REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master 2

Filière : Génie électrique

Spécialité : Automatique et systèmes

THEME :

Estimation de modèle de disponibilité d'une turbine à gaz à base de La logique floue : Application sur une turbine à gaz

---

Présenté par :

Mlle. LAIDOUDI HORIA

Mlle. HAMMADI SAFIA

Proposé et Dirigé par :

Prof. AHMED HAFAIFA

Promotion 2020

REMERCIEMENT

Nous tiens tout d'abord à remercier la directrice de cette thèse, Professeur. Hafaifa Ahmed pour ses avoir fait confiance, guidé, encouragé et conseillé.

Nous lui sommes également reconnaissants pour le temps conséquent qu'il ses est accordé, ses qualités pédagogiques et scientifiques, sa franchise et sa sympathie. Nous avons beaucoup appris à ses côtés et nous lui adresse ses gratitudes pour tout cela.

Nous adressons de sincères aux membres du jury, pour ses avoir fait l'honneur de participer au jury de soutenance ou d'examinassions de ce travail de Master.

Enfin, Nous voudrions remercier toutes les personnes qui ont participé de

Près ou de loin à mes recherches et à l'élaboration de ce mémoire.

Mlle. LAIDOUDI HORIA et Mlle. HAMMADI SAFIA



DEDICACE

Je dédie ce travail :

A ma chère maman, la personne qui a beaucoup sacrifié pour moi Que Dieu puisse la garder éternellement heureuse merci du fond du cœur.

A mon cher père et mes frères (Mohamed et Mahfoud) qui m'a toujours aider et soutenir dans les moments difficiles.

A toute la famille Laidoudi (T.Fadhila ……).

A mon binôme Safia.

A tous mes camarades avec qui j'ai partagé des moments inoubliables à l'Université.

A ceux avec qui je partage de bons souvenirs.

A tous ce que j'aime et tous qui m'aiment (mes cousines : Manar, Ilham, Nacira...)

A tous ceux et celles dont les noms n'ont pu être cités.

Merci beaucoup

HOURIA





DEDICACE

Je dédie ce travail :

A MES CHERS PARENTS, PROTEGEZ-LES ET PROLONGEZ LEUR VIE O SEIGNEUR,

Mon père « AYACHE » et ma mère « ZINEB »

A mes chères sœurs « RACHIDA ; ZOLA ; ASMAA »;

A mes chers frères ;

A mon binôme « HOURIA » ;

A mes proches amis « KAWTHAR ; SAMIHA ; SIRINE ;….. Et à tout mes amis »

A mes camarades de promotion « ABDELHAMID, FOUDIL..... » ;

A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer.

SAFIA

Résumé

الملخص

يتم وضع استراتيجيات المراقبة في المنشآت الصناعية باستخدام طريقة تخطيط نظام الإشراف والتي تعتمد غالبًا على مشورة الخبراء. تتم صيانة هذه الأنظمة الصناعية من خلال برامج وجداول تحكم قوية. في مشروع درجة الماستر هذا ، سوف ندرس التبعات بين المعدات ، ووجود العديد من أخطاء التدهور وأنماط الفشل التي قد تتنافس في علاج إخفاقاتها. في هذا السياق، سوف نقترح طرقًا لحساب مدى توفر نظام التحكم في النظام الصناعي بناءً على المنطق الضبابي، من أجل التمكن من الاستجابة للقضايا الصناعية الحالية.

الكلمات المفتاحية : الأنظمة الصناعية ;التوربين الغازي ; المنطق الضبابي ; التوفر ;الموثوقية .

Abstract

Monitoring strategies in industrial facilities are established using the supervision system planning method which is often based on expert advice. These industrial systems are maintained by robust control programs and schedules. In this master's project, we will study the dependencies between equipment, and the presence of several of the degradation faults and failure modes that may compete to remedy their failures. In this context, we will propose methods for calculating the availability of an industrial system's control system based on fuzzy logic, in order to be able to respond to current industrial issues.

Keywords: industrial systems; gas turbine; fuzzy logic; availability; reliability.

Résumé

Les stratégies de surveillances dans les installations industrielles sont établies à l'aide de la méthode de planification de système de supervision qui s’appuie bien souvent sur des avis d'experts. Ces systèmes industriels sont maintenus par des programmes et des plannings de contrôle robustes. Dans ce projet de fine d’étude Master, nous allons étudier les dépendances entre les matériels, et la présence de plusieurs des défauts de dégradation et modes de défaillance éventuellement en compétition pour remédier leurs défaillances. Dans ce cadre, nous allons proposer des méthodes de calcul de disponibilité de système de contrôle d’un système industriel à base de la logique floue, pour pouvoir répondre aux problématiques industrielles actuelles.

Mots clés : systèmes industriels ; turbine à gaz ; logique floue ; disponibilité ; fiabilité.

Sommaire

Sommaire

Liste des figures ..... A

Liste des tableaux ..... E

Abréviation et Nomenclature ..... F

Introduction générale 1

Chapitre I : Etude descriptive de la turbine à gaz

I.1 Introduction 4

I.1.1 Représentation centrale de l'entreprise 4

I.1.2 Vue d'ensemble du projet 5

I.1.3 Caractéristique général du projet 5

I.1.4 Caractéristiques techniques 7

I.1.5 Schéma principale de la centrale 8

I.2 Description de la turbine à gaz 10

I.2.1 Présentation général 11

I.2.2 Définition de la turbine à gaz 11

I.2.3 Composants d'une turbine à gaz 12

I.2.3.1 Section d'admission 13

I.2.3.2 Section Compresseur 13

I.2.3.3 Chambre de combustion 14

I.2.3.4 Section Turbine 15

I.2.3.5 Section d'échappement 16

I.3 Classification des turbines à gaz 16

I.3.1 Selon le mode de construction 17

I.3.2 Selon le mode de travail 18

I.3.3 Par le mode de fonctionnement thermodynamique 19

I.4 Principe fonctionnement de la Turbine à gaz 20

I.4.1 Principe de fonctionnement 20

I.4.2 Etude Thermodynamique 20

I.4.2.1 Cycle idéal de Brayton 20

I.4.2.2 Cycle réel 21

I.5 Rendement de cycle 22

I.6 Systèmes auxiliaires de la turbine à gaz 25

I.6.1 Système de démarrage 25
I.6.2 Système de lubrification (graissage) 25
I.6.2.1 Circuit d'huile 26
I.6.2.2 Pompes d'huile de lubrification 26
I.6.3 Système de l'air de refroidissement et d'étanchéité 27
I.6.4 Système d'huile de contrôle (déclenchement) 27
I.7 Application d'une turbine à gaz 27
I.8 Avantages et Inconvénients des TAG 28
Conclusion 29

Chapitre II : Introduction aux fiabilités des systèmes : disponibilité

I.1 Introduction 30
II.2 Concepts Généraux de la Fiabilité 30
II.2.1 Définition de fiabilité *R* (Reliability) 30
II.2.2 Objectifs de la fiabilité 31
II.2.3 Etude de la fiabilité d'un système 31
II.2.4 Fiabilité de système constitué de plusieurs composants 32
II.2.4.1 En série 32
II.2.4.2 En parallèle 33
II.2.5 La Fiabilité et ses fonctions de base 33
II.2.5.1 Fonction de densité *f(t)* 34
II.2.5.2 Fonction de défaillance *F(t)* ou répartition 35
II.2.5.3 Fonction de fiabilité *R(t)* ou fonction de survie 35
II.2.5.4 Les lois de probabilité utilisées en fiabilité 36
II.2.5.4 Taux de défaillance 37
II.2.6 La maintenabilité 39
II.3 Concepts de Disponibilité 40
II.3.1 Définition de la disponibilité 40
II.3.2 Les grandeurs moyennes 42
II.3.3 Quantification de la disponibilité 43
II.3.4 Relation entre la disponibilité et la fiabilité 46
II.3.5 Amélioration de la disponibilité 46

II.3.6 Disponibilité des dispositifs connectés en série et en parallèle 47
II.3.6.1 Disponibilité des dispositifs connectés en série 47
II.3.6.2 Disponibilité des dispositifs connectés en parallèle 47
II.3.7 Taux de disponibilité.....47
II.3.8 La relation entre les notions FMD 47
II.4 fiabilité des ensembles réparés.....49
Conclusion.....51

Chapitre III : Concept de la logique floue

III.1 Introduction 52
III.2 Définition de la logique floue 53
III.3 Principes de la logique floue 53
III.4 Concept des ensembles flous 53
III.5 Notion caractéristique d'un ensemble flou 54
III.5.1 Variable linguistique 54
III.5.2 Fonction d'appartenance 55
III.6 Opérations sur l'ensemble flou 57
III.6.1 Union (disjonction) 57
III.6.2 Intersection (conjonction) 57
III.6.3 Négation (complémentation) 58
III.7 Propositions floues 59
III.7.1 Propositions floues élémentaires.....59
III.7.2 Propositions floues générales 59
III.8 Raisonnement en floue 59
III.9 Modélisation par la logique floue 61
III.10 La structure d'une commande floue 62
III.10.1 Interface de fuzzification 63
III.10.2 Base de connaissance (base de règle).....63
III.10.3 Moteur d'inférence (logique de prise de décision).....64
III.10.4 Interface de défuzzification 67
III.10.4.1 Défuzzification par centre de gravité 67
III.10.4.2 Méthode de défuzzification par valeur maximale 67
III.10.4.3 Méthode la Défuzzification par la moyenne des maxima (MM) 68

III.11 La logique floue dans l'industrie 68
III.12 Avantages et inconvénients de la commande par logique floue.....68
Conclusion 69

Chapitre IV : Résultats d'étude de la fiabilité de la turbine à gaz examinée

IV.1 Introduction 70
IV.2 Élaboration d'un système expert à base de la logique floue 70
IV.3 Élaboration de système expert 70
IV.4 Détermination de taux de défaillance de chaque composante 71
IV.4.1 caractéristique de bloc flou 72
IV.5 Résultats obtenus de fiabilité de la turbine à gaz examinée 73
IV.6 Résultats de fiabilité avec système expert flou 79
Conclusion 85
Conclusion générale 86
Annexes
Bibliographie

