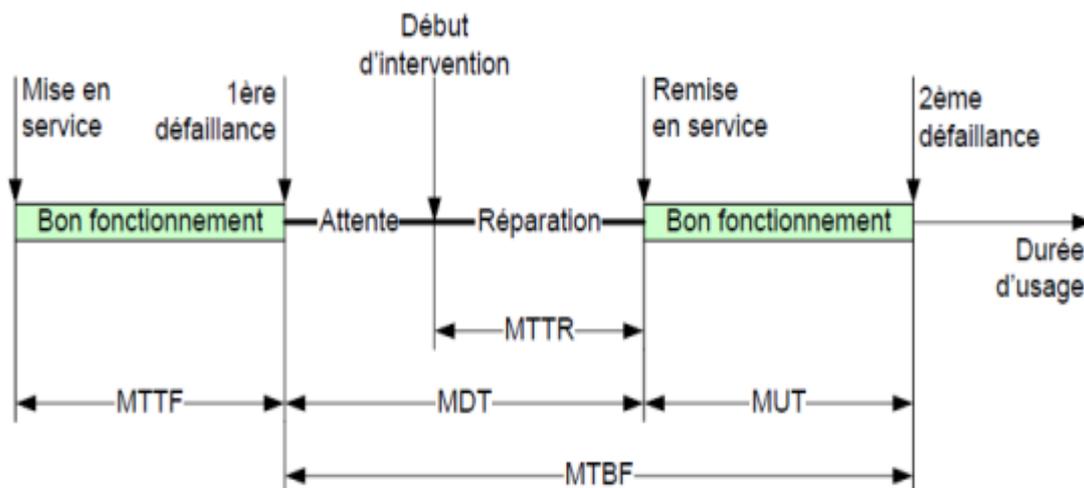


Figure 7. Diagramme des temps moyens

**MTTF ou MTFF**: temps moyen de bon fonctionnement avant la première défaillance.

**MTBF**: temps moyen entre deux défaillances d'un système réparable.

**MDT**: durée moyenne de défaillance comprenant la détection de la panne, la durée d'intervention, le temps de la réparation et le temps de remise en service.

**MTTR**: temps moyen de réparation.

**MUT**: durée moyenne de bon fonctionnement après réparation [19].

## II.6. Les lois de fiabilité :

### II.6.1. Méthode de Pareto (« ABC » OU « 20/80 »)

Le diagramme de Pareto est un outil statistique qui permet d'identifier l'importance relative de chaque catégorie dans une liste d'enregistrements, en comparant leur fréquence d'apparition. Un diagramme de Pareto est mis en évidence lorsque 20 % des catégories produisent 80 % du nombre total d'effets.

En maintenance, le principe de Pareto est utilisé pour identifier les équipements ou les composants qui sont responsables de la majorité des temps d'arrêt ou des coûts de maintenance. Il est basé sur l'observation que souvent, un petit nombre de défaillances sont responsables de la majorité des temps d'arrêt ou des coûts de maintenance. En appliquant le principe de Pareto, les gestionnaires de maintenance peuvent concentrer leurs efforts et leurs ressources sur les équipements ou les composants qui ont le plus grand impact sur la production ou les coûts de maintenance, ce qui permet de réduire les temps d'arrêt et les coûts de maintenance globaux [21].

Le diagramme de Pareto est également appelé :

\* Méthode "ABC".

\* Règle des 80/20.

#### II.6.1.1. L'objectif de digramme de Pareto :

Le diagramme de Pareto est un moyen simple de classer les phénomènes par ordre d'importance. Parmi les objectifs on cite :

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

#### II.6.1.2. L'objectif de l'analyse ABC :

L'analyse ABC est une analyse permettant :

- D'établir la proportionnalité ou l'importance de chaque élément étudié dans l'ensemble des éléments.
- De trier et donc de classer les éléments les uns par rapport aux autres.
- De tirer les enseignements de cette proportionnalité.
- De vérifier la concentration grâce à l'indice de concentration de Gini
- De déterminer l'importance relative de causes ou d'autres critères.

- De les classer par ordre d'importance.
- De dégager les axes prioritaires

La courbe « ABC », quant à elle, découpe la courbe de Pareto en trois segments A, B et C :

- "A" représente 75 à 80% de l'ensemble
- "A" + "B" représente 90 à 95% de l'ensemble
- "A" + "B" + "C" représente 100% de l'ensemble

Ainsi, lorsque les causes correspondant au segment "A" sont traitées, 75 à 80% des problèmes sont supprimés. Par cet outil, les priorités d'action sont donc rapidement visualisées.

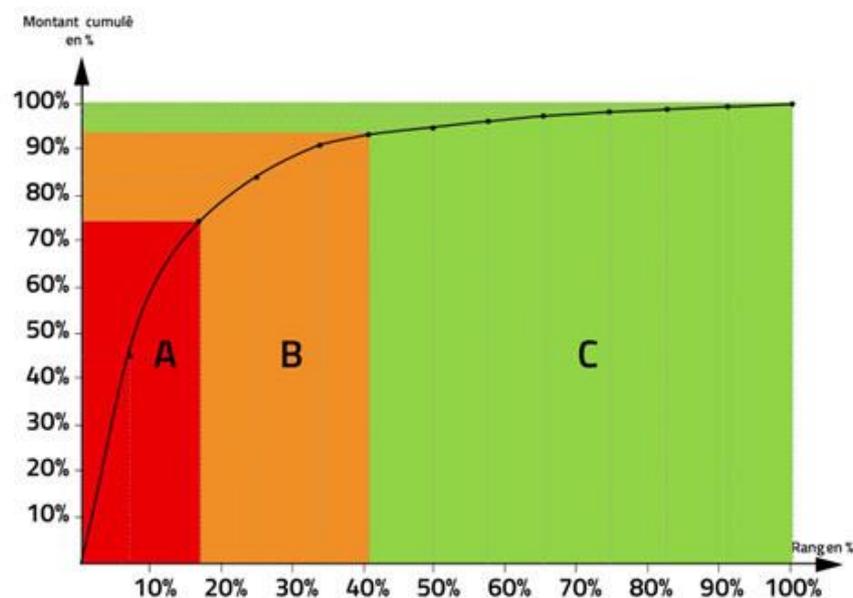


Figure 8. Diagramme de Pareto "ABC"

### II.6.2. La loi de Weibull :

La loi de Weibull est une loi de probabilité continue utilisée pour modéliser la durée de vie d'un produit ou d'un système. Elle est souvent utilisée en fiabilité pour modéliser la distribution des temps de défaillance. La loi de Weibull est caractérisée par deux paramètres : le paramètre de forme et le paramètre d'échelle. Elle est souvent utilisée pour estimer la probabilité de défaillance d'un produit ou d'un système à un moment donné. Des tests d'adéquation à la loi de Weibull ont été développés pour vérifier si les données suivent cette loi de probabilité. Des logiciels, tels que LEBLWI, ont également été développés pour réaliser de l'inférence bayésienne sur une loi de Weibull à deux paramètres en utilisant des données de retour d'expérience ou des avis d'experts qui peuvent être saisis sous forme de temps de défaillance ou de données censurées [22].

Les 3 paramètres de cette loi sont :  $\gamma$ ,  $\eta$ ,  $\beta$  définissent la distribution de Weibull. On utilise trois paramètres :

- $\beta$  : paramètre de forme ( $\beta > 0$ )
- $\eta$  : paramètre d'échelle ( $\eta > 0$ )
- $\gamma$  : paramètre de position ( $-\infty > \gamma > +\infty$ )

Les différentes formules utilisées pour la distribution de weibull sont :

Densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (7)$$

Fonction de répartition :

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (8)$$

Loi de fiabilité:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (9)$$

Taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (10)$$

### II.6.2.1. Estimation des paramètres de la loi de Weibull :

Un des problèmes essentiel est l'estimation des paramètres ( $\beta$ ,  $\eta$ ,  $\gamma$ ) de cette loi, pour cela, nous disposons de la méthode suivante :

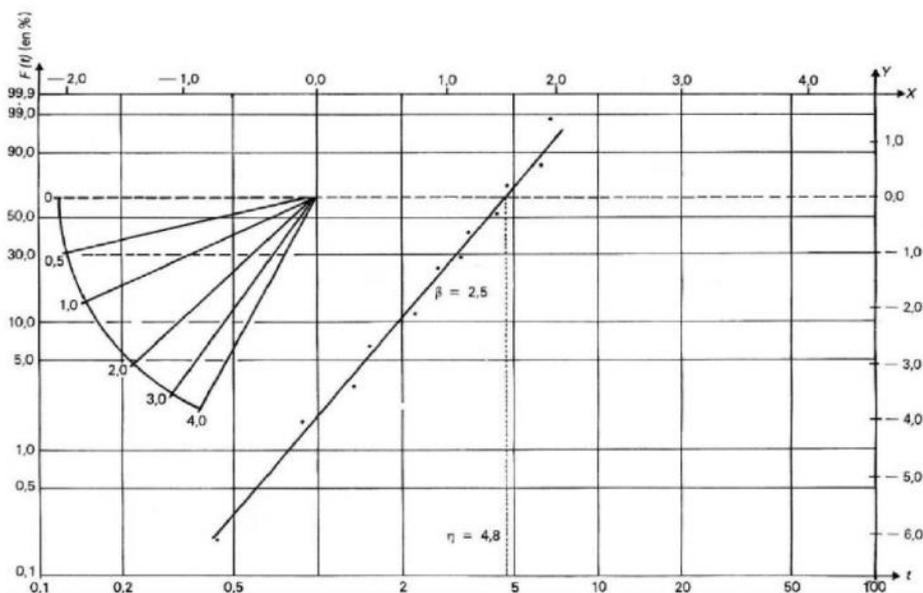


Figure 9. Représentation sur graphique à échelle fonctionnelle de la distribution de Weibull (graphique d'Allan Plait).

Axe de t en (heures), et l'axe de F(t) (en %).

L'historique permet de déterminer des Temps de bon fonctionnement et des fréquences cumulées de défaillance F(i), approximation de F(t).

### II.6.2.2. Préparation des données :

**a.** Calcul des Temps de bon fonctionnement

**b.** Classement des temps de bon fonctionnement en ordre croissant

**c.** N = nombre de Temps de bon fonctionnement

**d.** Recherche des données F(i), F(i) représente la probabilité de panne au temps correspondant au Temps de bon fonctionnement de l'ième défaillant.

On a 3 cas différents :

1- **Si N > 50**, regroupement des Temps de bon fonctionnement par classes avec la fréquence cumulée :

$$F(i) = \frac{N_i}{N} = \frac{\sum R_i}{N} \approx F(t) \quad (11)$$

2- **Si 20 < N < 50**, On affecte un rang "Ni" à chaque défaillance (approximation des rangs moyens):

$$F(i) = \frac{N_i}{N+1} \approx F(t) \quad (12)$$

3- **Si N < 20**, On affecte un rang "Ni" à chaque défaillance (approximation des rangs médians):

$$F(i) = \frac{N_i - 0,3}{N + 0,4} \approx F(t) \quad (13)$$

N<sub>i</sub> : range (1, 2,3...).

#### **a. Recherche de $\gamma$ :**

Si le nuage de points correspond à une droite, alors gamma = 0. ( $\gamma = 0$ )

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

#### **b. Recherche de $\eta$ :**

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

#### **c. Recherche de $\beta$ :**

- Béta est la pente de la droite de corrélation.

- On trace une droite parallèle à la droite de corrélation, et passant par  $\eta = 1$  On lit ensuite béta sur l'axe B

### II.6.3. La loi exponentielle :

Elle est la plus couramment utilisée en fiabilité électronique pour décrire la période durant laquelle le taux de défaillance des équipements est considéré comme constant. Elle décrit le temps écoulé jusqu'à une défaillance, ou l'intervalle de temps entre deux défaillances successives.

### II.7. Conclusion :

La MBF est une approche stratégique qui vise à optimiser la gestion des actifs et à garantir leur fiabilité et leur disponibilité. En se basant sur des données de fiabilité, des modèles statistiques et des outils d'analyse, la MBF permet d'anticiper les défaillances, de planifier les activités de maintenance de manière proactive et de maximiser la durée de vie des équipements. Grâce à cette approche, les organisations peuvent réduire les temps d'arrêt non planifiés, les coûts de maintenance et les impacts négatifs sur la productivité. La MBF favorise également une utilisation plus efficace des ressources, une meilleure satisfaction client et une gestion plus globale et stratégique des actifs. En adoptant la MBF, les entreprises peuvent améliorer leur performance opérationnelle et leur compétitivité sur le long terme.

# Chapitre III

---

## La Turbine à gaz GT26

---

### III.1. Introduction :

Les turbines à gaz sont devenues une technologie largement utilisée dans notre société moderne et se sont imposées dans plusieurs domaines d'applications. En effet, leur efficacité et leur flexibilité en font des machines essentielles pour la production d'énergie électrique et la propulsion de nombreux types de véhicules.

Tout d'abord, les turbines à gaz sont largement utilisées dans le domaine de la motorisation, en particulier dans les turboréacteurs d'avions. Les moteurs à turbine offrent une puissance élevée et une grande efficacité énergétique, ce qui en fait un choix idéal pour les avions commerciaux et militaires.

Ensuite, les turbines à gaz sont également utilisées dans la production d'électricité dans les centrales électriques. Elles sont notamment utilisées dans les centrales électriques à cycle combiné, qui permettent de maximiser l'efficacité de la production d'énergie en utilisant la chaleur résiduelle produite par la turbine pour produire de la vapeur.

Enfin, les turbines à gaz jouent un rôle essentiel dans l'exploitation des sources d'énergie fossile telles que le pétrole et le gaz naturel. Elles sont utilisées pour la production d'énergie électrique, la compression de gaz et la génération de vapeur pour les procédés industriels.

### III.2. Le centrale électrique de l'unité « S.K.E »:

#### III.2.1. Présentation de l'entreprise :

La Centrale de Terga est une unité de production de l'énergie électrique, elle est constituée de trois unités (ALSTOM) et sa production globale est de 1200MW.