Liste des figures

Chapitre I : Etude descriptive de la turbine à gaz

Figure I.1: Spa-SHARIKET KAHRABA BERROUAGHIA (S.K.B)..... **4**
Figure I.2: Turbine à gaz à cycle simple **6**
Figure I.3: Turbine à gaz avec chambre de combustion annulaire et brûleur hybrides (HBR) Modèle V94.3a **6**
Figure I.4: Schéma principale de la centrale **8**
Figure I.5: Chambre de combustion de TG V94.3a **9**
Figure I.6: Image d'une turbine V94.3a **9**
Figure I.7 : Transformateur de puissance avec transformateur interne de la centrale **10**
Figure I.8: Coupe schématique d'une turbine à gaz **11**
Figure I.9: schéma descriptive de la turbine à gaz **12**
Figure I.10: les composantes d'une turbine à gaz. **12**
Figure I.11: Représentation de compartiment d'admission **13**
Figure I.12: le Rotor et le Stator d'un compresseur axial **13**
Figure I.13: Section Compresseur **13**
Figure I.14: Chambre de combustion **14**
Figure I.15: Image réel d'une Turbine **15**
Figure I.16: Image d'un Aube Turbine **15**
Figure I.17 : La directrice et la roue de turbine **15**
Figure I.18 : système d'échappement **16**
Figure I.19 : Classification de Turbine A Gaz **17**
Figure I.20 : La turbine à un seul arbre **17**
Figure I.21 : La turbine à deux arbres **18**
Figure I.22 : Schéma d'une turbine à action et à réaction **19**
Figure I.23 : Cycle idéal de Brayton **21**
Figure I.24 : Cycle thermodynamique réel **22**
Figure I.25 : Représentation de la notion de travail d'un compresseur **22**
Figure I.26 : Représentation de la notion de travail d'une turbine **23**
Figure I.27 : Système de démarrage de la turbine à gaz **25**
Figure I.28 : Composantes du système de lubrification **26**

Chapitre II : Introduction aux fiabilités des systèmes : disponibilité

Figure II.1 : Composants en série. **32**

Figure II.2 : Composants en parallèle. **33**

Figure II.3 : Représentation de l'état de fonctionnement d'une entité..... **34**

Figure II.4 : Fonction de Densité **34**

Figure II.5 : Fonction de défaillance **35**

Figure II.6 : Fonction de fiabilité **35**

Figure II.7 : Fonction associée **36**

Figure II.8 : La maintenabilité en fonction de temps. **40**

Figure II.9 : Disponibilité en fonction du temps t **42**

Figure II.10 : Représentation des MTBF, MDT et MUT **43**

Figure II.11 : Phases de MDT **43**

Figure II.12: La relation entre les notions FMD. **48**

Figure II.13: Relation entre les différentes grandeurs caractérisant la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité d'un équipement **48**

Figure II.14 : Systèmes réparés..... **49**

Figure II.15 : changement d'un système réparable **50**

Chapitre III : Concept de la logique floue

Figure III .1 : Représentation graphique d'un ensemble classique et d'un ensemble flou **54**

Figure III .2 : Variable linguistique **55**

Figure III .3: Formes usuelles des fonctions d'appartenance **56**

Figure III.4 : Structure de base d'un régulateur flou **62**

Figure III.5 : Méthode d'inférence MAX-MIN **64**

Figure III .6: Méthode d'inférence MAX-PROD **65**

Figure III.7 : Méthode d'inférence SOMME-PROD 66

Chapitre IV : Résultats d'étude de la fiabilité de la turbine à gaz examinée

Figure VI .1 : Architecteur de système expert 71

Figure VI .2 : Architecteur général du système expert pour l'évaluation de fiabilité prévisionnelle..... 71

Figure VI .3: Structure de bloc de la logique floue 72

Figure VI.4 : Fonctions d'appartenance de fiabilité résultante 73

Figure VI.5 : Fonction de probabilité avec Weibull à deux paramètres 75

Figure VI .6 : Défaillances cumulative avec Weibull à deux paramètres 76

Figure VI.7 : Fonction Hazard avec Weibull à deux paramètres 76

Figure IV.8 : Fiabilité avec Weibull à deux paramètres 76

Figure IV.9 : Fiabilité et défaillances cumulatives avec Weibull à deux paramètres 77

Figure IV.10 : Fonction de probabilité avec Weibull à trois paramètres 77

Figure IV.11 : Fiabilité avec Weibull à trois paramètres 77

Figure IV.12 : Fonction Hazard avec Weibull à trois paramètres 77

Figure IV.13 : Défaillances cumulative avec Weibull à deux et à trois paramètres 78

Figure IV.14 : Programme de maintenance proposé 79

Figure IV.15: Densité de fiabilité floue avec la loi exponentielle 80

Figure IV.16: Probabilité de défaillance floue avec la loi exponentielle 80

Figure IV.17: Taux de défaillance floue avec la loi exponentiel 81

Figure IV.18: MTBF floue avec la loi exponentielle 81

Figure. IV.19: Fiabilité floue avec la loi exponentielle 82

Figure. IV.20: Densité de fiabilité floue avec la loi Weibull 82

Figure. IV.21: Probabilité de défaillance floue avec la loi Weibull..... 83

Figure. IV.22: Taux de défaillance floue avec la loi Weibull 83

Figure. IV.23: MTBF floue avec la loi Weibull..... 84

Figure. IV.24: Fiabilité floue avec la loi Weibull 84

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Formules des indices de fiabilité 38

Tableau II.2 : Disciplines de la disponibilité, fiabilité et maintenabilité..... 40

Tableau III.1 : Concept d'un ensemble flou 54

Tableau III.2 : Concept d'un operateur union 57

Tableau III.3 : Concept d'un operateur intersection 58

Tableau III.4 : Concept d'un operateur négation 58

Tableau III.5 : Conditions du Modus Ponens..... 61

Tableau IV.1 : Données de fiabilité de turbine à gaz examinée 74

Tableau IV.2: Données de défaillances de turbine à gaz examinée..... 75

ABREVIATION

Acronyme	Signification
TAG	Turbine à Gaz.
R	Fiabilité
F/ $\overline{A}$	Défaillance
λ	Taux de défaillance
M	Maintenabilité
A	Disponibilité
$\overline{A}$	Indisponibilité
MTTF	Durée moyenne sans panne (Mean Time To Failure).
MTBF	Moyenne des temps entre deux défaillances d'un système réparable (Mean Time Between Failure).
MTTR	Durée moyenne de défaillance et de réparation.
MDT/ *TMI*	Temps moyen d'indisponibilité ou temps moyen d'arrêt propre.
MUT/ *TMD*	Temps moyen de disponibilité.
μ	Taux de réparation.
D_m	Disponibilité moyenne.
D_i	Disponibilité intrinsèque.
D_O	Disponibilité opérationnelle.
D_∞	Disponibilité asymptotique.
TBF	temps de bon fonctionnement.
TTR	temps techniques de réparation.
TTE	temps techniques d'exploitation.
MTL	moyenne des temps logistiques.
$\mathbf{D(t)}$ ou A(t)	Disponibilité instantanée

Nomenclature

Variable	Nomenclature	Unité
F	Fraction de fuel par rapport à l'air	[-]
$P.C.I$	Pouvoir calorifique inférieur (gaz naturel)	[kJ/kg]
η_{mec}	Rendement mécanique	[%]
η_{glob}	Rendement global	[%]
η_{CC}	Rendement de la chambre de combustion	[%]
η_{mec}	Rendement mécanique	[%]
η_{Th}	Rendement théorique	[%]
m_a	Début massique d'air	[kg/s]
h	Enthalpie	[-]
Q_{CC}	Chaleur apportée au gaz au niveau de chambre de combustion	[kJ]
Cp_{moy}	Chaleur spécifique des gaz brulé	[kJ]
Cp_{air}	Chaleur spécifique air	[kJ]
W_{ST}	Le travail isentropique fourni par le gaz à la turbine	[kJ/kg]
W_T	Le travail réel fourni par le gaz à la turbine	[kJ/kg]
W_{SC}	Le travail isentropique fourni au gaz par le Compresseur	[kJ/kg]

W_C	Le travail réel fourni par au gaz par le Compresseur	[kJ/kg]

Introduction générale

Introduction général

Dans un contexte économique fortement concurrentiel, la maintenance industrielle constitue un enjeu économique décisif dans le secteur industriel, tant au plan strictement économique qu'au plan humain. En effet, depuis quelques années les activités de maintenance ont connu de fortes évolutions, le secteur est en pleine mutation. Face à l'évolution des technologies et à la sophistication des matériels, les attentes et les besoins en matière de compétences changent. Nombreuses sont les techniques qui peuvent être, et doit être, utilisées dans un programme de maintenance. Les systèmes mécaniques et les machines constituant la majorité des équipements industriels, le contrôle de vibration constitue généralement l'élément clé des programmes de maintenance conditionnelle. Néanmoins, cette technique ne peut fournir toute l'information requise.

En effet, l'évolution actuelle des technologies et des techniques de production, ainsi que l'augmentation de la concurrence, ont conduit les industriels à réaliser d'importants progrès dans le domaine de la qualité de leurs produits, c'est-à-dire leur aptitude à satisfaire les besoins de l'utilisateur. C'est dans cette démarche d'amélioration de la qualité que se place la fiabilité prévisionnelle. En effet, celle-ci qui responsable de prédire l'évolution des capacités et performances d'un produit en fonction du temps de fonctionnement, en tenant éventuellement compte des temps de défaillance des produits. Cependant, la complexité croissante des installations industrielles et leurs contraintes d'exploitation sévères ont augmenté. L'exploitation de ces systèmes industriels a mis en valeur ces stratégies de maintenances. Dans ce projet de Master, nous avons proposé d'évaluer la fiabilité d'une turbine à gaz, par le développement d'outils permettant l'estimation du processus de dégradation dans ces systèmes et l'analyse de leurs disponibilités. Nous avons proposé d'explorer de nouvelles distributions basées principalement sur des fonctions de la logique floue, utilisant les lois exponentielles et de Weibull, en tenant compte de l'estimation des paramètres de la fonction proposée. Cela est fait dans le but d'estimer la fiabilité et planifier la durée de dysfonctionnement d'un système de turbine à gaz examiné.

Nous nous, étudions dans ce projet de master la prédiction de la fiabilité prévisionnelle à partir d'une exploitation des données relatives au comportement du système, et des mesures nécessaires pour assurer une meilleure efficacité pendant le fonctionnement d'une turbine à gaz. L'intérêt majeur de la contribution apportée dans ce travail, réside dans les résultats de validation des modèles proposés par rapport aux autres approches de fiabilité

usuelles. Tels que l'approche exponentielle et celle de la distribution de Weibull, et d'autres approches qui sont utilisées dans le domaine de fiabilité des systèmes industriels.

Pour mieux présenter notre travail, nous avons divisé ce mémoire en quatre chapitres pour décrire le travail envisagé.

Le premier chapitre nous avons détaillée la turbine à gaz V94.3a, utilisée au niveau du centrale de production d'électricité (SKB) de Berrouaghia, en suit nous avons faire une description généraux de la turbine à gaz (leur composantes et le principe fonctionnement..).

Le deuxième chapitre nous présentons concepts généraux de la fiabilité et la disponibilité, Au début, après avoir mentionné la définition et objectifs de fiabilité nous touchons les différentes fonctions de base et fiabilité de système constitué de plusieurs composants, nous mentionné aussi concept sur la maintenabilité lequel il est étroitement lié à la fiabilité et à la disponibilité, après ce la, chacun sont définies : la disponibilité, les grandeurs moyennes, quantification de la disponibilité et Aussi nous avons mentionné la relation entre la disponibilité et la fiabilité et amélioration de la disponibilité et enfin en termine le chapitre par la taux de disponibilité et la relation entre les notions FMD; Ce que l'on peut dire a une relation de corrélation directe, dans chaque fois que les matériaux sont disponibles dans une installation industrielle (turbine à gaz) , il est nécessaire de s'assurer que leur fiabilité est optimale et qu'il est aussi maintenable

Le troisième chapitre, nous avons fait une présentation complète et générale à logique floue, nous commençons par énoncer les fondements de la logique floue après la définition qui est représenté dans la variable linguistique, la fonction d'appartenance, les opérations sur l'ensemble floue et proposition floue. Ensuite, nous présentons en détails les méthodes de raisonnement flou fait appel à trois notion et étapes fondamentales (L'implication floue, L'inférence floue, L'agrégation des règles) et modélisation par la logique floue contenant deux modèles. Après, nous décrivons la structure générale d'une commande floue et Lequel composé de quatre modules principaux. Enfin, nous avons présenté les applications, avantages et inconvénients la logique floue.

Le quatrième chapitre on évaluera de la fiabilité prévisionnelle par les systèmes experts à base de la logique floue et dans lequel effectuer cette méthode, on combine la logique floue avec un système expert qui reçoit des informations a propos des grandeurs caractéristiques de la turbine à gaz examinée et leurs conditions de fonctionnement. La logique floue utilise les informations précédentes et a l'aide de l'opinion de l'expert a propos la

dépendance entre les composantes et la priorité des composantes (les éléments les plus défaillantes) il donne une évaluation fidèle de la fiabilité prévisionnelle de turbine.

En fin de compte, la conclusion clarifiera tout ce que nous ferons dans cette thèse, et elle montrera de l'intérêt pour les résultats que nous obtiendrons.

Chapitre I

Etude descriptive de la turbine à gaz

I.1 Introduction

Quand nous avons allons à Shariket Kahraba Berrouaghia SKB-Spa (SKB), nous avons découvert une turbine à gaz de type V94.3a qui contribue avec le générateur pour produire l'électricité.

Dans ce chapitre généralement nous fournissons une explication simple de Shariket Kahraba Berrouaghia SKB-Spa et après nous savons la turbine de gaz de cette l'entreprise et les différentes ses caractéristiques techniques, ses composantes et comment fonctionner. Aussi nous avons mentionné le rendement de cycle de chaque composantes de ses turbine à gaz .finalement on termine par leur avantages et inconvénients.

I.1.1 Représentation centrale de l'entreprise

La central de Shariket Kahraba Berrouaghia SKB-Spa s'inscrit dans le cadre de la diversification des producteurs de l'électricité au niveau du marché national.il s'agit du $3^{ème}$ producteur d'électricité indépendant au niveau du marché algérien.



Figure I.1: Spa-SHARIKET KAHRABA BERROUAGHIA (S.K.B)

Qui est Shariket Kahraba Berrouaghia SKB-Spa?

- C'est une société par actions constituée par SONALGAZ à hauteur de 51% et de SONATRACH (holding AIE) à hauteur de 49%.

- Elle a été crée le 27 octobre 2004.
- Elle a pour objectif la réalisation, l'exploitation et la maintenance de la centrale de production d'électricité, ainsi que la commercialisation de l'énergie électrique produite.

I.1.2 Vue d'ensemble du projet

La centrale électrique à cycle simple à turbines à gaz de 2x271 MW(ISO) est située dans la commune de BERROUAGHIA, wilaya de MEDEA. La centrale est dotée de deux (02) turbine à gaz SIEMENS du type V94.3a et de deux alternateurs SIEMENS (WESTING HOUSE -USA) du type SGen5-100A d'une puissance de 308 MVA et d'une tension 16.5KV par groupe.

L'énergie est générée par 2 turbines à gaz (GT) d'une puissance de 271 MW chacune. Chaque turbine est capable de fonctionner avec du gaz naturel comme source primaire ou avec du fuel oïl comme source de secours.

Le gaz naturel provenant de Hassi R'Mel est utilisé comme gaz naturel pour l'alimentation des turbines à gaz. L'approvisionnement en fuel oïl est réalisé via des camions-citernes.

Les turbines et alternateur des unités de production sont installés de la salle des machines et les deux unités sont exploitées à partir d'une salle de commande (contrôle).

Unité de production de l'électricité est composée :

- Une turbine à gaz sous package.
- Un alternateur.

Salle des machines : cette salle est équipée avec les services :

- Mécanique : eau et air comprimé.
- Electrique : éclairage.
- Moyens de manutention : pont roulant.
- Système de filtration et de ventilation.
- Système d'extraction.

I.1.3 Caractéristique général du projet

Les turbines à gaz siemens : sont des machines à un seul arbre ayant une seule enveloppe. Elles sont aptes à faire fonctionner des générateurs dans des centrales à la charge de base et à la charge de crête. Ainsi qu'à des applications de commandes mécaniques.

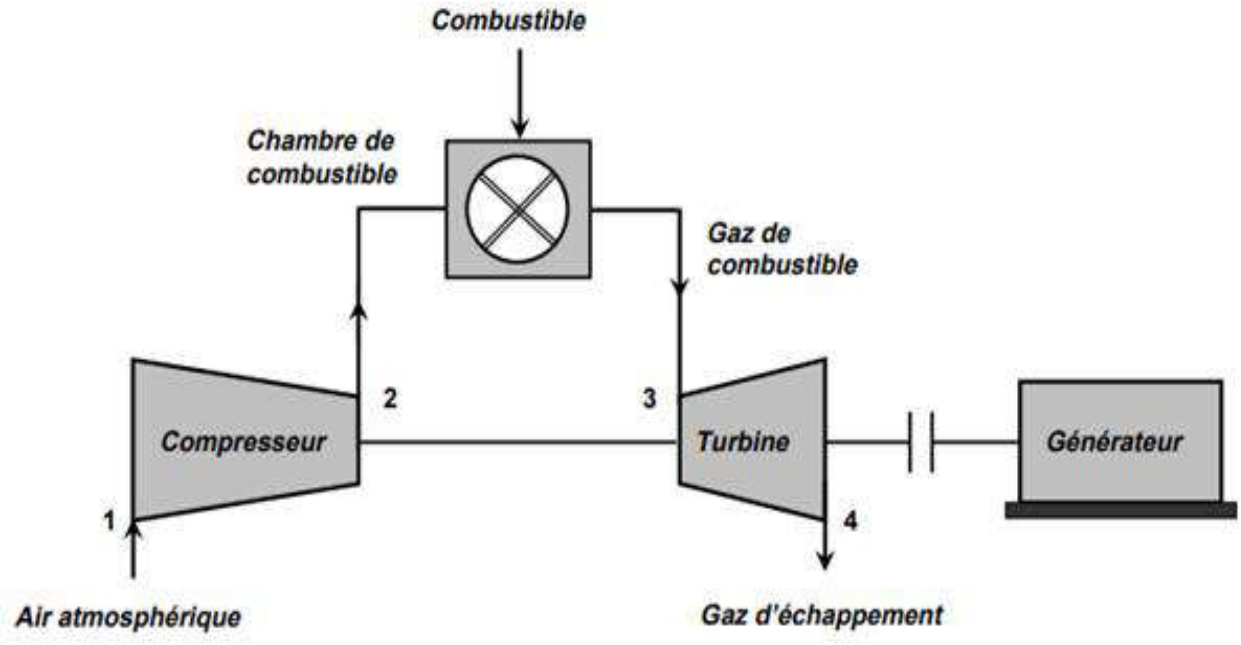


Figure I.2: Turbine à gaz à cycle simple

Elles peuvent fonctionner par des combustibles liquides, tels que l'huile combustible légère, ou par des combustibles gazeux ayant des valeurs calorifiques différentes, tels que gaz naturel ou gaz de haut fourneau.

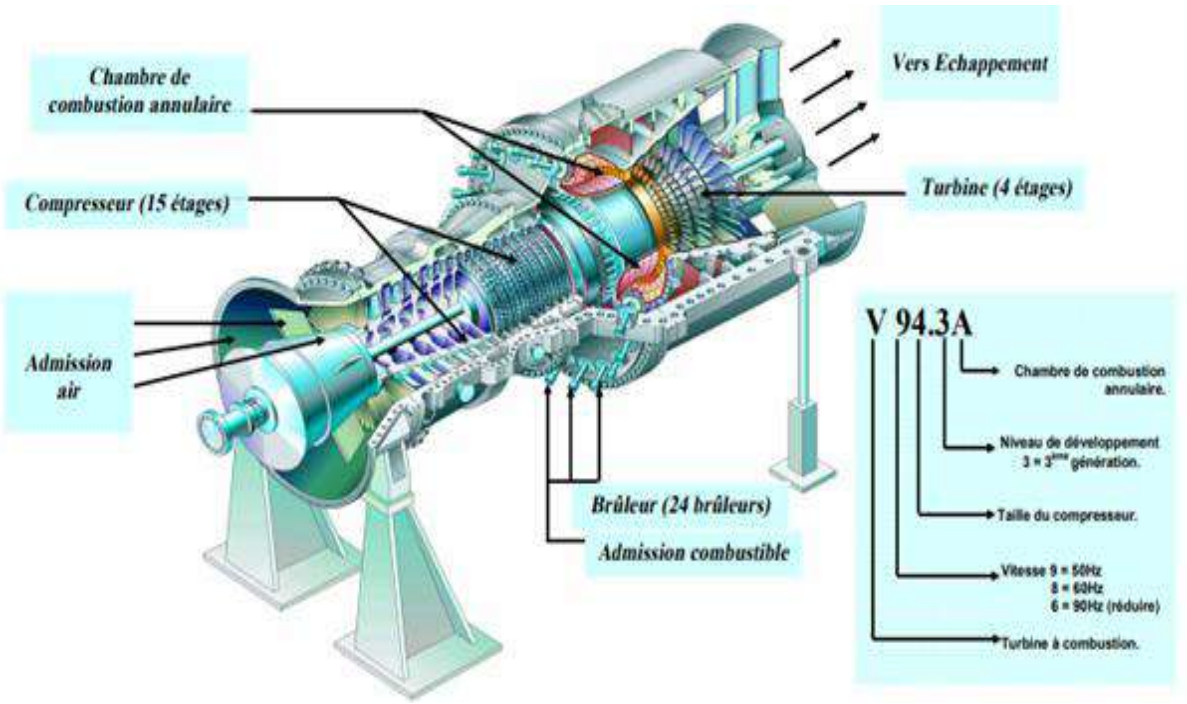


Figure I.3: Turbine à gaz avec chambre de combustion annulaire et brûleur hybrides (HBR) Modèle V94.3a

D'autre terme on dit que le modèle siemens V94.3a de turbine à gaz est une turbine monobloc de conception lourde avec un axe commun pour le compresseur et la turbine .Elle est conçue pour assurer un fonctionnement continu et économique fournissant la fiabilité maximum et sans chauffage, vibration ou bruit excessifs.