La centrale électrique à cycle combiné est composée de 03 groupes GT26 et de turbine à vapeur d'une puissance de 400MW chacun.

- **Dénomination** : SHARIKET KAHRABA TERGA Spa (Central à cycle combiné de TERGA 3 × 400MW).
- **Combustible** : Gaz naturel et fioul.
- **Réfrigération** : Eau de mer.
- **Application** : Production d'électricité.

Elle été réalisée par un consortium dirigé par Alstom et comprenant la société Egyptienne, Orascom Construction Industries pour le génie civil et la construction.



Figure 10. Centrale électrique à cycle combiné TERGA (1200 MW)

### III.2.2. Localisation géographique :

La centrale électrique SKE est située dans l'Ouest de l'Algérie, à 25 km à Ain Témouchent, cette centrale électrique est la première centrale à cycle combiné KA26 en Algérie et en Afrique.



Figure 11. La géographie de centrale TERGA

### III.2.3. Objectif de la centrale :

La centrale électrique à cycle combiné de TERGA se compose de trois unités « Mono-arbre » (ou single shaft) KA26-1.

Chaque unité se compose :

- Une turbine à gaz (TG) ALSTOM type GT 26 équipée d'un système de combustion séquentielle à pré-mélange pauvre et à faibles émissions de NOx.
- Un cycle eau / vapeur à trois niveaux de pression et resurchauffe avec chaudière de récupération.
- Une turbine à vapeur (TV) deux corps à trois niveaux de pression et Resurchauffe.
- Un alternateur refroidi à l'Hydrogène, commun aux deux turbines.

Pour le démarrage, l'alternateur est utilisé comme moteur et la puissance est fournie par le réseau électrique. Combustible La centrale est conçue pour fonctionner au gaz naturel en opération normale et au gazole en cas de secours.

### III.2.4. Alimentation de la centrale :

L'alimentation de la centrale se fait en trois parties :

- **Gaz :** Méthane CH<sub>4</sub> ramenée de HASSIRMEL transitant par différents de pompage jusqu'à Med gaz ensuite va alimenter la centrale.
- **Electricité :** Auto alimenté, elle prend son énergie de ces groupes, si ces derniers sont à l'arrêt, la centrale reçoit son besoin d'énergie du réseau par l'intermédiaire de ces transformateurs principaux.
- **Alimentation en eau de mer :** Eau de mer par un poste de traitement d'eau produit une eau dessalée, ensuite par un poste de déminéralisation.

### III.3. Généralités sur les turbines :

Les turbines sont des machines rotatives qui convertissent l'énergie fournie par l'expansion des gaz chauds ou de vapeur en énergie mécanique. La figure 15 classe les divers types de turbines d'usage courant dans les installations industrielles, les bâtiments commerciaux et les immeubles de caractère public. Les turbines à vapeur et à gaz constituent les deux catégories principales. Comme leurs sources énergétiques et leurs caractéristiques de fonctionnement différent, les turbines à gaz et à vapeur seront traitées séparément [5].

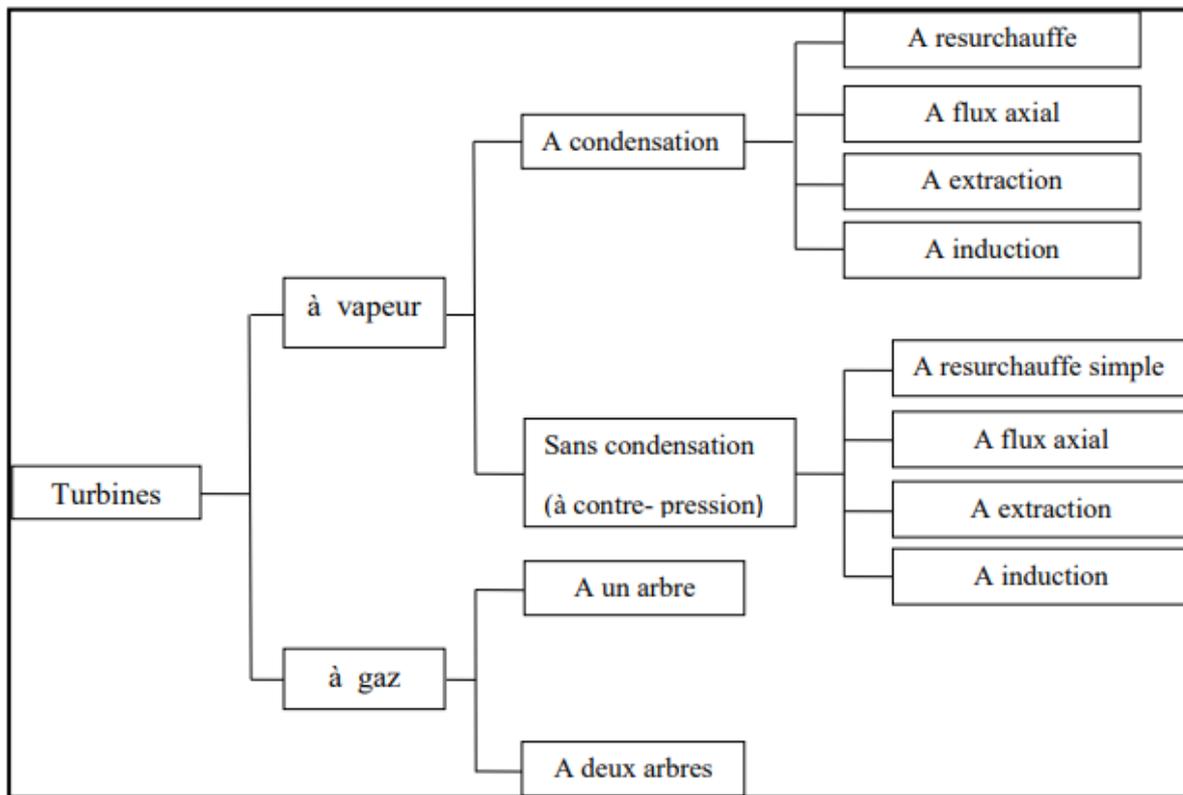


Figure 12. Classification des turbines.

### III.3.1. Turbine à gaz :

La turbine à gaz est une machine motrice permettant d'entraîner des alternateurs pour la génération d'électricité, ou des pompes et compresseurs, en général de forte puissance, de façon autonome. (1)

Ses principales qualités sont :

Puissance spécifique élevée (kW/kg)

- Installation simple (la principale servitude est la qualité et le volume de l'air aspiré)
- Disponibilité élevée (> 95 %)
- Poly combustible (gaz, fioul, ...)
- Exige peu de fluide de refroidissement (eau ou air)
- Accepte les conditions climatiques extrêmes (moyennant des adaptations sur l'aspiration d'air et les auxiliaires combustibles et lubrification)
- Fonctionnement sous conduite et surveillance automatisée – Mise en régime rapide (quelques dizaines de minutes)

Son principal défaut est son assez faible rendement thermique intrinsèque (30 % à 35 %), mais qui peut être compensé souvent par la possibilité d'utiliser un combustible à faible valeur commerciale. Toutefois des progrès technologiques récents améliorent ce rendement (on atteint 38 à 42 %).

La turbine à gaz, schématisée par la figure 16, est principalement constituée :

- D'un générateur de gaz comprenant un compresseur d'air, une chambre de combustion et une turbine de détente fournissant l'énergie mécanique nécessaire à l'entraînement du compresseur d'air.
- D'une turbine de puissance accouplée à l'alternateur.

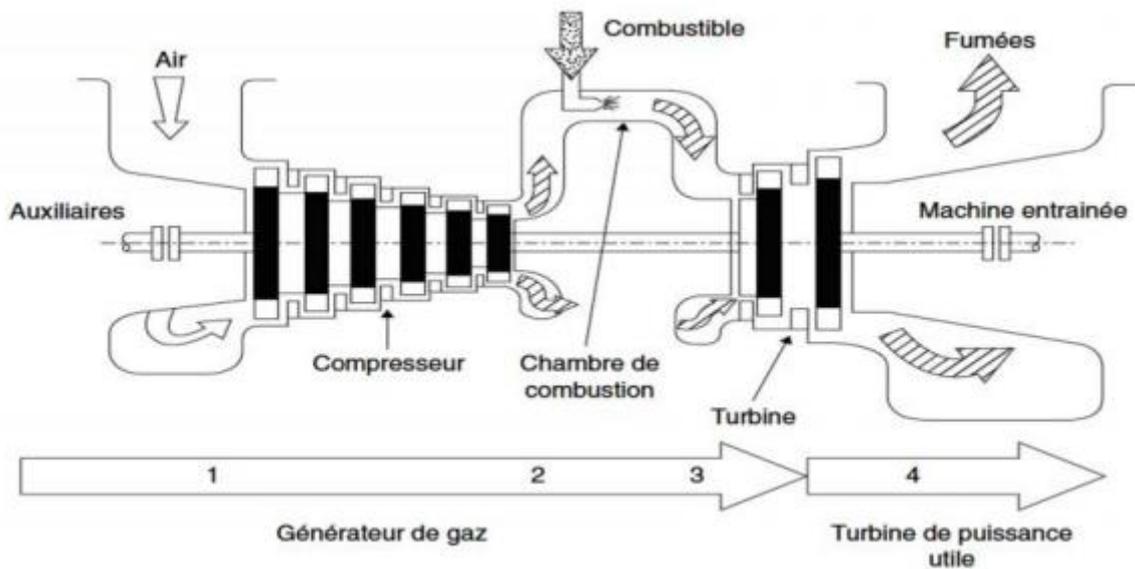


Figure 13. Turbine à gaz

### III.3.1.1. Classement des turbines à gaz :

On peut classer les turbines à gaz industrielles en deux familles :

#### a. Turbine à un seul arbre :

Une turbine à gaz à un seul arbre est un type de configuration de turbine à gaz où le compresseur et la turbine sont montés sur le même arbre et tournent à la même vitesse. Cette configuration est également connue sous le nom de "simple arbre" ou "single-shaft" en anglais.

Dans une turbine à gaz à un seul arbre, le compresseur et la turbine sont mécaniquement liés, ce qui signifie que la rotation du compresseur entraîne directement la rotation de la turbine.

Cela permet une conception plus simple et compacte, réduisant ainsi les coûts de fabrication et de maintenance.

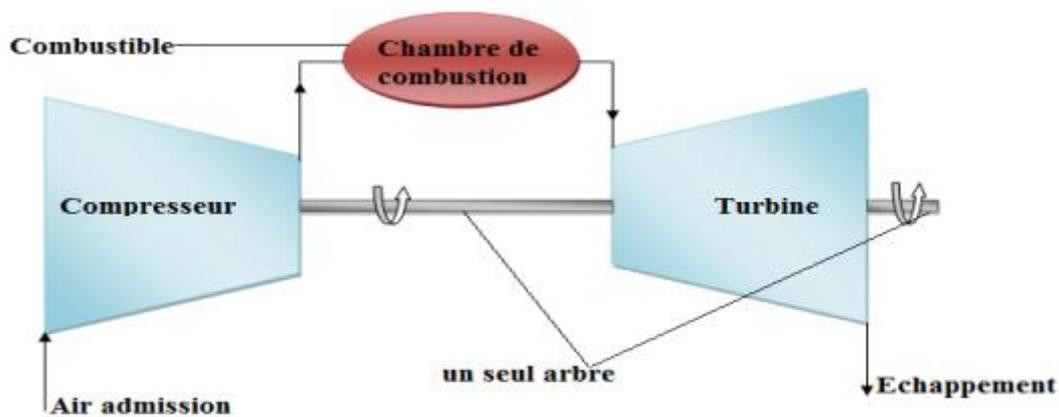


Figure 14. Schéma d'une turbine à gaz mono-arbre.

#### a. Turbine à deux arbres :

Dans ce type des turbines ; la turbine de détente est décomposée en deux parties :

- La turbine à haute pression HP entraîne le compresseur d'air et lui seul par l'intermédiaire d'un arbre.
- La turbine à basse pression BP assure la fourniture d'énergie à la machine entraînée l'alternateur ou bien le générateur.

La première ligne d'arbre constitue la génération de gaz chaud utilisé dans la deuxième ligne d'arbre pour la production d'énergie mécanique (Fig. 18). La turbine à deux arbres est sur le plan mécanique plus complexe que la turbine à un seul arbre. Par contre, elle permet d'obtenir un meilleur rendement à charge partielle, elle s'adapte particulièrement bien à l'entraînement d'un compresseur dont la prise en charge s'effectue lors de la montée en vitesse, et permet de travailler sur une large plage de vitesse. A noter également la puissance réduite du moteur de démarrage qui n'entraîne que le premier arbre.