La turbine à combustion V94.3a comporte une grande variété d'avancées technique d'ingénierie et de caractéristique de conception qui ont été prouvée par un fonctionnement opérationnel à succès.

I.1.4 Caractéristiques techniques

Caractéristique constructives du modèle :

- La puissance totale à la borne usine : 489 MW.
- Puissance nominale : 271 MW.
- Fréquence : 50 HZ.
- Température : 15.5 ℃ .
- Humidité : 67% .
- La pression : 913 mbar.

Données général de conception

- Série de modèle à turbine à gaz : SGT5-4000F (V94.3a).
- Emploi de la turbine à gaz : Entraîne le générateur.
- Cycle : Gaz.
- Rotation de l'arbre : Sens de rotation (Vu de l'extrémité côté excitation) Antihoraire.

Section compresseur :

- Nombre étages : 15 étages.
- Type de compresseur : axial.

Section turbine :

- Nombre étages : 4 étages.
- Température des gaz d'échappements : 1500℃.

Chambre de combustion :

- Nombre de chambre de combustion : une seule chambre.
- Type : chambre annulaire.
- Nombre de bruleurs : 24.
- Nombre de dispositifs d'allumage par bruleurs: 24 bougies d'allumage avec 28 transfos d'allumage.

Circuit de combustible gazeux :

- Nombre de vannes d'arrêt d'urgence : une seule vanne.

Circuit de combustible liquide :

Système à diffusion :

- Nombre de vannes d'arrêt d'urgence : 2 vannes.

Système d'huile de graissage :

- Capacité de cuve à l'huile : 24000 L.
- Capacité du système d'huile : 11000 L.
- Nombre d'aspirateur des buées d'huile : 01.

Pompe à l'huile principale :

- Quantité : 02.
- Entraînement : moteur CA.

Pompe à l'huile de secours :

- Quantité : 01.
- Entraînement : moteur CC.

Pompe à l'huile à soulèvement :

- Entraînement : moteur CC.

I.1.5 Schéma principale de la centrale

La figure I.4 représente le schéma principal de la centrale :

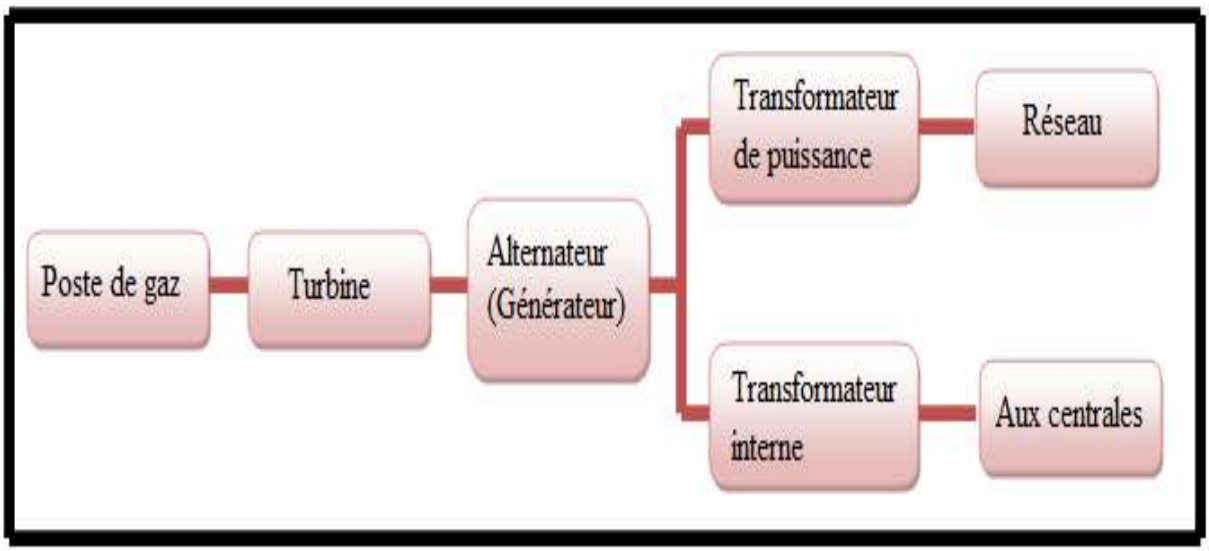


Figure I.4: Schéma principale de la centrale

a) Poste de gaz : Le gaz entrant passe par trois opérations:

- Filtration (filtre).
- Réchauffeur pour augmenter la température 40 ℃ et la pression 60 bars.
- Détente pour rabaisser la pression de 60 bars et 30 bars.
- La sortie: pression de 30 bars et température de 30℃.

b) La turbine : est composée de trois éléments :

- Un compresseur : il se compose de 15 étages, pour rôle de comprimer de l'air ambiant à une pression comprise de 15 bars environ.
- Une chambre de combustion, dans laquelle un combustible gazeux ou liquide est injecté sous pression, puis brûlé avec l'air comprimé avec un fort excès d'air afin de limiter la température des gaz d'échappement ; T=1500℃ / P= 15bars.

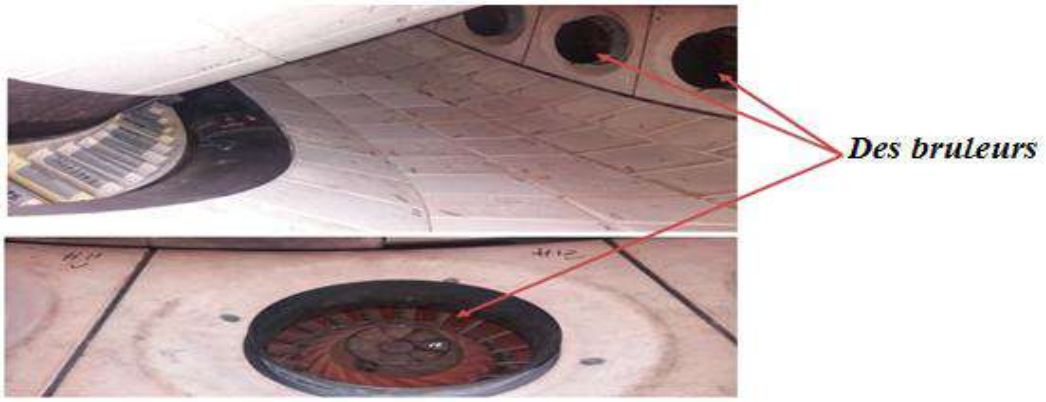


Figure I.5: Chambre de combustion de TG V94.3a

- Une turbine : elle est composé de quatre (04) étages, détendre les gaz brûlés dans une turbine produisant du travail mécanique.



Figure I.6: Image d'une turbine V94.3a

c) **L'alternateur (générateur)** : transformation de puissance mécanique en puissance électrique.

d) **Transformateur de puissance :** est un transformateur réversible 16.5kv/220kv.

e) **Transformateur interne :** Transformateur auxiliaire de soutrage 16.5kv/6.6kv.



Figure I.7: Transformateur de puissance avec transformateur interne de la centrale

Les transformateurs de distribution dont la tension d'au moins une des phases dépasse 1000V Sont considérés comme des transformateur de puissance .leur rôle est essentiel des le réseau électrique pour permettre de transporter l'électricité sur de longues distances. De par leur haut niveau de tension, ils répondent à des contraintes spécifiques voir **(ANNEXE A)** notamment au niveau de l'isolation leur fiabilité et leur durée de vie doivent être particulièrement élevée.

I.2 Description de la turbine à gaz

Les turbines à gaz font partie de la catégorie des turbomachine définie comme étant des appareils dans lesquels a lieu un échange d'énergie entre un moteur tournant autour d'un axe à vitesse constante et un fluide en écoulement permanant. Solon le type de fluide utilisé, dit fluide actif ou fluide moteur, il y'a plusieurs turbines une turbine hydraulique, les turbines à vapeur, une turbine à gaz. Dans ce dernier cas, le fluide moteur le plus fréquemment utilisé provient des gaz de combustion d'un combustible solide liquide ou gazeux .selon le type d'énergie délivré, les turbines à gaz se répartissent en deux classes : d'une part les turbomoteurs fournissent de l'énergie mécanique disponible sur un arbre et d'autre part, les turboréacteurs fournissent de l'énergie cinétique utilisable pour la propulsion.

I.2.1 Présentation général :

La turbine à gaz est une machine motrice permettant d'entraîner des alternateurs pour la génération d'électricité, au des pompes et compresseur, en général de fort puissance, de façon autonome.

Ses principales qualités sont **[1]** :

- 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 combustible et lubrification).
- Fonctionnement sous conduite et surveillance automatisée.
- Mise en régime rapide (quelques dizaines de minutes).

I.2.3. Définition de la turbine à gaz :

La turbine à gaz, appelée aussi turbine à combustion, elle est Inventée en 1731 par John Barber est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne dont le rôle est de produire de l'énergie mécanique (rotation d'un arbre) à partir de l'énergie contenue dans un hydrocarbure (fuel, gaz...). **[2]**

La figure I.8 représente la coupe schématique d'une turbine à gaz.

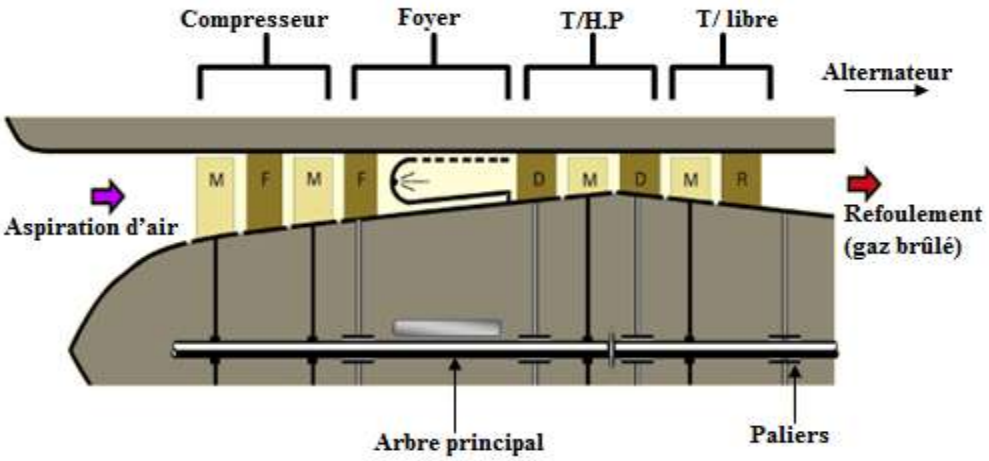


Figure I.8: Coupe schématique d'une turbine à gaz

Avec :

M : Roues mobiles ; D : Distributeur ;

F : Roues fixes ; R : Redresseur finale.