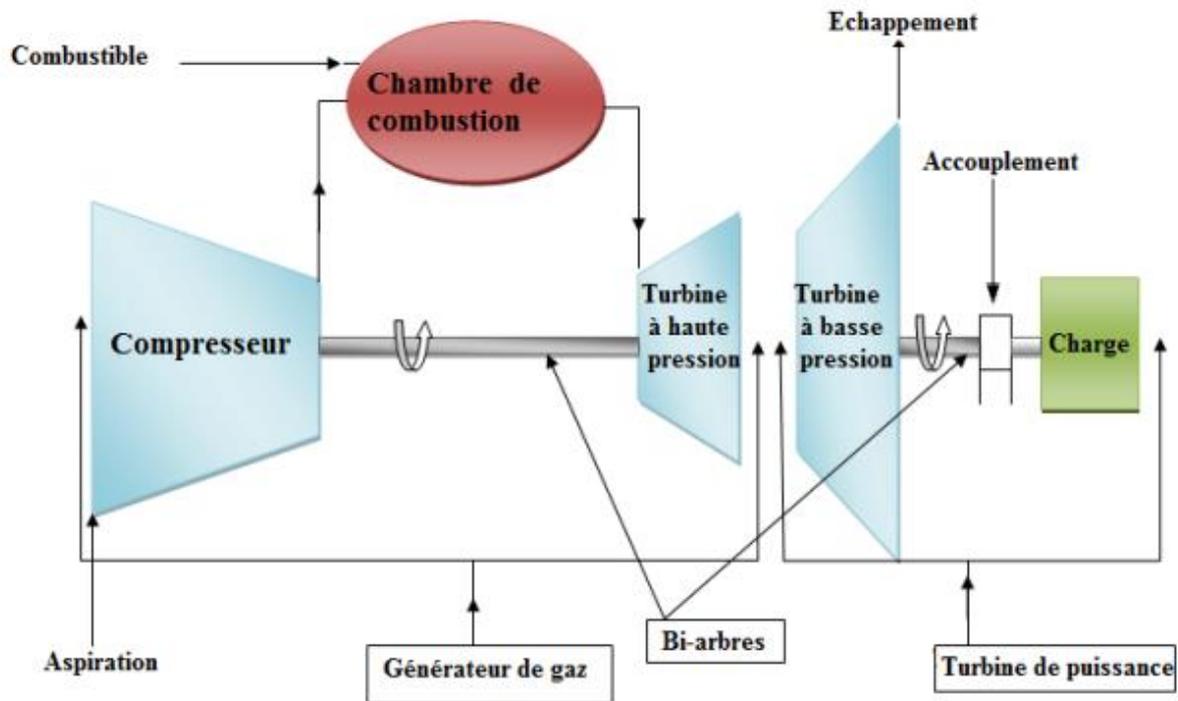


Figure 15. Schéma d'une turbine à gaz deux arbres

### III.3.1.2. Principe de fonctionnement de la turbine à gaz :

Une turbine à gaz fonctionne en suivant les suivantes ces étapes :

- Admission : elle extrait de l'air du milieu environnant.
- Compression : elle le comprime à une pression plus élevée.
- Combustion : elle augmente le niveau d'énergie de l'air comprimé en ajoutant et en brûlant le combustible dans une chambre de combustion.
- Détente : elle achemine l'air à pression et à température élevées vers la section de la turbine.
- Échappement : elle décharge à l'atmosphère les gaz à basse pression et température.

### III.3.1.3. Avantages et inconvénients des turbines à gaz :

Les avantages :

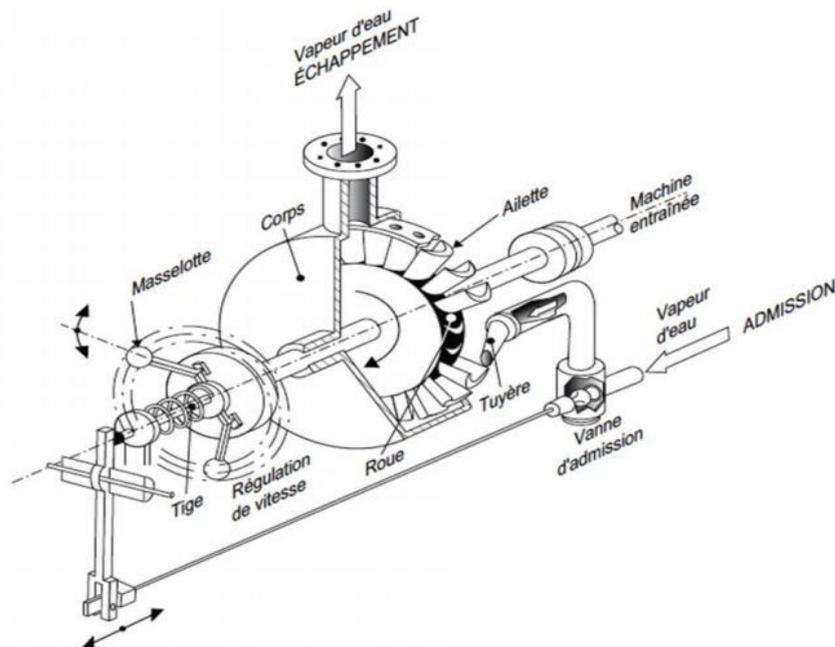
- Une puissance élevée dans un espace restreint dans lequel un groupe diesel de même puissance ne pourrait pas être logé.
- A l'exception de démarrage et arrêt, la puissance est produite d'une façon continue.
- Démarrage facile même à grand froid.
- Diversité de combustible pour le fonctionnement.
- Possibilité de fonctionnement à faible charge.

**Les inconvénients :**

- Au-dessous d'environ 3000KW, prix d'installation supérieur de celui d'un groupe diesel .
- Temps de lancement beaucoup plus long que celui d'un groupe diesel ; à titre indicatif :30 à 120 s pour une turbine, 8 à 20 s pour un groupe diesel.
- Rendement inférieur à celui d'un moteur diesel (cycle simple). À titre indicatif : 28 à 33 % pour une turbine de 3000 KW, 32 à 38 % pour un groupe diesel.

**III.3.2. Turbine à vapeur :**

La turbine à vapeur est un des matériels stratégiques des installations de production d'énergie électrique. Son indisponibilité entraîne la perte de la production d'énergie, contrairement à d'autres matériels (pompes alimentaires, pompes de circulation assistée, ventilateurs...) dont la redondance permet de poursuivre l'exploitation des installations soit à pleine charge, soit éventuellement à charge partielle.



**Figure 16.**Principe de fonctionnement d'une turbine à vapeur

A la sortie de la tuyère la vapeur est animée d'une très grande vitesse (quelquefois supérieure à la vitesse du son). Elle vient alors frapper les ailettes d'une roue qu'elle entraîne en rotation en lui cédant une partie de l'énergie cinétique qu'elle possède. A la sortie de l'ensemble mobile, la vapeur est évacuée par la tubulure d'échappement.

### III.3.2.1. Types de turbine à vapeur :

On distingue deux types de turbines à vapeur aptes à la cogénération :

#### a. Turbine sans condensation :

Quelquefois appelées turbines à contrepression, la vapeur d'échappement est égale ou supérieure à la pression atmosphérique. Comme la vapeur d'admission est souvent à la pression et à la température de saturation, on obtient un mélange de vapeur et de condensat, soit une vapeur humide à l'échappement.

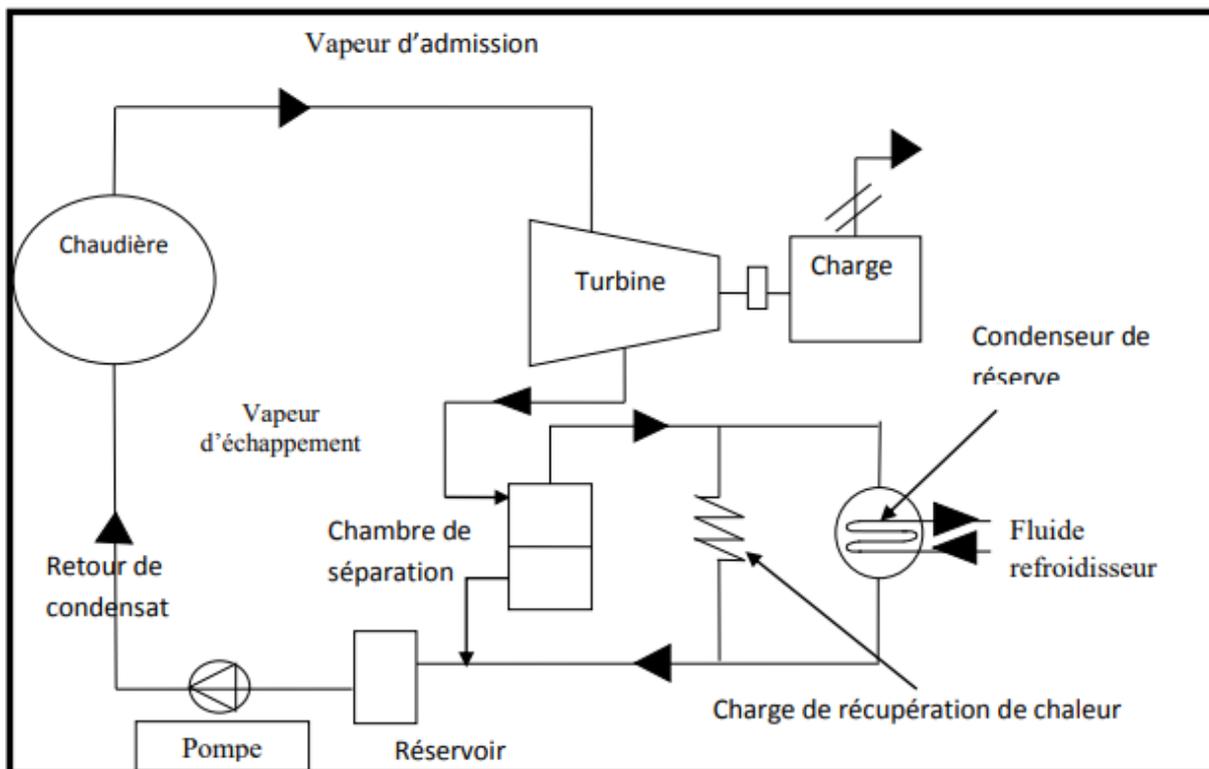


Figure 17. Turbine à vapeur sans condensation.

**b. Turbine à condensation :** La vapeur d'admission est habituellement surchauffée pour minimiser la condensation à l'intérieur de la turbine et la vapeur d'échappement est à une pression inférieure à la pression atmosphérique. La faible pression d'échappement est produite par un échangeur de chaleur externe qui refroidit la vapeur et la condense alors qu'elle s'échappe de la turbine.

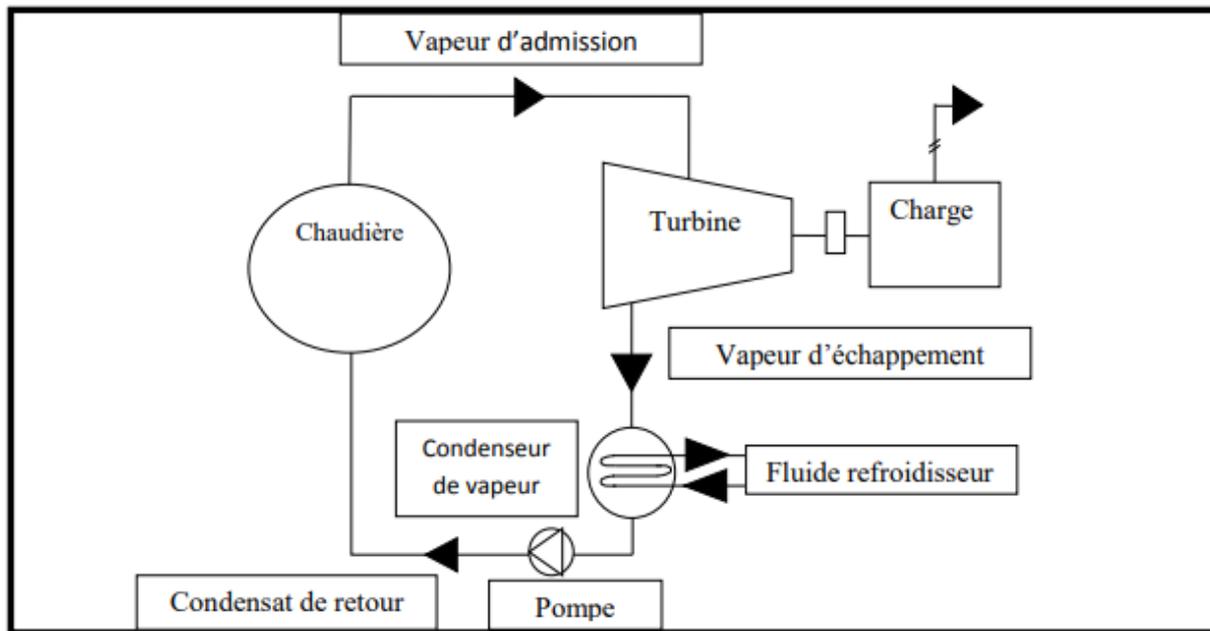


Figure 19. Turbine à vapeur à condensation

### III.3.2.2. Principe de fonctionnement d'une turbine à vapeur :

1. Génération de vapeur : La vapeur est produite en chauffant de l'eau dans une chaudière à haute pression.
2. Expansion de la vapeur : La vapeur haute pression est introduite dans la turbine à travers des buses d'admission et passe à travers des aubes ou des pales montées sur des rotors.
3. Conversion d'énergie : La vapeur exerce une force sur les aubes de la turbine, ce qui entraîne la rotation des rotors et convertit l'énergie thermique en énergie mécanique.
4. Puissance de sortie : La rotation des rotors est utilisée pour entraîner un générateur électrique, produisant de l'électricité.
5. Condensation de la vapeur : La vapeur à basse pression est refroidie et condensée en eau liquide dans un condenseur à l'aide d'un fluide de refroidissement.
6. Retour à la chaudière : L'eau liquide condensée est renvoyée vers la chaudière pour être réchauffée à nouveau et transformée en vapeur, ce qui permet le fonctionnement continu de la turbine [24].

### III.3.2.3. Avantages et désavantages des turbines à vapeur :

#### Les Avantages :

Lorsqu'une usine est bien alimentée en vapeur, l'installation d'une turbine à vapeur peut être plus économique que celle de gros moteurs électriques ou de turbines à gaz. Les turbines à vapeur offrent une puissance de sortie plus élevée que les turbines à gaz de taille et de consommation énergétique similaires. Lorsqu'il existe un accord avec la compagnie d'électricité, des alternateurs électriques entraînés par la turbine peuvent être utilisés pour fournir une partie de l'électricité nécessaire à une usine de procédés pendant les périodes de forte demande, tout en fournissant également de l'énergie à la compagnie d'électricité en d'autres moments. Ainsi, la turbine et les générateurs de vapeur fonctionnent à leur pleine capacité. De plus, la rentabilité du projet devient intéressante si les taux d'énergie primaire sont appropriés et s'il y a la possibilité de vendre de l'énergie excédentaire. Il existe une large gamme de turbines à vapeur, certains modèles étant équipés d'arbres communs et de pompes pour répondre aux exigences industrielles et électriques.

#### Désavantage :

Les turbines à vapeur présentent les désavantages suivants : nécessité d'un raccord permanent à une source de vapeur fiable, nécessité d'une vapeur de très haute qualité et du contrôle de la qualité de l'eau d'alimentation, possibilité d'endommager les équipements lorsque la vapeur transporte des impuretés ( y compris de l'eau ) et méthodes de démarrage du système particulières [25].

## III.4. La turbine à Gaz GT26 :

### III.4.1. Description de TAG GT26 :

La turbine à gaz GT26 est un type de turbine à gaz développé par Alstom pour répondre aux besoins des entreprises de services publics, des producteurs d'électricité indépendants et des producteurs d'électricité marchands. Ces entreprises sont confrontées à des défis tels que la déréglementation, la concurrence accrue, les tendances de consommation changeantes et la législation sur les émissions plus strictes. La turbine GT26 offre une solution pour réduire le coût par kilowatt-heure de production d'électricité sans réduire la disponibilité, tout en améliorant l'efficacité jusqu'à environ 60% en opération à cycle combiné.

En outre, la turbine GT26 utilise la technologie de combustion séquentielle unique d'Alstom, qui brûle le combustible dans deux chambres de combustion à faibles émissions de NOx, ce qui permet de réduire considérablement les émissions polluantes. De plus, la turbine est

conçue pour être flexible en termes de composition du gaz combustible, capable de gérer une large gamme de combustibles gazeux présents sur le marché mondial. La GT26 est également réputée pour sa capacité unique de régulation de la charge, ce qui signifie qu'elle est adaptée à un large éventail d'applications de génération d'électricité et d'industrie [25].

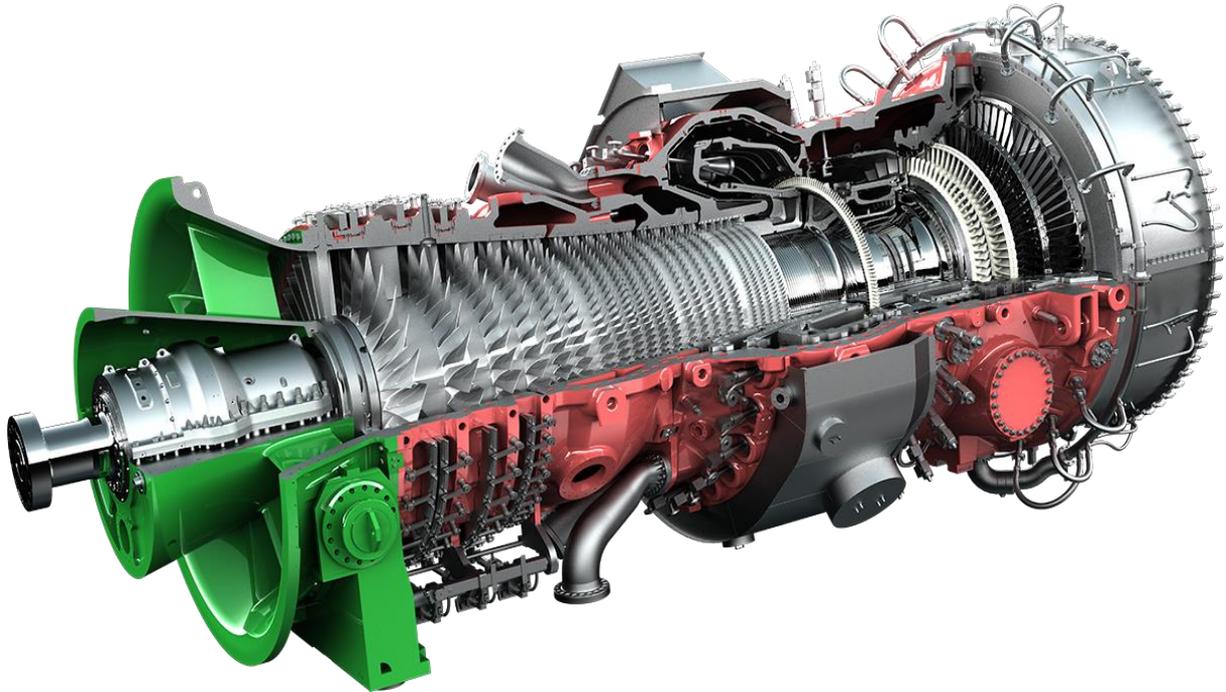


Figure 20. Turbine à gaz GT26

#### III.4.2. Les composants de la turbine à gaz gt26 :

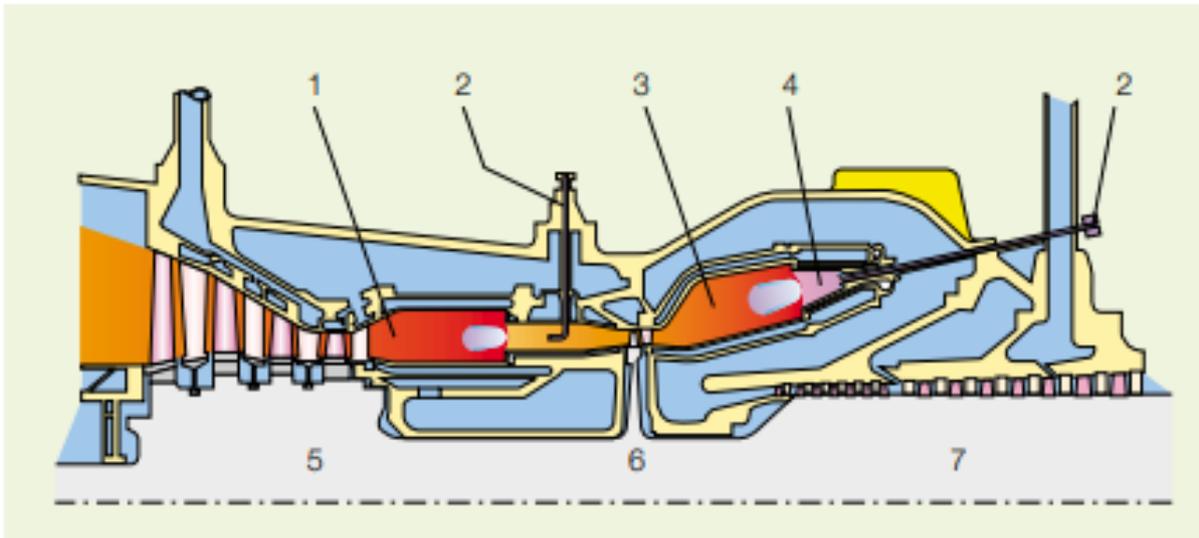
La turbine à gaz GT26 d'Alstom se compose de plusieurs composants clés, notamment :

- 1. Compresseur** : Le compresseur de la GT26 comprime l'air entrant pour augmenter la pression et la température avant son introduction dans la chambre de combustion.
- 2. Chambre de combustion** : La chambre de combustion est l'endroit où le combustible est brûlé pour produire de l'énergie. La GT26 utilise une technologie de combustion séquentielle unique en deux étapes pour réduire les émissions de NOx.
- 3. Turbine** : La turbine est composée de plusieurs étages de pales, qui sont entraînées par les gaz chauds produits dans la chambre de combustion. La GT26 est une turbine à flux axial.
- 4. Système de refroidissement** : La GT26 utilise un système de refroidissement avancé pour empêcher les pales de la turbine de surchauffer.
- 5. Générateur** : Le générateur est couplé à la turbine et convertit l'énergie mécanique en électricité.

**6. Système de commande :** La GT26 est équipée d'un système de commande avancé qui surveille et contrôle la performance de la turbine.

Ces composants travaillent ensemble pour produire de l'électricité de manière efficace et fiable. La technologie avancée utilisée dans la GT26 permet d'obtenir une efficacité élevée tout en réduisant les émissions et en améliorant la flexibilité.

1. Chambre de combustion SEV
2. Injection du combustible
3. Chambre de combustion EV
4. Brûleur EV
5. Turbine basse pression
6. Turbine haute pression
7. Compresseur



**Figure 21.** Section verticale du système de combustion séquentielle de la turbine à gaz GT24/GT26

### III.4.3. La mise en marche de la TAG GT26 :

La turbine à gaz AGAZ GT26 est un équipement sophistiqué utilisé pour la production d'électricité et d'autres applications industrielles. Pour mettre en marche la turbine à gaz GT26, vous devez suivre certaines étapes générales, bien que les détails spécifiques puissent varier en fonction du modèle exact et du système de contrôle utilisé. Voici une procédure générale pour démarrer une TAG GT26 :

1. Préparation : Assurez-vous que tous les prérequis pour le démarrage de la turbine sont en place. Cela peut inclure la vérification des niveaux de carburant, de l'approvisionnement en air et en eau de refroidissement, ainsi que l'inspection de tous les équipements auxiliaires pour s'assurer qu'ils sont prêts à fonctionner.
2. Vérification de la sécurité : Assurez-vous que toutes les procédures de sécurité sont suivies. Portez les équipements de protection individuelle appropriés et assurez-vous que la zone de la turbine à gaz est sécurisée.
3. Préchauffage : Avant de démarrer la TAG GT26, vous devez préchauffer certains composants pour garantir un démarrage en toute sécurité. Cela peut inclure le préchauffage des chambres de combustion et des systèmes de carburant.
4. Démarrage de la turbine à gaz : Une fois les préparatifs et le préchauffage effectués, vous pouvez démarrer la turbine à gaz. Cela peut impliquer le démarrage de la soufflante ou du compresseur pour générer un flux d'air dans la turbine.
5. Surveillance et stabilisation : Surveillez attentivement les indicateurs et les paramètres de fonctionnement de la TAG GT26 pendant qu'elle atteint sa vitesse de fonctionnement normale. Cela peut prendre quelques minutes. Assurez-vous que tous les paramètres sont dans les plages acceptables et effectuez les ajustements nécessaires pour stabiliser le fonctionnement de la turbine.
6. Mise en charge : Une fois que la TAG GT26 est stabilisée, vous pouvez commencer à augmenter progressivement la charge en connectant le générateur électrique ou en engageant les autres processus industriels.

#### **III.4.4. Entretien de la TAG GT26:**

L'entretien de la turbine à gaz GT26 comprend plusieurs aspects importants pour assurer un fonctionnement fiable et efficace. Voici quelques points clés à prendre en compte :

1. Maintenance préventive : Suivez les recommandations du fabricant concernant la fréquence et les types d'activités de maintenance préventive à effectuer. Cela peut inclure l'inspection régulière des composants, le remplacement des pièces usées, la lubrification des pièces mobiles et la vérification des paramètres de fonctionnement.
2. Contrôle des fluides : Surveillez les niveaux d'huile, de carburant et de liquide de refroidissement de la turbine à gaz GT26. Effectuez les vidanges et les remplacements nécessaires selon les intervalles recommandés par le fabricant.

3. Nettoyage des filtres : Nettoyez régulièrement les filtres à air et les filtres à carburant pour garantir un apport d'air et de carburant propre à la turbine.
4. Inspection des composants : Effectuez des inspections visuelles régulières des composants de la turbine à gaz GT26, tels que les aubes de turbine, les aubes de compresseur, les chambres de combustion et les systèmes de refroidissement. Recherchez les signes d'usure, de corrosion ou de dommages et prenez les mesures appropriées, y compris le remplacement des pièces si nécessaire.
5. Contrôle des vibrations : Surveillez les niveaux de vibrations de la turbine à gaz GT26 à l'aide d'instruments de mesure appropriés. Des niveaux de vibrations excessifs peuvent indiquer des problèmes dans les composants ou dans l'alignement de la turbine. En cas de vibrations anormales, consultez un spécialiste pour effectuer des vérifications et des ajustements.
6. Formation du personnel : Assurez-vous que le personnel chargé de l'entretien de la turbine à gaz GT26 dispose de la formation et des compétences nécessaires pour effectuer les tâches d'entretien en toute sécurité et efficacement.

#### **III.4.5. Lubrification de la TAG GT26:**

La lubrification de la turbine à gaz est d'une importance capitale pour assurer son bon fonctionnement et sa durabilité. Voici quelques points clés à prendre en compte pour une lubrification efficace de la turbine :

La première étape essentielle est d'utiliser une huile de haute qualité spécialement conçue pour les turbines à gaz, en suivant les recommandations du fabricant. Cette huile doit être capable de résister aux températures élevées et aux conditions de fonctionnement exigeantes auxquelles la turbine est soumise.

Il est crucial de surveiller régulièrement le niveau d'huile de la turbine à gaz et de s'assurer qu'il se situe dans la plage recommandée. Un niveau d'huile insuffisant peut entraîner une lubrification inefficace, tandis qu'un niveau d'huile excessif peut causer des problèmes de fonctionnement.

La vidange périodique de l'huile est également nécessaire pour éliminer les contaminants accumulés et maintenir les propriétés de lubrification optimales de l'huile. Les intervalles de vidange doivent être suivis conformément aux recommandations du fabricant pour assurer une performance optimale.

Il est important de remplacer régulièrement le filtre à huile de la turbine à gaz afin de maintenir la propreté de l'huile en filtrant les particules et les impuretés. Ce remplacement doit être effectué selon les recommandations du fabricant.

La surveillance régulière de la qualité de l'huile est essentielle. Des analyses périodiques de l'huile doivent être effectuées pour évaluer sa qualité, détecter la présence de contaminants et identifier d'éventuels problèmes. Ces tests d'analyse de l'huile fournissent des informations précieuses sur la contamination, la viscosité et d'autres propriétés essentielles de l'huile.

En suivant ces pratiques de lubrification recommandées par le fabricant de la turbine à gaz spécifique, vous pouvez assurer un fonctionnement fiable et une durée de vie prolongée de la turbine. Il est donc primordial de se référer aux spécifications et aux recommandations du fabricant pour obtenir des instructions précises sur la lubrification de la turbine à gaz GT26.