Ou bien c'est une machine qui transforme l'énergie thermique en énergie mécanique (grâce un arbre tournant). Elle est composée d'un ou plusieurs compresseurs rotatifs, de dispositifs thermiques pour chauffer le combustible (chambre de combustion), une ou plusieurs turbines, système de contrôle et autres équipements auxiliaires essentiels, voir **(ANNEXE B).**

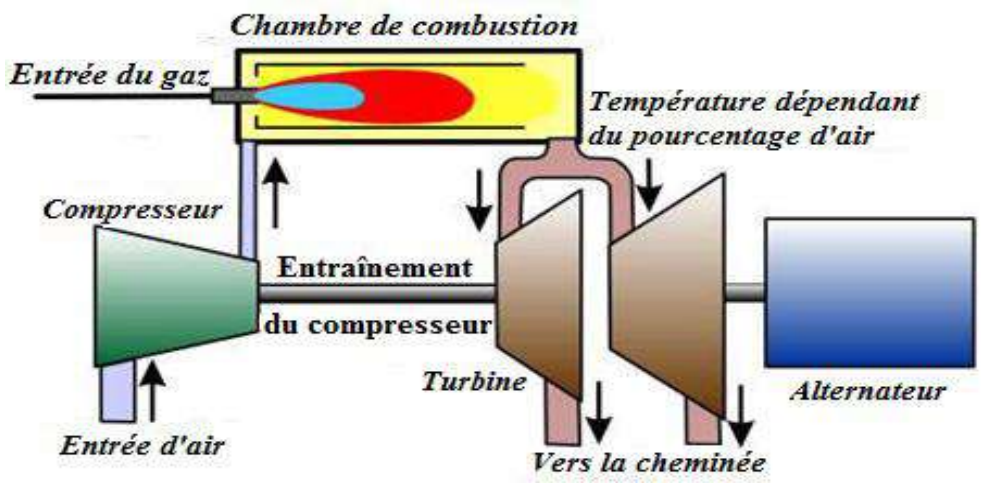


Figure I.9: schéma descriptive de la turbine à gaz

I.2.4 Composants d'une turbine à gaz :

Dans le cas plus simple une turbine à gaz est constituée par un filtre d'entrée d'air, un compresseur, une chambre de combustion, une turbine de détente et le système d'échappement vert l'atmosphérique.

La figure I.10 représente les différentes sections de la turbine à gaz :

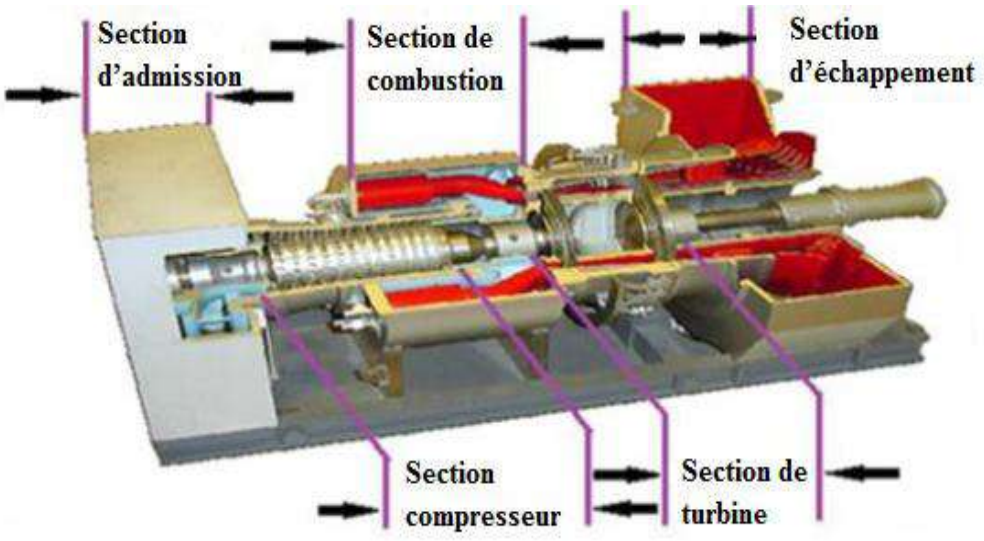


Figure I.10: les composantes d'une turbine à gaz

I.2.4.1 Section d'admission

L'aspiration de la turbine est une enceinte ou compartiment qui abrite les filtres, la conduite, le silencieux, le coude, le caisson d'admission et d'autres accessoires. Ce système regroupe les fonctions de filtrage et de réduction de bruit à celle de direction de l'air dans le compresseur de la turbine. Ce compartiment est muni de portes pour un accéder facilement aux filtres pour les besoins de maintenance**. [3]**

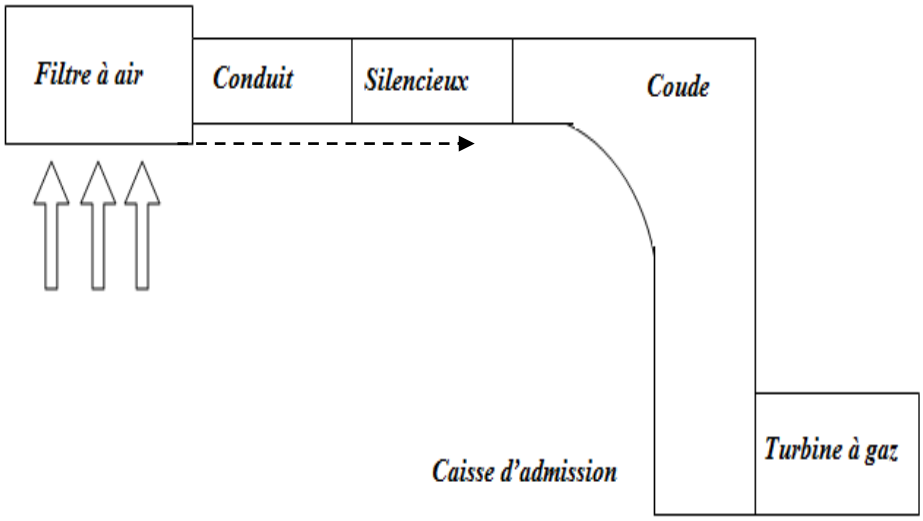


Figure I.11 : Représentation de compartiment d'admission

I.2.4.2 Section Compresseur :

Centrifuge ou plus généralement axial, qui a pour rôle de comprimer l'air avant son admission dans la chambre de combustion, il utilise plus moitié de la puissance produite par la turbine de détente.

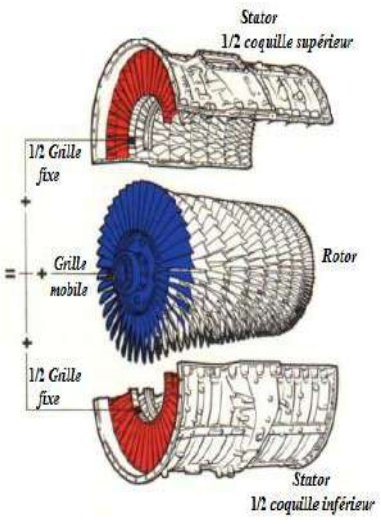


Figure I.12: le Rotor et le Stator d'un compresseur axial **[4]**

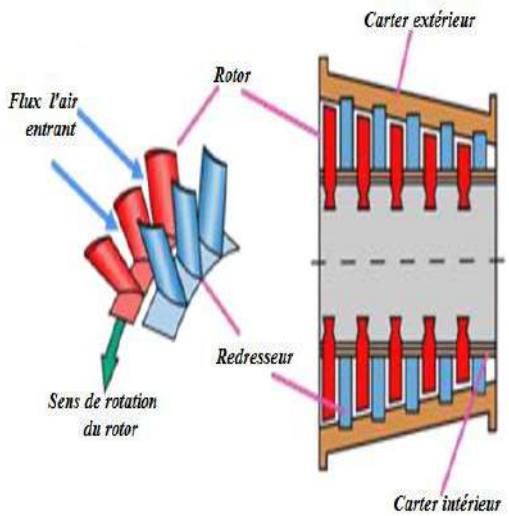


Figure I.13: Section Compresseur

I.2.4.3 Chambre de combustion :

Dans laquelle un combustible gazeux ou liquide est injecté sous pression, puis brûlé avec l'air comprimé, avec un fort excès d'air afin de limiter la température des gaz d'échappement.

Le rôle de la chambre de combustion c'est de fournir la quantité de chaleur nécessaire pour le cycle de la turbine à gaz.

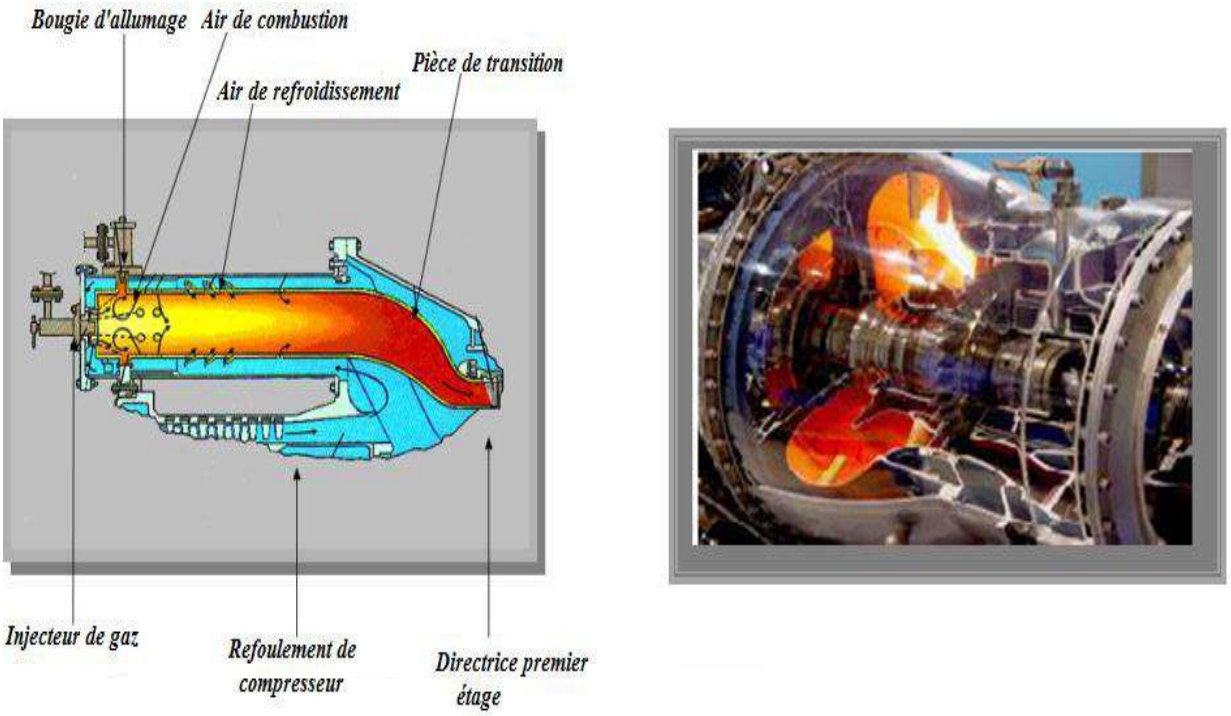


Figure I.14: Chambre de combustion

Une chambre de combustion doit satisfaire des contraintes sévères :

- assurer une combustion complète du combustible ;
- réduire les émissions de polluants ;
- minimiser la perte de charge (qui représente un surcroît de compression) ;
- assurer une bonne stabilité de la température d'entrée turbine ;
- occuper un volume aussi réduit que possible tout en permettant un bon refroidissement des parois. **[5]**

Nous avons trois types de chambre :

- ✓ Tube de flamme ;
- ✓ Les chambres à silos ;
- ✓ Les chambres annulaires.