#### III.4.6. Les pannes possibles :

N°	Panne	Cause
1	Problèmes de démarrage	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Problèmes d'allumage des brûleurs.</li> <li>✓ Système de contrôle défectueux.</li> <li>✓ Débit de carburant insuffisant.</li> <li>✓ Paramètres de démarrage incorrects.</li> <li>✓ Système de lubrification défectueux ou insuffisant.</li> </ul>
2	Défaillance des paliers	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Lubrification inadéquate.</li> <li>✓ Surcharge.</li> <li>✓ Le mauvais alignement des arbres.</li> <li>✓ Des défauts de fabrication, des matériaux de mauvaise qualité.</li> </ul>
3	Vibrations excessives	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Déséquilibre des rotors.</li> <li>✓ Des défauts dans les paliers.</li> <li>✓ Des problèmes avec les composants de la boîte de vitesses.</li> </ul>
4	Fuites de gaz	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Problèmes de soudure tels que des fissures, des porosités ou des soudures</li> </ul>

		<p>incomplètes.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Dommages mécaniques.</li> <li>✓ Problèmes d'étanchéité des soupapes.</li> <li>✓ Pressions excessives qui dépassent la capacité d'étanchéité des joints, des soupapes ou des autres composants.</li> </ul>
<b>5</b>	Usure des composants	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Frottement et abrasion.</li> <li>✓ Effort mécanique excessif.</li> <li>✓ Les températures élevées qui peuvent provoquer une dégradation des matériaux et une usure accélérée.</li> <li>✓ Problèmes de conception ou de fabrication.</li> </ul>
<b>6</b>	Problèmes électriques	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Les interruptions de courant, les fluctuations de tension ou les problèmes de qualité de l'alimentation électrique.</li> <li>✓ Défaillance des composants électriques tels que les moteurs, les générateurs, les transformateurs, les relais, les disjoncteurs et les contacteurs.</li> <li>✓ Câblage défectueux.</li> <li>✓ Erreurs de programmation ou de configuration.</li> <li>✓ Problèmes de mise à la terre.</li> </ul>

**Tableau 1.** Les pannes possibles de la turbine à gaz GT26

**III.5. Conclusion :**

Les turbines à gaz jouent un rôle essentiel dans les systèmes de production d'énergie en raison de leur fiabilité et de leur facilité d'exploitation. Malgré leurs nombreux avantages, il est important de noter leur sensibilité aux variations des paramètres de fonctionnement et de l'environnement, ce qui peut entraîner une diminution de leur rendement et des pannes imprévues. La mise en place d'une gestion appropriée de la maintenance est donc cruciale pour assurer le bon fonctionnement et la durabilité de ces machines. Grâce à des études approfondies et à des pratiques de maintenance efficaces, il est possible de maximiser leur efficacité, de minimiser les pannes et de prolonger leur durée de vie, contribuant ainsi à la stabilité et à la performance globale de l'entreprise.

# Chapitre IV

---

## Analyse de la fiabilité de TAG GT26

---

### IV.1. Introduction :

L'étude de fiabilité d'une turbine à gaz est une analyse approfondie visant à évaluer la probabilité de pannes et la performance de la machine sur une période donnée. Dans le cas spécifique de la turbine à gaz GT26, développée par General Electric (GE), une étude de fiabilité vise à comprendre les tendances historiques des pannes, à identifier les causes possibles de défaillance et à proposer des mesures d'amélioration pour garantir un fonctionnement plus fiable et efficace de la turbine.

L'objectif principal d'une étude de fiabilité de la turbine GT26 est de minimiser les temps d'arrêt non planifiés, d'optimiser la disponibilité de la turbine et de réduire les coûts de maintenance associés.

Pendant cette étude de fiabilité de la turbine GT26, l'outil statistique Minitab sera utilisé pour analyser les données de temps de défaillance et effectuer les différentes analyses nécessaires.

### IV.2. Etude de la fiabilité de la turbine à gaz gt26 :

Le tableau suivant représente l'historique des pannes de TAG GT26 sur une période de 6 ans :

N°	Date de démarrage	Date d'arrêt	TTR (h)	TBF (h)	TA (h)	Cause
1	25 juin 2012	13 août 2013	26	9 936	240	changement des joints des thermo couples et injecteur de gaz.
2	23 aout 2013	02 mars 2014	12	4 584	48	Problème de lubrification des paliers causant une usure prématurée.
3	04 mars 2014	29 juillet 2015	05	12312	13	Défaillance du système de contrôle-commande provoquant l'arrêt soudain
4	30 juillet 2015	13 jan 2016	08	4 008	120	Changement de filtre d'aire de
5	17 janvier 2016	08 septembre 2016	03	5 640	24	Vidange d'huile de lubrification de la caisse et changement de filtre.
6	09 septembre 2016	15 avril 2017	10	5 232	48	Défaillance d'un capteur de vibration entraînant des vibrations excessives.
7	17 avril 2017	20 décembre	12	5 928	24	Révision générale

		2017				
8	21 décembre 2017	05 mai 2018	10	3 336	120	Changement de filtre d'huile étanchéité.
9	10 mai 2018	18 novembre 2018	15	3 864	168	Intervention sur circuit de graissage
10	25 novembre 2018	09 janvier 2019	03	1 128	24	Changement d'un palier

Tableau 2. historique des pannes de TAG GT26

### IV.3. Calcul temps de bon fonctionnement

Après l'exploitation du dossier historique des pannes de TAG GT26, on peut calculer la moyenne des temps de bon fonctionnement (MTBF) de manière suivante :

$$MTBF = \frac{\sum \text{les temps de bon fonctionnement}}{\sum \text{les pannes}} \quad (14)$$

AP :

$$MTBF = \frac{9936 + 4584 + 12312 + 4008 + 5640 + 5232 + 5928 + 3336 + 3864 + 1128}{10}$$

La moyenne des temps de bon fonctionnement :

$$MTBF = 5596,8 \text{ heures/panne}$$

#### IV.3.1. Classement de TBF calcul F (ti) :

N°	TBF (h)	n	$\sum n_i$	F (ti)	F (ti) %
1	1128	1	1	0,06730769	6,73076923
2	3336	1	2	0,16346154	16,3461538
3	3864	1	3	0,25961538	25,9615385
4	4008	1	4	0,35576923	35,5769231
5	4584	1	5	0,45192308	45,1923077
6	5232	1	6	0,54807692	54,8076923
7	5640	1	7	0,64423077	64,4230769
8	5928	1	8	0,74038462	74,0384615
9	9936	1	9	0,83653846	83,6538462
10	12312	1	10	0,93269231	93,2692308

Tableau 3. Classement de TBF calcul F (ti)

Le tableau suivant comporte les TBF classés par ordre croissant, et les  $F(i)$  calculés par la méthode des ranges médians  $F = \frac{\sum n_i - 0.3}{N + 0.4}$  (dans notre cas  $N = 10 < 20$ ) pour tracer la courbe de Weibull :

#### IV.4. Estimation des paramètres de la loi Weibull ( $\eta, \beta, \gamma$ ) :

Pour faciliter le calcul des paramètres de la distribution de Weibull, nous avons utilisé le logiciel Minitab.

##### IV.4.1. Présentation générale de Minitab :

Minitab est un logiciel propriétaire commercial de statistiques. Il est développé par *Minitab, Inc.* pour le système d'exploitation Windows.

Minitab nous permet d'accomplir plusieurs tâches :

- Analyser des données à l'aide de graphiques et présenter des résultats
- Réaliser des analyses statistiques
- Faire une évaluation de la qualité
- Concevoir un plan d'expériences
- Utiliser des raccourcis en vue d'automatiser les analyses futures
- Explorer des données avec graphique
- Calculer la fiabilité par différentes méthodes et la représenter graphiquement

##### IV.4.2. L'environnement de Minitab :

###### a. Feuille de travail :

Minitab s'ouvre avec deux fenêtres principales :

1. La fenêtre Session qui affiche les résultats de votre analyse au format texte. Dans cette fenêtre.
2. La fenêtre Données contient une feuille de travail semblable à une feuille de calcul. Vous pouvez ouvrir plusieurs feuilles de travail, chacune dans une fenêtre donnée différente.

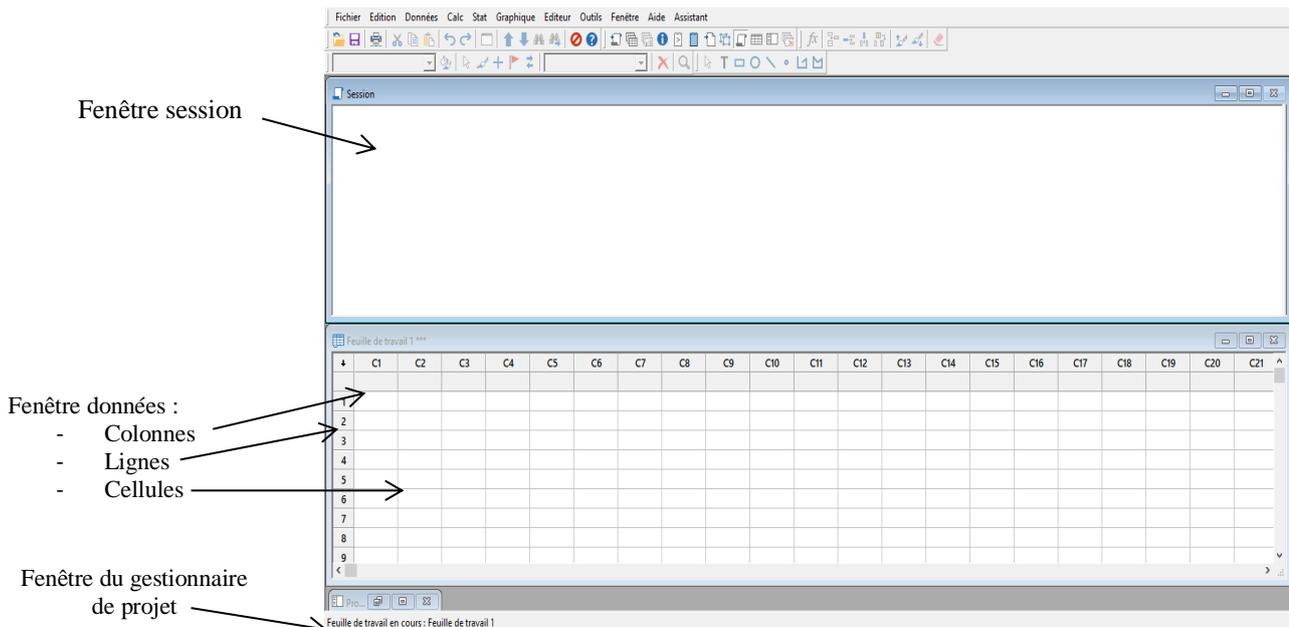


Figure 22. Ouverture d'une feuille de travail

### IV.4.3. Examen de la feuille de travail :

Les données sont présentées dans des colonnes, également appelées variables. Le numéro et le nom de la colonne sont affichés en haut de chaque colonne. Chaque ligne de la feuille de travail représente un enregistrement. « Minitab » accepte trois types de données : les données numériques, les données texte et les données date/heure. Les trois types sont représentés dans cette feuille de travail.

Colonne de données date/heure

Colonne de données numériques

Colonne de données texte

Nom de la colonne

Numéro de la ligne

	C1-T	C2-D	C3-D	C4	C5-T	C6	C7
	Center	Order	Arrival	Days	Status	Distance	
1	Eastern	3/4/2013 8:34	3/8/2013 15:21	4.28264	On time	255	
2	Eastern	3/4/2013 8:35	3/7/2013 17:05	3.35417	On time	196	
3	Eastern	3/4/2013 8:38		*	Back order	299	
4	Eastern	3/4/2013 8:40	3/8/2013 15:52	4.30000	On time	205	
5	Eastern	3/4/2013 8:42	3/10/2013 14:48	6.25417	Late	250	
6	Eastern	3/4/2013 8:43	3/9/2013 15:45	5.29306	On time	93	
7	Eastern	3/4/2013 8:50	3/8/2013 10:02	4.05000	On time	189	
8	Eastern	3/4/2013 8:55	3/9/2013 16:30	5.31597	On time	335	

Figure 23. Examen d'une feuille de travail

#### IV.4.4. Représentation graphique des données :

Avant d'effectuer une analyse statistique, vous pouvez utiliser des graphiques pour explorer les données et évaluer les relations entre les variables. De plus, vous pouvez utiliser des graphiques pour résumer les données et faciliter l'interprétation des résultats statistiques. Vous pouvez accéder aux graphiques de Minitab à partir des menus Graphique et Statistique. Des graphiques intégrés, qui vous aident à interpréter les résultats et à évaluer la validité des hypothèses statistiques, sont également disponibles avec de nombreuses commandes statistiques.

Les graphiques de Minitab comprennent les fonctionnalités suivantes :

- Galeries picturales pour vous aider à choisir le type de graphique.
- Flexibilité dans la personnalisation des graphiques.
- Éléments graphiques que vous pouvez modifier.
- Option de mise à jour automatique des graphiques.