1/-Tube de flamme : très utilisée. Le schéma ci-dessous représente la coupe d'une chambre de combustion du type tube de flamme, très communément rencontrée en pratique.

2/-Les chambres à silos : des chambres séparées de l'axe, ont une grande taille leur avantage est de réduire les émissions de polluant NOx.

3/-Les chambres annulaires: comportent une seule enceinte annulaire avec des trous pour l'injection du carburant. Ce type permet d'obtenir une flamme courte et un meilleur rendement de combustion, utilisée en aviation.

I.2.4.4 Section Turbine :

La section de la turbine généralement comprend un certain nombre d'étages ; chacun d'entre eux se compose d'un étage stator et d'un étage rotor (aubes), dans l'étage stator (directrice), les gaz à des températures et des pressions élevées fournies par la pièce de transition, sont accélérés et acheminés vers un étage d'aubes du rotor montées sur un disque connecté à l'arbre de puissance **[6].**



Figure I.15: Image réel d'une Turbine



Figure I.16: Image d'un Aube Turbine

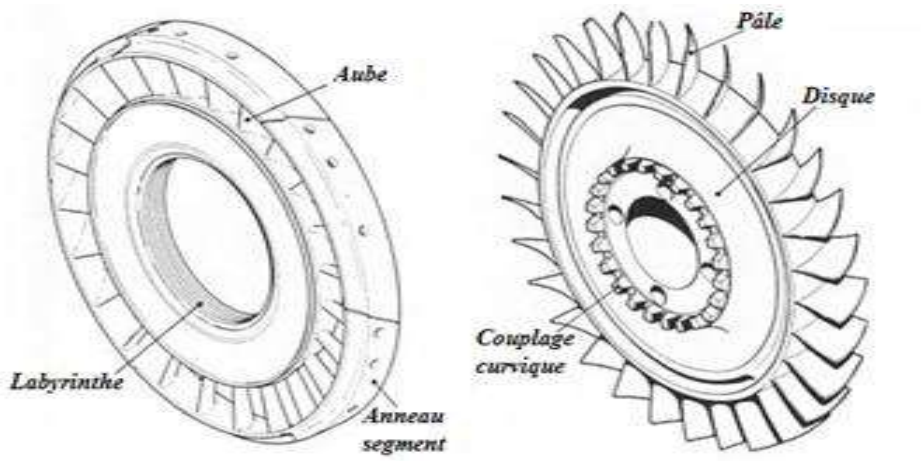


Figure I.17 : La directrice et la roue de turbine **[7]**

I.2.4.5 Section d'échappement :

La section d'échappement se compose essentiellement du plenum ou cadre d'échappement ainsi que le caisson d'échappement. **[3]**

IL a pour fonction l'expulsion vers l'atmosphère des gaz provenant de la détente dans les roues de la turbine. **[8] [9]**



Figure I.18: système d'échappement

En bref, pour ce qui a été écrit, on peut dire que la turbine à gaz est constituée [**10]:**

- ✓ **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.
- ✓ **Turbine de puissance** : accouplée à l'alternateur.

I.3 Classification des turbines à gaz :

Le monde connait un grand développement industriel, et une diversité à la construction des turbomachines dans les dernières années. Cette diversité est variée selon les domaines d'application ou bien les objectifs d'utilisation de ces machines ; dans ce terme on peut classer les turbines à gaz en trois grandes familles comme démontré dans la figure ci-dessous figure I.19 :

- ✓ Selon le mode de construction.
- ✓ Selon le mode de travail.
- ✓ Selon le mode de fonctionnement thermodynamique. **[11]**

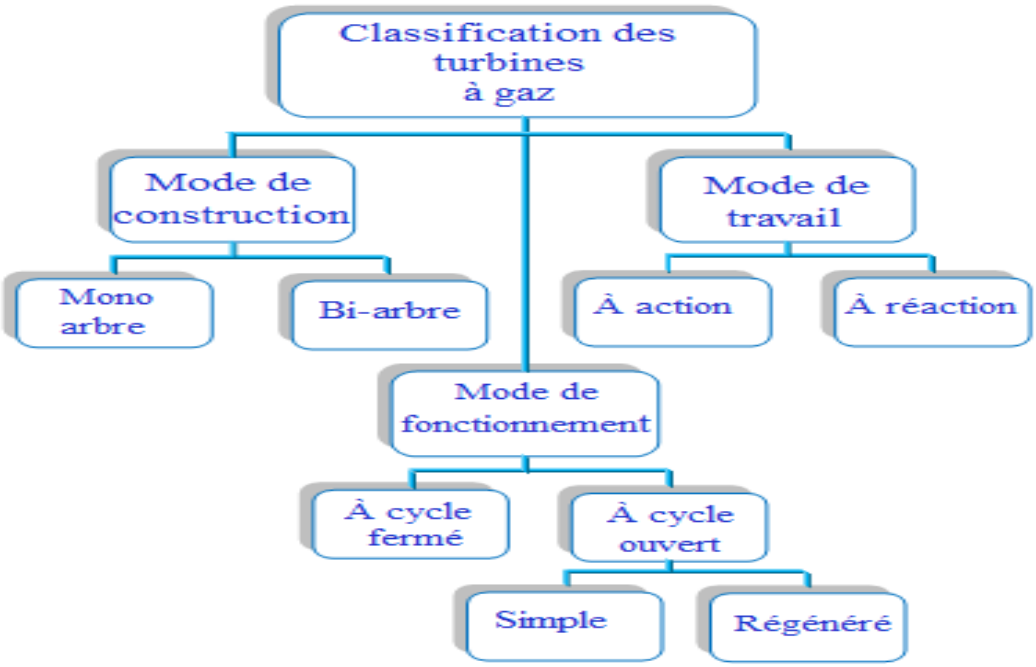


Figure I.19: Classification de Turbine A Gaz

I.3.1 Selon le mode de construction :

L'objectif pour lequel, on utilise la turbine à gaz définit le type qu'on doit choisir. Dans l'industrie, on trouve les turbines à un seul arbre, dites aussi mono-arbre (Figure I.20).

Elles sont généralement utilisées dans le cas où on cherche un fonctionnement avec une charge constante (pour entrainer les générateurs d'électricité).

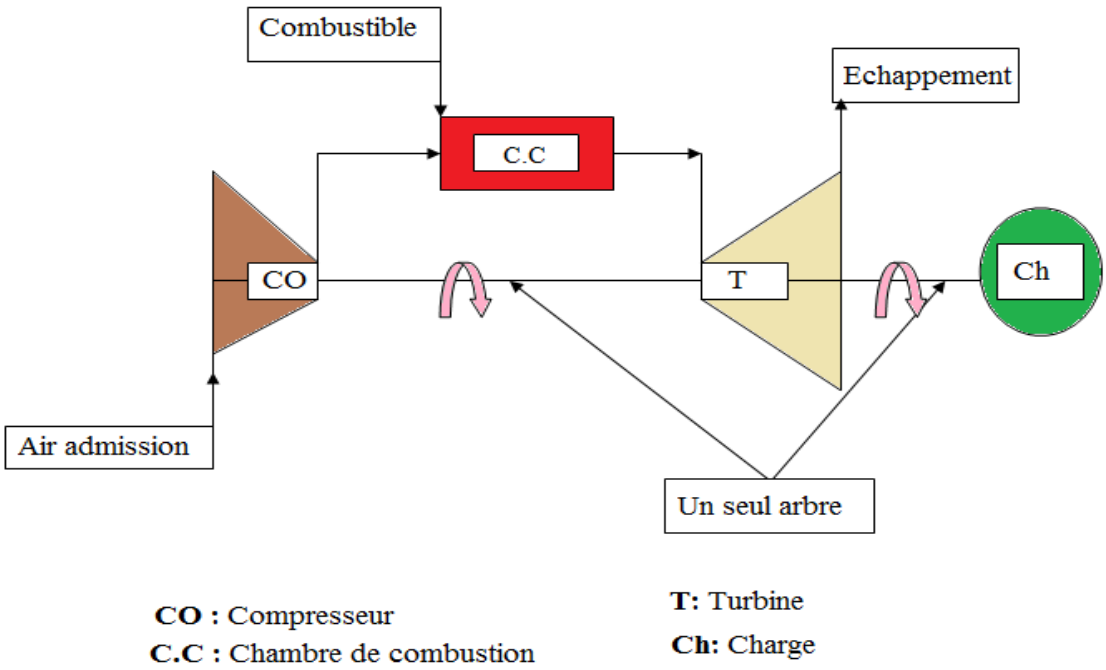


Figure I.20: La turbine à un seul arbre

Un deuxième type, englobe les turbines à deux arbres (bi-arbre) (Figure I.21) :

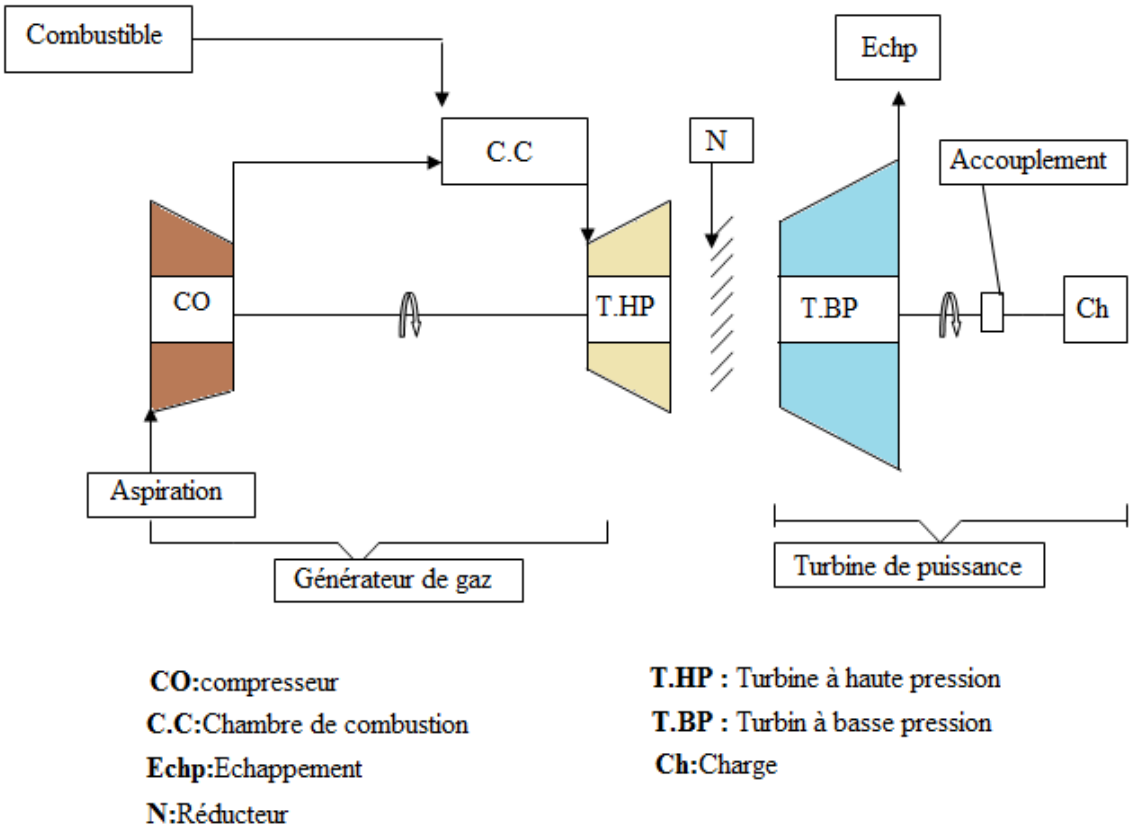


Figure I.21: La turbine à deux arbres

Elles ont l'avantage d'entrainer des appareils à charges variables (pompes, compresseur...).
Elles se composent de deux parties, la première assure l'autonomie de la turbine, la deuxième est liée à la charge.

I.3.2 Selon le mode de travail :

On distingue deux types de turbine **[11]** :

A/-Turbine à action : Le principe de fonctionnement d'une turbine à action, est que la transformation thermodynamique du fluide se fait uniquement dans la directrice (entre aubages fixes).Les aubes mobiles n'ont qu'un rôle à jouer, c'est de transformer l'énergie cinétique acquise par la détente (P1 > P2) en travail mécanique communiqué au rotor. L'évolution des gaz dans la roue se fait sans variation de pression statique (P1 = P2).

B/-Turbine à réaction : une partie de l'énergie thermique est transformée dans la roue énergie cinétique et mécanique. L'évolution des gaz dans la roue se fait avec variation de la pression statique (P1>P2>P3).

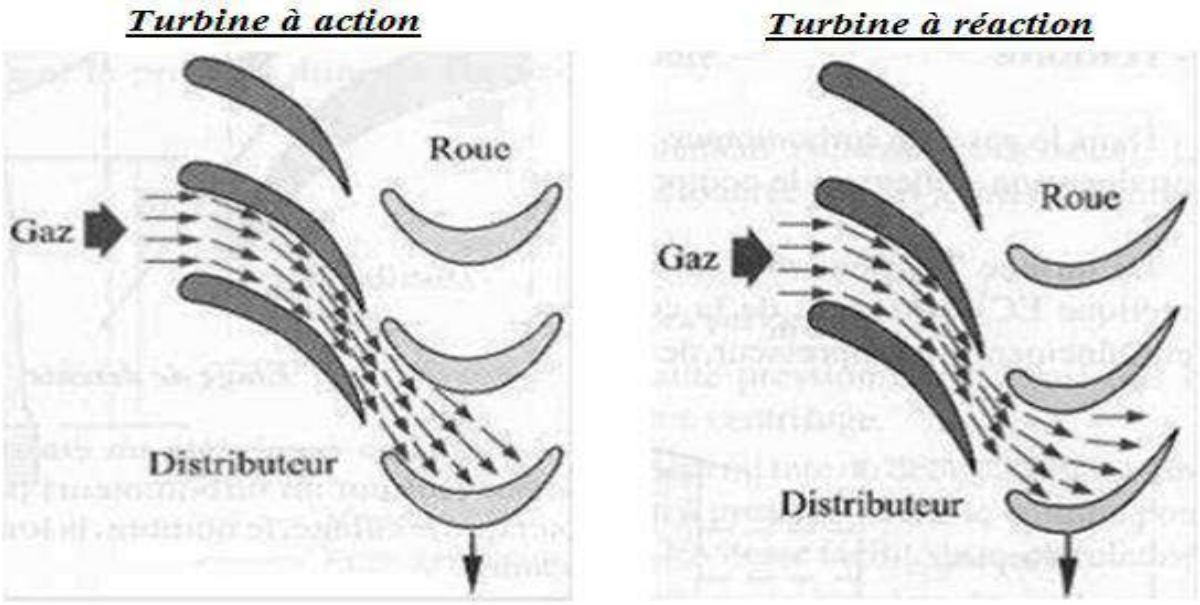


Figure I.22 : Schéma d'une turbine à action et à réaction

❖ **Dans la turbine à action :**

-L'action des gaz sur les palles de la roue provoque la rotation.

-La détente s'effectue dans le distributeur (ΔP_{roue} =0).

❖ **Dans la turbine à réaction :**

-La résultante des forces aérodynamique sur le profil entraîne la rotation.

-La détente s'effectue en partie des le distributeur et dans la roue.

I.3.3 Par le mode de fonctionnement thermodynamique :

Il existe deux cycles thermodynamique :

1. **Turbine à gaz à cycle fermé :** dans laquelle le même fluide est repris après chaque cycle.
2. **Turbine à gaz à cycle ouvert :** c'est une turbine dont l'aspiration et l'échappement s'effectuent directement dans l'atmosphère**. [12]**

Ce type de turbine qui est le plus répandu se divise en deux classes **[3]** :

a. Turbine à cycle simple (sans récupération) : c'est une machine utilisant un seul fluide pour la production d'énergie mécanique, après la détente, les gaz possédant encore un potentiel énergétique sont perdus dans l'atmosphère à travers l'échappement.

b. Turbine à cycle régénéré (avec récupération) : c'est une turbine dont le cycle thermodynamique fait intervenir plusieurs fluides moteurs dans le but d'augmenter le rendement de l'installation.

I.4 Principe fonctionnement de la Turbine à gaz

I.4.1 Principe de fonctionnement :

Une turbine à gaz fonctionne de la façon suivante :

- Elle extrait de l'air du milieu environnant (aspiration) ;
- Elle le comprime à une pression plus élevée le compresseur (compression) ;
- Elle augmente le niveau d'énergie de l'air comprimé en ajoutant et en brûlant le combustible dans une chambre de combustion (gaz chaud);
- Elle achemine l'air à pression et à température élevées vers la section de la turbine, qui convertit l'énergie thermique en énergie mécanique pour faire tourner l'arbre ; ceci sert, d'un côté, à fournir l'énergie utile à la machine conduite, couplée avec la machine au moyen d'un accouplement et, de l'autre côté à fournir l'énergie nécessaire pour la compression de l'air, qui a lieu dans un compresseur relié directement à la section turbine ;
- Elle décharge à l'atmosphère les gaz à basse pression et température. **[13]**

I.4.2 Etude Thermodynamique

Les conditions standards employées dans l'industrie des turbines à gaz sont: T_{amb}= 15 °C, P_{amb} = 1.013 bar et l'humidité relative de H= 60 %, qui sont établies par l'organisme international de normalisation (ISO).

I.4.2.1 Cycle idéal de Brayton (réversible) :

Le cycle de Brayton théorique est un cycle idéal correspondant à la turbine à gaz élémentaire. Il est principalement utilisé pour la production d'électricité.
Il existe deux types de cycles de Brayton selon qu'il soit ouvert ou refermé sur l'atmosphère. C'est la première variante qui retiendra notre attention puisque c'est celle qui est utilisée dans les centrales électriques (Turbines Gaz -Vapeurs). **[12]**

Chaque cycle de Brayton peut être caractérisé par deux paramètres significatifs: le rapport de pression et la température de combustion. Le rapport de pression du cycle est la pression au point 2 (pression à la sortie du compresseur) divisée par la pression au point 1 (pression d'admission du compresseur). Dans un cycle idéal, ce rapport de pression est également égal à la pression au point 3 divisé par la pression au point 4.

La Figure I.18 montre les diagrammes classique, Température - Entropie (T-S) et Pression – Volume (P-V) pour ce cycle. **[14]**

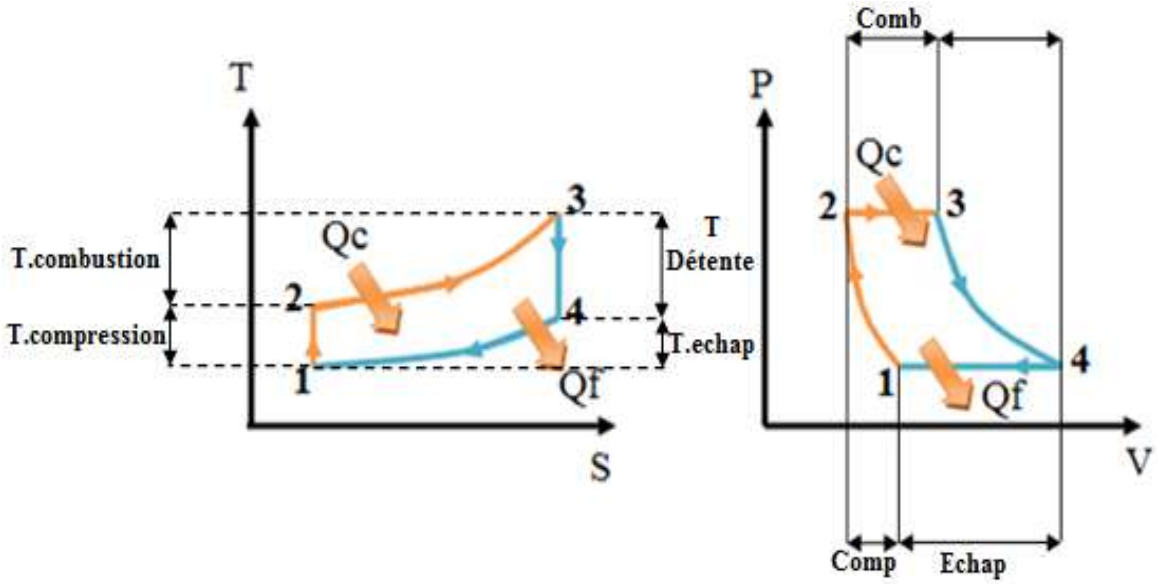


Figure I.23 : Cycle idéal de Brayton

Le cycle théorique comporte aussi ; La température d'entré T_1, qui donne la valeur à l'admission du compresseur $T_1 = T_a$, La température T_2 qui donne la valeur de fin de compression isentropique et la température du gaz augmente dans la chambre de combustion de T_2 jusqu'à T_3, cette valeur de la température T_3 est déterminée en fonction du bilan de la combustion. Après cela, les gaz se détendent adiabatiquement dans la turbine (T_3 jusqu'à T_4).