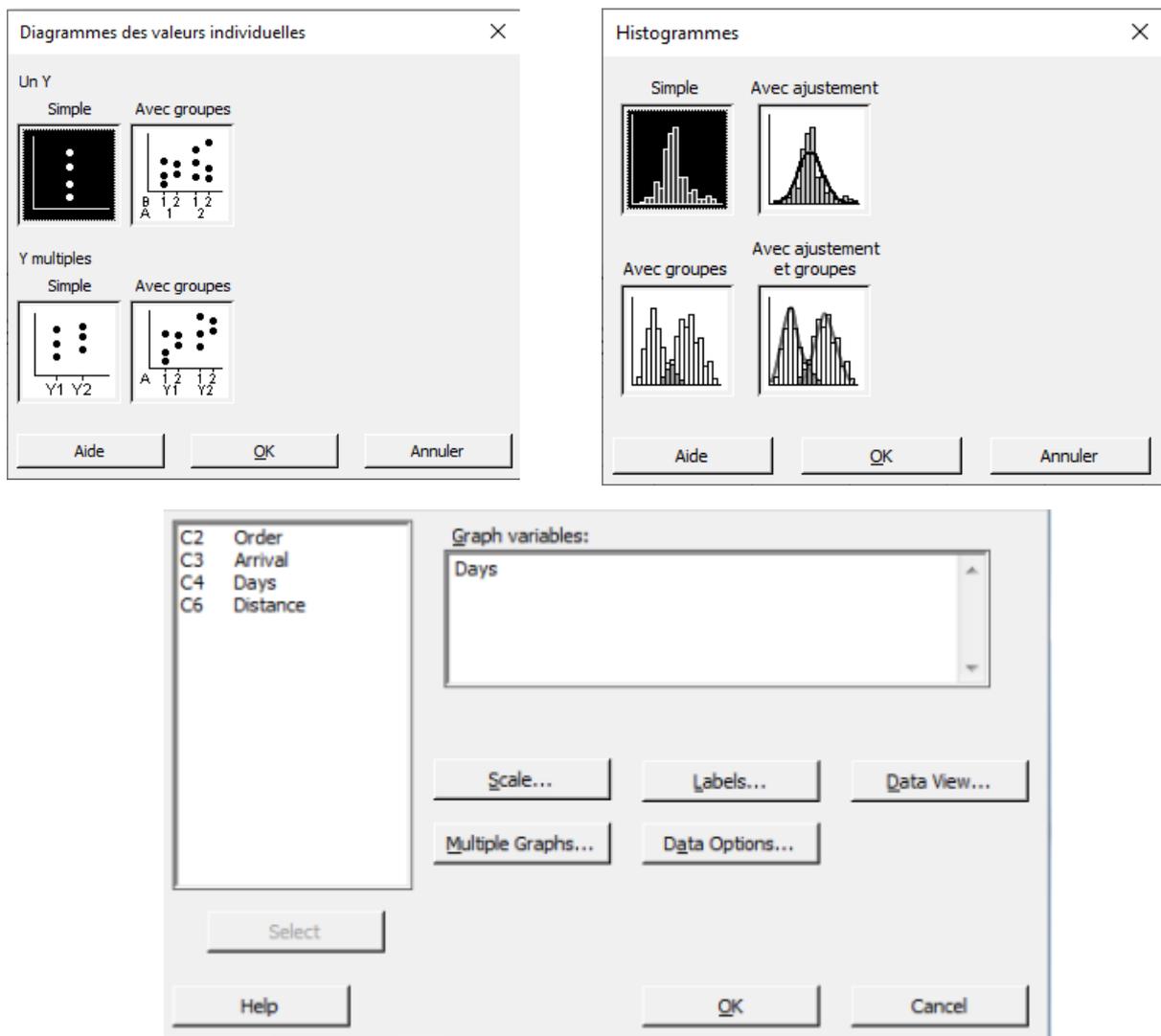


Figure 24. Représentation graphique des données

### IV.4.5. Etude de la loi de Weibull :

Le déroulement de l'étude passe par les étapes suivantes :

#### Etape 1 :

- Remplissage des données sur la feuille de travail.
- Sélectionnez Stat > Fiabilité/Survie > Analyse de répartition (troncature à droite) > Analyse de répartition paramétriques.

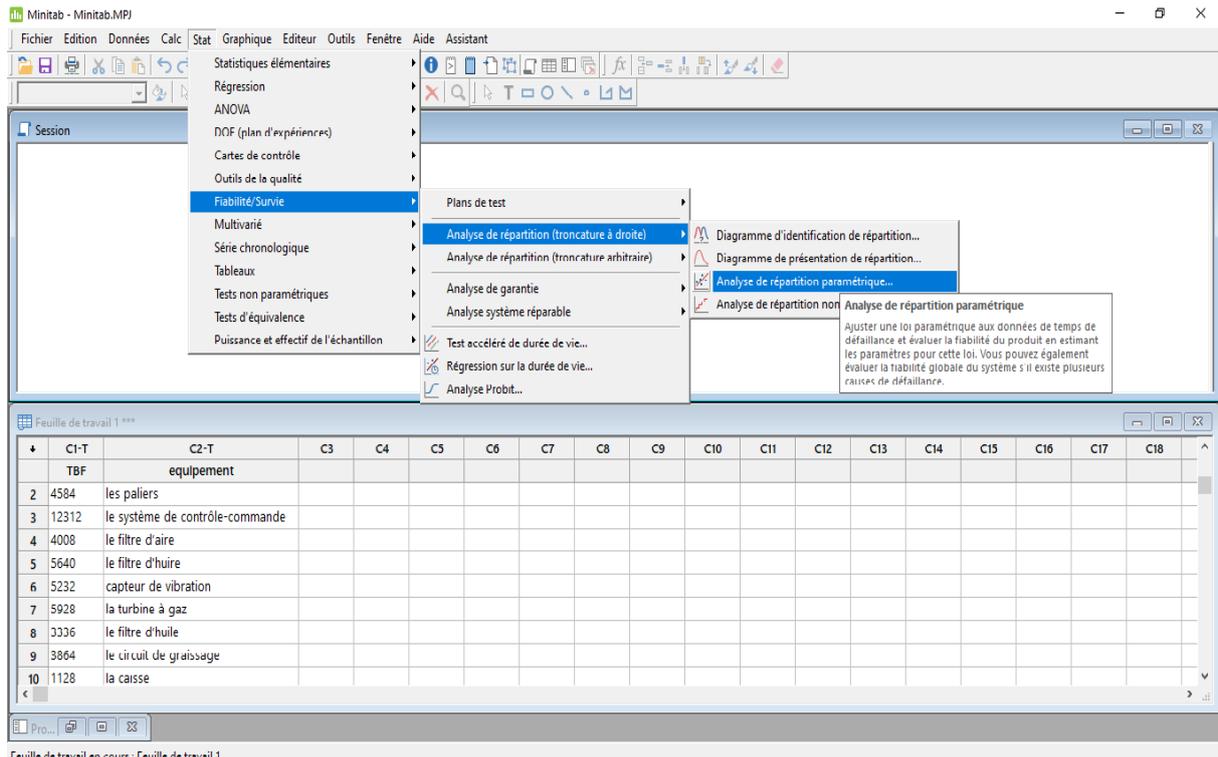


Figure 25. Analyse de répartition

#### Etape 2 :

- Cliquer sur C1 puis cliquer sur sélectionner, TBF sera afficher dans la case « variables ».
- Choisi Weibull de la liste de loi de distribution.
- Cliquer sur « ok ».

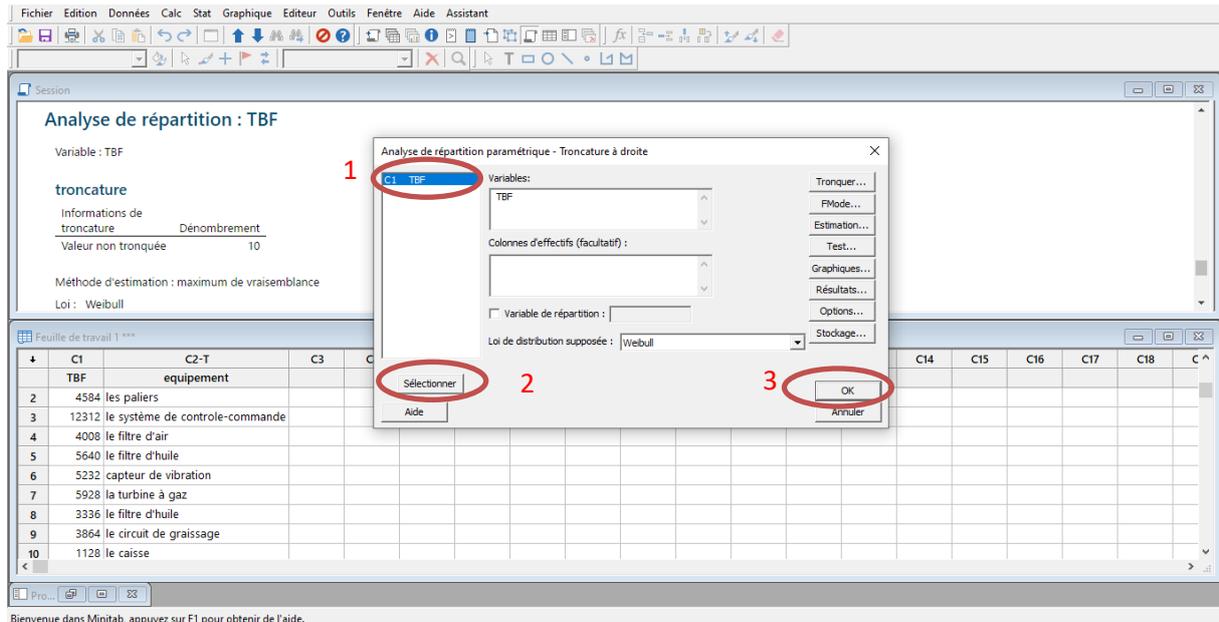


Figure 26. Estimation des données

On déduit les paramètres :  $\beta, \eta$  et  $\gamma$  par notre logiciel Minitab.

$$\beta = 1,9$$

$$\eta = 6324.69$$

$$\gamma = 0$$

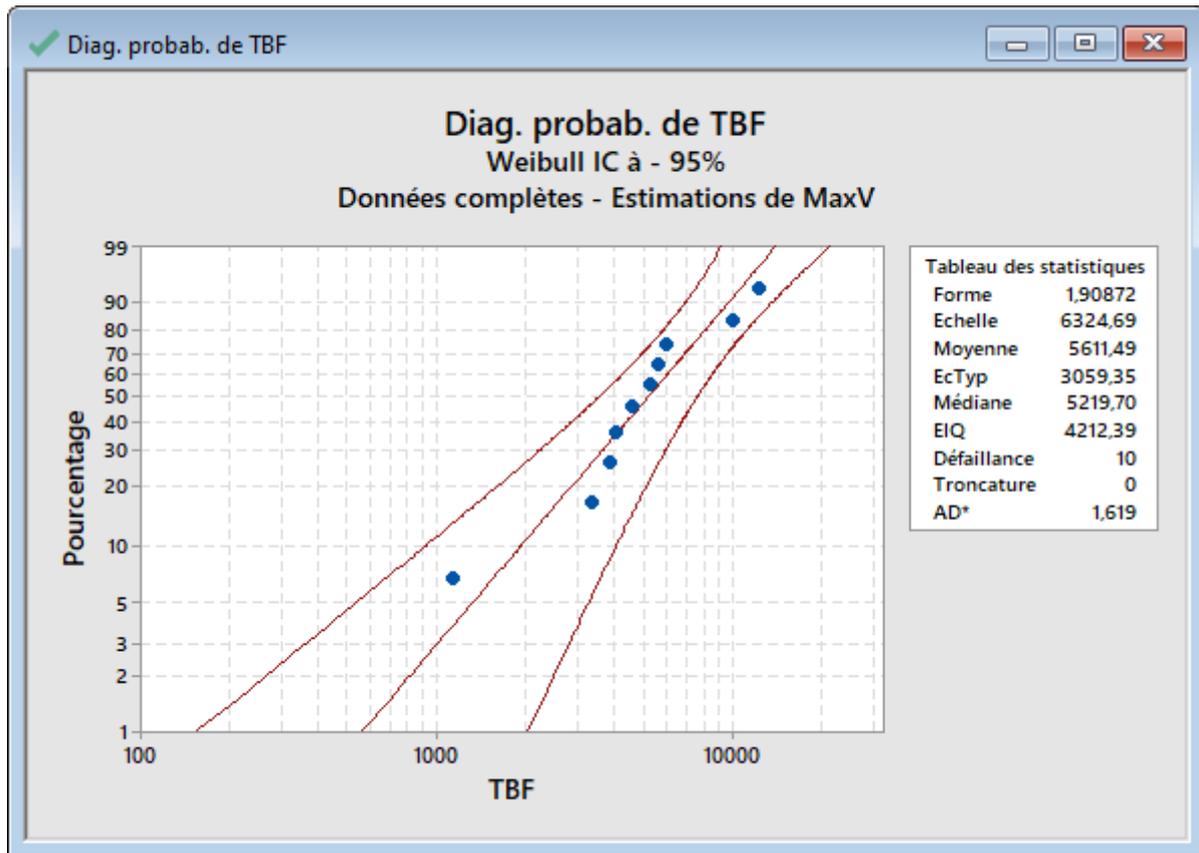


Figure 27. Papier de Weibull en logiciel Minitab

#### IV.4.6. Test de Kolmogorov-Smirnov:

Avant la validation de toutes les lois de fiabilité, il est nécessaire de tester l'hypothèse pour savoir si nous devons accepter ou rejeter le modèle proposé par le test de K-S avec un seuil de confiance de  $\alpha = 5\%$ . Ce test consiste à calculer l'écart entre la fonction théorique  $F(i)$  et la fonction réelle  $F(t)$  et prendre le maximum en valeur absolue  $D_{N,max}$ .

Cette valeur est comparée avec  $D_{N,\alpha}$  Qui est donnée par la table de Kolmogorov Smirnov . Si  $D_{N,max} > D_{n,\alpha}$  On refuse l'hypothèse.

$$D_{ni} = |F(t_i) \text{ réelle} - F(t_i) \text{ théorique}|$$

N°	TBF (h)	F (ti) théorique	R (ti)	$\lambda$ (ti)	F (ti) réelle	f (ti)	D ni
1	1128	0,0673	0,9327	$6,36 \times 10^{-5}$	0,03708	$5,93 \times 10^{-5}$	0,03022
2	3336	0,1634	0,8366	$1,68 \times 10^{-4}$	0,2566	$1,4 \times 10^{-4}$	0,0932
3	3864	0,2596	0,7404	$1,92 \times 10^{-4}$	0,3243	$1,42 \times 10^{-4}$	0,0647
4	4008	0,3557	0,6443	$1,99 \times 10^{-4}$	0,3431	$1,28 \times 10^{-4}$	0,0126
5	4584	0,4519	0,5481	$2,24 \times 10^{-4}$	0,4186	$1,22 \times 10^{-4}$	0,0333
6	5232	0,5480	0,452	$2,53 \times 10^{-4}$	0,5021	$1,14 \times 10^{-4}$	0,0459
7	5640	0,6442	0,3558	$2,7 \times 10^{-4}$	0,5526	$9,60 \times 10^{-5}$	0,0916
8	5928	0,7403	0,2597	$2,83 \times 10^{-4}$	0,5869	$7,34 \times 10^{-5}$	<b>0,1534</b>
9	9936	0,8365	0,1635	$4,51 \times 10^{-4}$	0,9054	$7,37 \times 10^{-5}$	0,0689
10	12312	0,9326	0,0674	$5,47 \times 10^{-4}$	0,9711	$3,68 \times 10^{-5}$	0,0385

**Tableau 4.** Les différentes valeurs utilisées pour la distribution de Weibull

D'après le tableau :

La fréquence maximale  $D_{N,\max} = \mathbf{0,1534}$  et selon la table K-S (KOLMOGOROV-SMIRNOV)

avec :

$N = 10$  et  $\alpha = 0,05$

D'après le tableau de K-S:

$D_{N,\alpha} = D_{10,0,05} = 0,410$

$0,1534 < 0,410$

Donc l'hypothèse du modèle de Weibull est acceptable.

#### IV.5. Calcul la fiabilité de la TAG GT26 :

**Le MTBF :**

D'après le tableau de distribution de Weibull on trouve :  $A = 0,8874$  ;  $B = 0,486$

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

$MTBF = 0,8874 \cdot 6324,69 + 0$

$MTBF = 5612,52$  heures/panne.

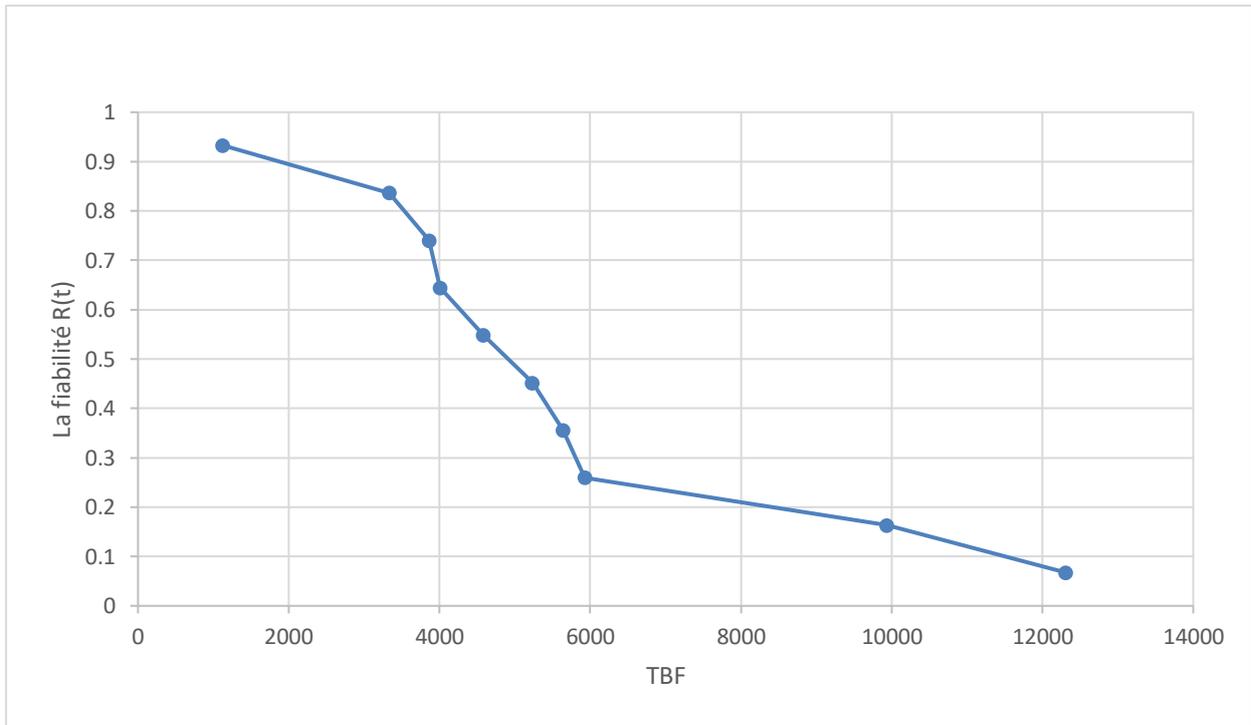
**IV.5.1. Calcul de R(t), F(t), λ(t) :**

**IV.5.2. La fiabilité R(t) :**

$$R(t) = e^{-\left(\frac{5612.52}{6324.69}\right)1.9} = 0,7822 = 78,22\% \quad (15)$$

<b>TBF</b>	1128	3336	3864	4008	4584	5232	5640	5928	9936	12312
<b>R(ti)</b>	0,9327	0,8366	0,7404	0,6443	0,5481	0,452	0,3558	0,2597	0,1635	0,0674

**Tableau 5.**Calcul de la fiabilité



**Figure 28.**La Courbe De la Fonction Fiabilité

**Commentaire :**

D’après l’allure de cette courbe on a remarqué que la dégradation de la fiabilité (probabilité de bon fonctionnement) au cours du cumul de temps de bon fonctionnement signifié que la tag gt 26 subit plusieurs arrêts qui provoquent l’arrêt de l’unité.

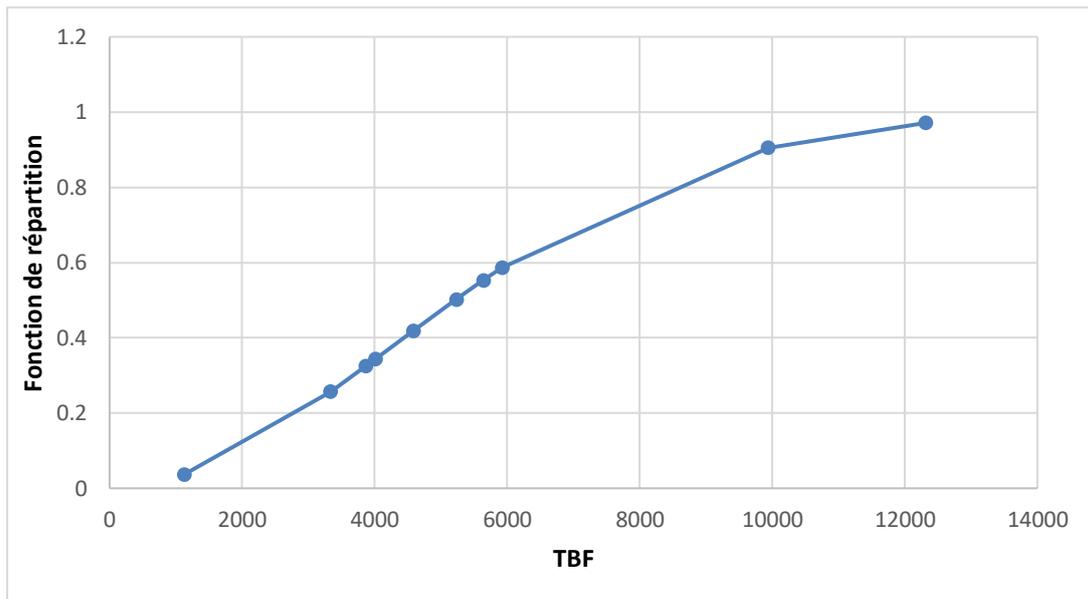
Cette dégradation est due essentiellement aux vibrations de l’équipement ou la dégradation du matériel soit à une mauvaise maintenance

**IV.5.3. La fonction de répartition :**

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{5612,52}{6324,69}\right)^{1,9}} = 0,2177 = 21,77\% \quad (16)$$

TBF	1128	3336	3864	4008	4584	5232	5640	5928	9936	12312
F(t)	0,03708	0,2566	0,3243	0,3431	0,4186	0,5021	0,5526	0,5869	0,9054	0,9711

**Tableau 6.** Fonction de répartition F(t)



**Figure 29.** La Courbe De Fonction Répartition

**Commentaire :**

D’après la courbe, on voit que la répartition des défaillances s’élève avec le temps, c'est-à-dire qu’il est très probable d’avoir une ou des avaries si le temps d’utilisation augmente, Donc il faut prévoir une méthode propre pour éviter les défaillances estimées et par conséquent l’amélioration de la fiabilité.

**IV.5.4. Taux de défaillance :**

$$\lambda(t) = \frac{1,9}{6324,69} \left(\frac{5612,52}{6324,69}\right)^{1,9-1} = 2,69 \times 10^{-4} \quad (17)$$

<b>TBF(h)</b>	1128	3336	3864	4008	4584	5232	5640	5928	9936	12312
<b><math>\lambda(t) \times 10^{-4}</math></b>	0,636	1,68	1,92	1,99	2,24	2,53	2,7	2,83	4,51	5,47

**Tableau 7.** Calcul le taux de défaillance

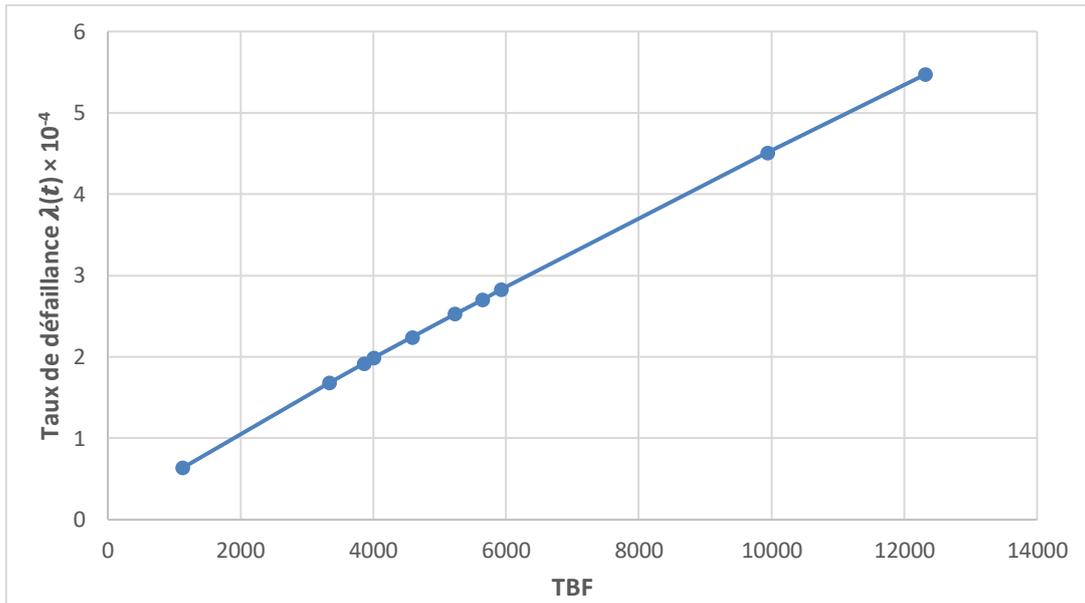


Figure 30. Le courbe taux de défaillance

**Commentaire :**

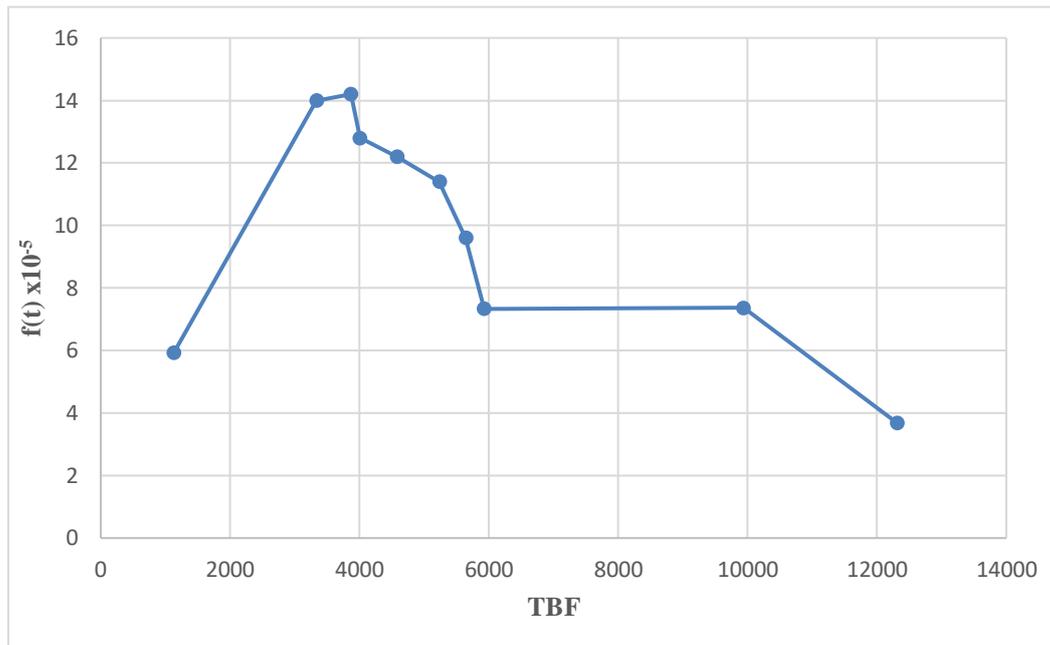
A partir de la courbe, on remarque que les résultats obtenus dans notre application, le taux de défaillance augmente avec le temps. Selon la théorie, notre équipement se situe en période de vieillissement.

**IV.5.5. Densité de probabilité de défaillance :**

$$f(t) = \frac{1,9}{6324,69} \left(\frac{5612,52}{6324,69}\right)^{1,9-1} e^{-\left(\frac{5612,52}{6324,69}\right)^{1,9}} = 2,1 \times 10^{-4}$$

TBF(h)	1128	3336	3864	4008	4584	5232	5640	5928	9936	12312
f(t) × 10 <sup>-5</sup>	5,93	14	14,2	12,8	12,2	11,4	9,6	7,34	7,37	3,68

Tableau 8. Calcul la fonction de la densité de probabilité

**Courbe de la densité de probabilité de défaillance :**

**Figure 31.** La Courbe de la densité de probabilité de défaillance

**Commentaire :**

L'intérêt de la fonction  $f(t)$  étant de voir l'allure de la distribution des défaillances enregistrés. C'est la forte probabilité d'avoir une avarie autour de la MTBF.

**IV.5.6. Etude de maintenabilité :**

La maintenabilité peut se caractériser par sa MTTR (Moyenne des Temps Technique de Réparation).

La fonction de maintenabilité  $M(t)$  :

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

$$\mathbf{MTTR} = \frac{\Sigma \mathbf{TTR}}{\mathbf{N}}$$

**TTR** : Moyenne des temps de réparation

**N** : le nombre de réparation

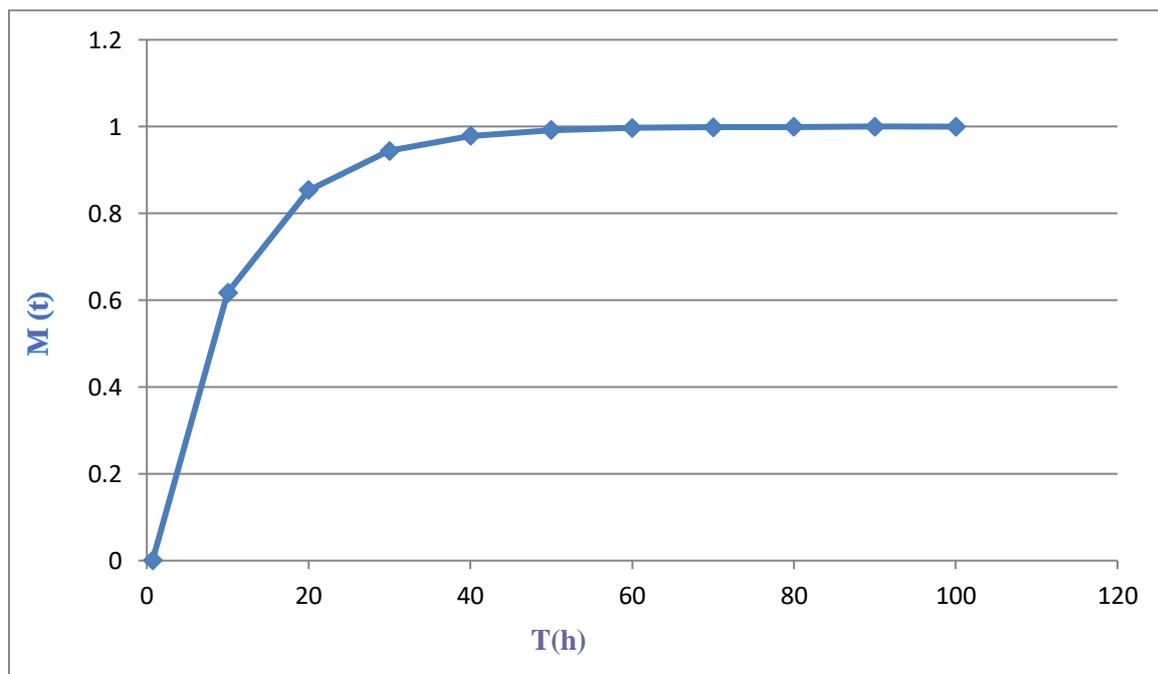
$$\mathbf{MTTR} = \frac{104}{10} = \mathbf{10,4h}$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} = \frac{1}{10,4} = 0,096 \text{ intervention/heure}$$

N	T(h)	M(t)	%
1	10	0,6171	61,71
2	20	0,8533	85,33
3	30	0,9438	94,38
4	40	0,9785	97,85
5	50	0,9917	99,17
6	60	0,9968	99,68
7	70	0,9987	99,87
8	80	0,9995	99,95
9	90	0,9998	99,98
10	100	0,9999	99,99

**Tableau 9.** Etude de maintenabilité

**Courbe de la maintenabilité :**



**Figure 32.** La courbe de la maintenabilité

**Commentaires :**

La Maintenabilité est croissant en fonction de temps la maintenable 99,99%

**IV.5.7. Etude de disponibilité instantanée :**

Pour un système avec l'hypothèse d'un taux de défaillance  $\lambda$  constant et d'un taux de réparation  $\mu$  constant, on montre que la disponibilité instantanée a pour expression :

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

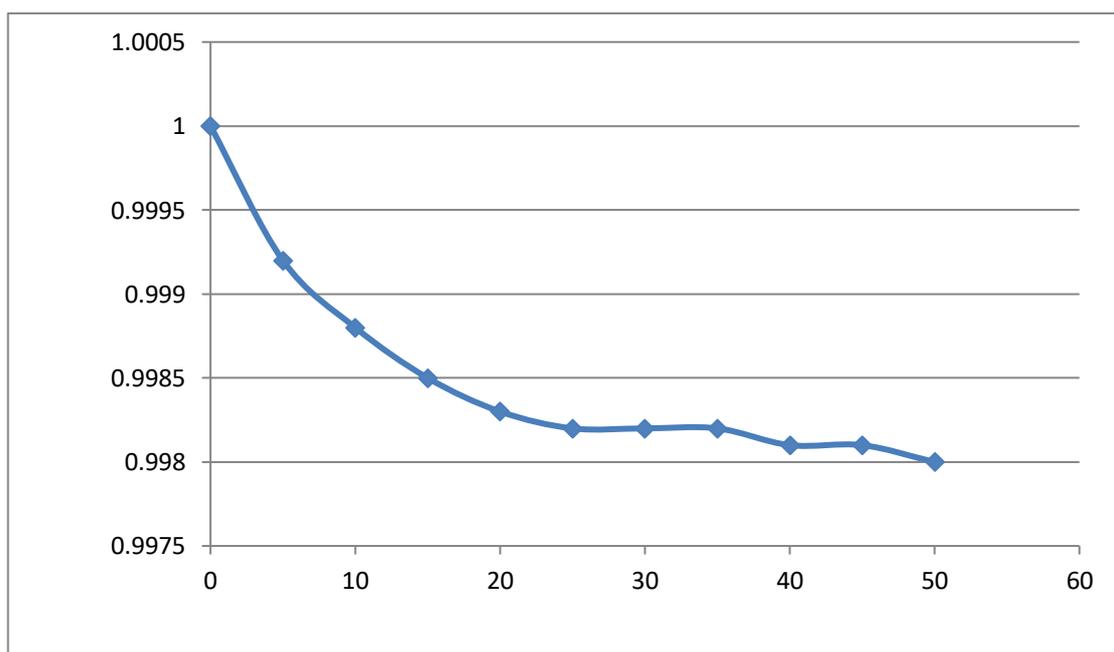
Avec :

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{5596,8} = 0,000178$$

T(h)	D(t)	%
5	0,9992	99,92
10	0,9988	99,88
15	0,9985	99,85
20	0,9983	99,83
25	0,9982	99,82
30	0,9982	99,82
35	0,9982	99,82
40	0,9981	99,81
45	0,9981	99,81
50	0,9980	99,80

**Tableau 10.**Disponibilité instantané

**Courbe de la disponibilité :**



**Figure 33.**Disponibilité instantané

**Commentaire :**

La disponibilité est décroissante en fonction de temps, pour augmenter la disponibilité d'une turbine consiste à diminuer le nombre de ses arrêts (augmenté sa fiabilité) et réduire le temps nécessaire pour résoudre les causes de ceux-ci (augmenté sa maintenabilité).

**IV.6. Conclusion :**

Dans ce chapitre on a tenté d'exploiter l'historique de panne de la turbine à gaz gt 26 implanté à l'unité de « S.K.E » à terga en classant les pannes selon leurs causes.

Ensuite, les paramètres de la distribution de Weibull ont été calculés, puis testés à l'aide du test de Kolmogorov-Smirnov, qui permet de déterminer l'écart entre la fonction théorique et la fonction réelle. Ce test permet ainsi de vérifier si la distribution de Weibull est un bon ajustement pour les données observées.

La validation des lois de fiabilité est 78% de fiabilité.

Finalement, pour assurer la disponibilité de la turbine il faut appliquer un système de maintenance adéquate et ceci se résume en deux points :

- Diminuer le nombre de ses arrêts (indice de fiabilité).
- Réduire le temps nécessaire pour résoudre les causes de ceux-ci

### **Conclusion :**

Ce mémoire a abordé la stratégie de maintenance la turbine à gaz GT26. Nous avons examiné divers aspects liés à l'optimisation de la maintenance préventive, à l'identification des équipements critiques et à l'utilisation de la fiabilité comme guide pour élaborer un plan de maintenance efficace. Notre objectif était de fournir des solutions et des recommandations pour améliorer la gestion et la performance de la maintenance de la turbine.

Pour atteindre cet objectif, il est essentiel de collecter des données provenant d'un historique de suivi des indicateurs de dégradation des équipements en fonction de leur date d'apparition.

Pour analyser la fiabilité de nos équipements, l'utilisation d'outils informatiques tels que Minitab s'avère essentielle. Minitab est un outil flexible et facile à utiliser qui nous a permis d'explorer les différentes méthodes utilisées pour les analyses de fiabilité. Grâce à cet outil, nous avons pu obtenir un aperçu approfondi des techniques utilisées dans ces analyses.

Nous avons utilisé la loi de Weibull pour évaluer la fiabilité de nos équipements à différents moments de l'étude. La loi de Weibull présente l'avantage d'être très flexible et de pouvoir s'ajuster à différents résultats expérimentaux. Elle nous a également permis de déterminer la période d'intervention nécessaire pour maintenir la fiabilité des équipements.

Enfin, en utilisant un historique complet et en effectuant une analyse probabiliste détaillée des indicateurs de fiabilité, nous avons réussi à améliorer la fiabilité de nos équipements et à anticiper leur fonctionnement. De plus, ce travail nous a permis d'explorer les méthodes classiques utilisées dans l'analyse de la fiabilité du système, tout en nous aidant à choisir la maintenance la mieux adaptée à nos équipements. En combinant ces approches, nous avons pu prendre des décisions éclairées pour optimiser la performance et la durabilité de nos équipements.

## Bibliographie

---

- [1] D. Sherwin, « A review of overall models for maintenance management. J of Qual in Maint Eng 6(3) : 138-164 », J. Qual. Maint. Eng., vol. 6, p. 138-164, sept. 2000, doi: 10.1108/13552510010341171.
- [2] Dana Netherton, Criterion for Defining RCM (Part One), Maintenance Technology, 1998.
- [3] D. N. P. Murthy, A. Atrens, et J. A. Eccleston, « Strategic maintenance management », J. Qual. Maint. Eng., vol. 8, no 4, p. 287-305, déc. 2002, doi: 10.1108/13552510210448504
- [4] FRANÇOIS MONCHY « Maintenance : Méthodes et organisation », 2 e Ed. Dunod.
- [5] A.HATHAT,H.DEBLAOUI : «Etude analytique FMD d'une turbine DR990»,mémoire master, encadré par : Mr. R.KAREK, Université Kasdi Merbah-Ouargla, (2015).
- [6] "Manuel de maintenance", NAPHTOGAZ, HMD, (2001).
- [7] JEAN –MARIE AUBERVILLE « maintenance industrielle de l'entretien de base à l'optimisation de la sûreté. » génie industrielle techno. Sup.
- [8] Guide De La Maintenance Daniel Boitel Et Claude Hazard Edition Nathan1990.
- [9] <http://tpmattitude.fr>
- [10] Djamel HALIMI, « Contribution à l'amélioration de la maintenance préventive des machines dynamiques dans l'industrie des hydrocarbures », thèse de doctorat de l'université M'hamed bougara de Boumerdes ,2014.
- [11] NOUREDDINE Rachid, « Maintenance et sûreté de fonctionnement », cours de master Génie Industriel,2014.
- [12] Aide-Mémoire Maintenance conditionnelle, Dunod, paris, 2008.
- [13] A.DESPUJOLS ,Optimisation de la maintenance par la fiabilité (OMF), Techniques de l'ingénieur, 2004.
- [14] Patil, S. S., & Bewoor, A. K. (2022). Optimization of maintenance strategies for steam boiler system using reliability-centered maintenance (RCM) model – A case study from Indian textile industries. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 39(7), 1745–1765. <https://doi.org/10.1108/ijqrm-07-2021-0216>

## Bibliographie

---

- [15] Alizadeh, A. M., Fereidunian, A., Moghimi, M., & Lesani, H. (2021). Reliability-Centered Maintenance Scheduling Considering Failure Rates Uncertainty: A Two-Stage Robust Model. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 37(3), 1941–1951. <https://doi.org/10.1109/tpwr.2021.3101458>.
- [16] P. N., Cotaina (1999). Méthodologie d'aide à la décision et à la mise en place de politiques de maintenance pour les P.M.E. L'apport de la MBF (Maintenance Basée sur la Fiabilité). Thèse, en vue de l'obtention du grade de Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, spécialité Automatique, soutenue le 22 octobre 1999.
- [17] Par Julie BERTHON, « nouvelle approche de la fiabilité Opérationnelle », thèse de doctorat de l'université de bordeaux 1, 2008.
- [18] P. Vrignat, « Génération d'indicateurs de maintenance par une approche semi-paramétrique et par une approche markovienne », p. 163.
- [19] AMMARI Khaled et ALLAOUA Saad « Etude de la sûreté de fonctionnement du compresseur centrifuge » ; mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en instrumentation 2013 à l'IMSI d'Oran.
- [20] Pierre CHAPOUILLE ; « Fiabilité. Maintenabilité », Techniques de l'Ingénieur, T 4300, 2007.
- [21] Palmer D. (n.d.). Maintenance planning and scheduling handbook. *CiNii Books*. <https://ci.nii.ac.jp/ncid/BA74804460>
- [22] Lyonnet, P. (1991). Estimation de la fonction de répartition de défaillances à partir d'une itération loi uniforme/loi de Weibull.
- [23] M. chikh, Etude thermodynamique maintenance, amélioration de la turbine a gaz 5002b, Mémoire de l'ingénieur, Université de BOUMERDES, (2009).
- [24] ( Bloch, H.P., Singh, M.P. Steam Turbines: Design, Application, and Re-Rating. 3rd Edition. McGraw-Hill Education, 2014.)
- [25] "compresseurs et turbines", Energie, mines et ressources Canada.