Donc les transformations thermodynamique de ce cycle sont :

- 1 à 2 : compression isentropique de l'air (compresseur).
- 2 à 3 : combustion isobare (échangeur de chaleur).
- 3 à 4 : détente isentropique (turbine).
- 4 à 1 : refroidissement isobarique (échangeur de chaleur).

I.4.2.2 Cycle réel (irréversible):

Le cycle réel se différencie du cycle idéal de la manière suivante :

- ✓ La compression est adiabatique, de rendement isentropique η_c**:** en raison des travaux de frottement, la température réelle est plus élevée que la température théorique, et la transformation de compression n'est plus isentropique 1- 2_s mais 1-2, tel que $T_2 > T_{2s}$.
- ✓ La détente dans la turbine est adiabatique, de rendement isentropique : en raison des travaux de frottement, la transformation de la détente ne s'effectue pas suivant un arc d'isentropique, mais suivant un arc tel que $T_4 > T_{4s}$. **[14]**

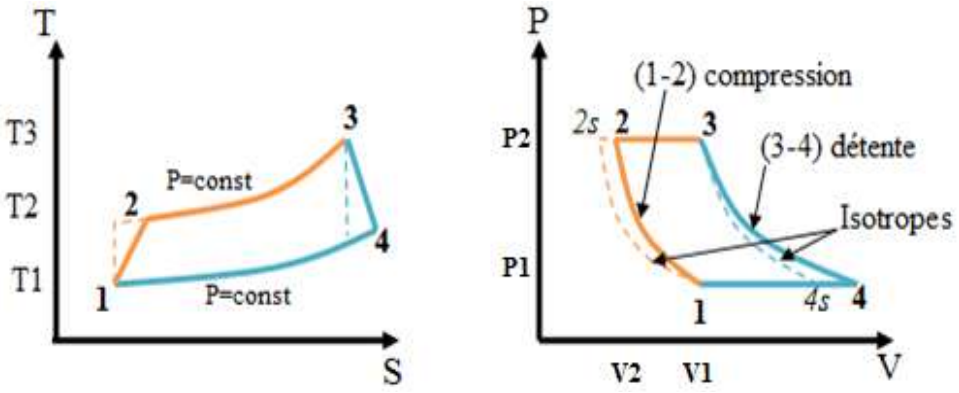


Figure I.24: Cycle thermodynamique réel

I.5 Rendement de cycle

❖ **Rendement isentropique de Compresseur :**

La figure ci-dessous (Figure. I.25) montre le processus de la compression dans les deux cas ; idéal de1 à 2s, et réel de 1 à 2 :

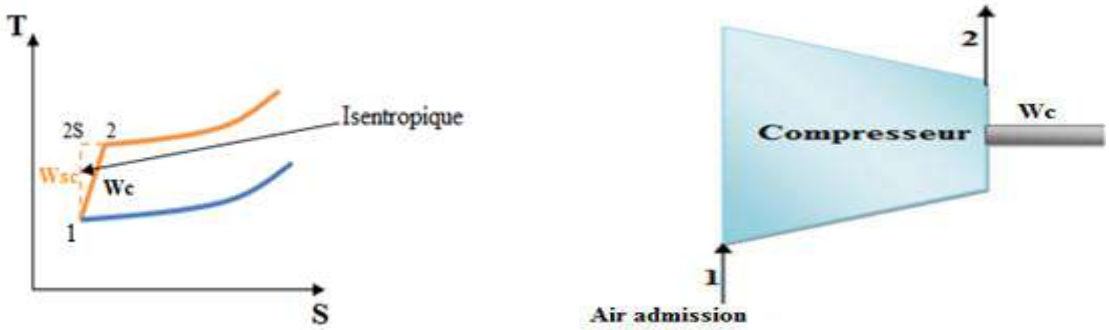


Figure I.25: Représentation de la notion de travail d'un compresseur

On peut calculer le rendement isentropique de compresseur comme suite :

$$\eta_{SC} = \frac{W_{SC}}{W_C} \qquad \textbf{(I.1)}$$

✓ **Dans le cas idéal,** le travail massique isentropique fourni à l'air par le compresseur W_{SC} peut être calculé par la formule suivante:

$$W_{SC} = Cp_{air}(T_{2S} - T_1) \qquad \textbf{(I.2)}$$

Ou bien : $$W_{SC} = h_{2S} - h_1 \qquad \textbf{(I.3)}$$

Avec : h : c'est l'enthalpie.

✓ **Dans le cas réel,** le travail massique réel fourni pour entrainer le compresseur W_C peut être calculé par la formule suivante:

$$W_C = Cp_{air}(T_2 - T_1) \quad \textbf{(I.4)}$$

Ou bien : $$W_C = h_2 - h_1 \quad \textbf{(I.5)}$$

❖ **Chambre de combustion :**

Chaleur apportée au gaz au niveau de chambre de combustion Q_{CC} donne comme suite :

$$Q_{CC} = Cp_{moy}(T_3 - T_2) \quad \textbf{(I.6)}$$

Ou bien : $$Q_{CC} = h_3 - h_2 \quad \textbf{(I.7)}$$

❖ **Rendement isentropique de Turbine :**

La Figure I.26 illustre le processus de la détente de cycle de Brayton dans les cas idéal et réel, de 3 à 4s, et de 3 à 4 respectivement.



Figure I.26: Représentation de la notion de travail d'une turbine

Le rendement isentropique de la turbine donne par :

$$\eta_{ST} = \frac{W_T}{W_{ST}} \quad \textbf{(I.8)}$$

✓ **Dans le cas idéal,** le travail massique isentropique obtenu par la turbine W_{ST} est donné par l'équation suivante :

$$W_{ST} = Cp_{moy}(T_{4S} - T_3) \quad \textbf{(I.9)}$$

Ou bien : $$W_{ST} = h_{4s} - h_3 \quad \textbf{(I.10)}$$

✓ **Dans le cas réel,** le travail massique réel obtenu par la détente de la turbine W_T peut être calculé par la formule suivante:

$$W_T = Cp_{moy}(T_4 - T_3) \quad \textbf{(I.11)}$$

Ou bien : $$W_{ST} = h_4 - h_3 \quad \textbf{(I.12)}$$

❖ **Rendement de la Turbine à gaz:**

Le rendement isentropique (théorique) de la turbine donne par :

$$\eta_{TAG} = \frac{|W_{UT}|}{Q_{reçut}} \quad \textbf{(I.13)}$$

Avec : W_{UT} ⇒c'est le travail utile donne par : $|W_{UT}| = |W_T| - |W_c|$

Et : $Q_{reçut} = Q_{CC}$ ⇒ Quantité de chaleur reçut donne par : $Q_{CC} = Cp_{moy}(T_3 - T_2)$

On peut calculer la Q_{CC} par la relation :

$$Q_{cc} = \text{F.PCI} \quad \textbf{(I.14)}$$

❖ **Le rendement global :**

Il est évalué comme suit :

$$\eta_{glob} = \frac{P_{UT}}{m_a * \text{PCI}} \quad \textbf{(I.15)}$$

Avec : P_{UT} ⇒ la puissance utile donne par : $P_{UT} = |P_T| - |P_C|$

$$P_T = m_a * W_T \quad \textbf{(I.16)}$$

Et

$$P_C = m_a * W_C \quad \textbf{(I.17)}$$

❖ **Le rendement mécanique:**

Le rendement mécanique formulé par la relation suivante :

$$\eta_{mec} = \frac{\eta_{glob}}{\eta_{Th}} \quad \textbf{(I.18)}$$

I.6 Systèmes auxiliaires de la turbine à gaz :

I.6.1 Système de démarrage :

Les composants du système de démarrage incluent: Le moteur électrique d'induction, un convertisseur de couple, mécanisme d'encliquetage hydraulique, l'embrayage de démarrage, l'engrenage des accessoires (réducteur auxiliaire de vitesse). **[3]**

La figure I.27 montre le système de démarrage de la turbine à gaz.

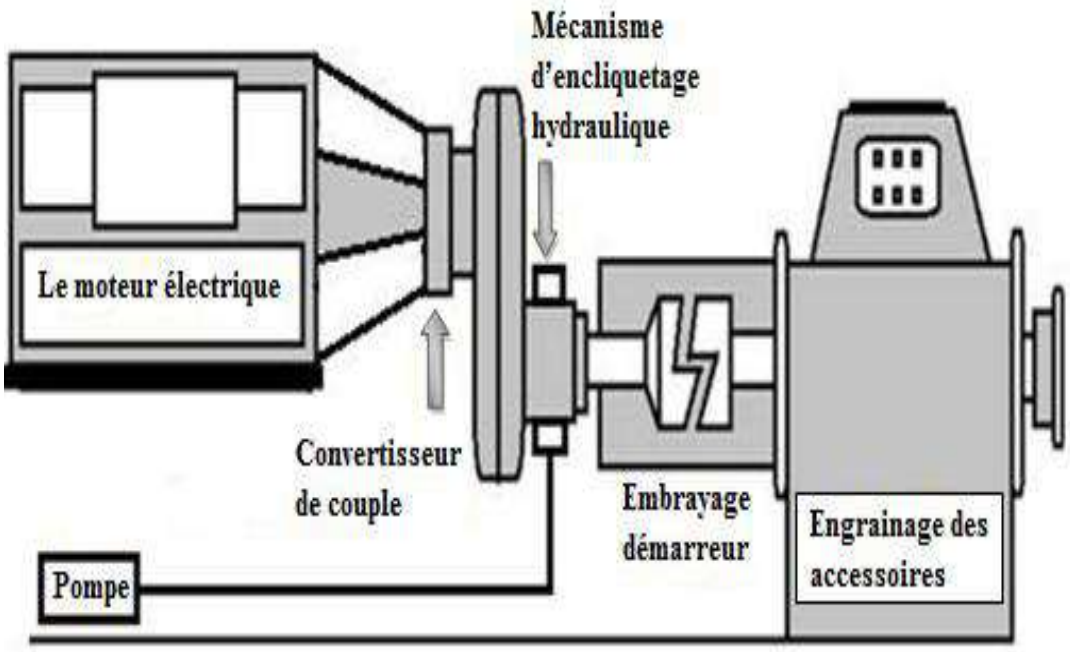


Figure I.27 : Système de démarrage de la turbine à gaz

I.6.2 Système de lubrification (graissage):

Le système de lubrification utilise une huile sous pression, avec une température adéquate et une propriété et villosité convenables pour un meilleur fonctionnement de la turbine, des accessoires et des équipements de charge entrainée.

La turbine utilise l'huile sous pression en boucle fermé pour le refroidissement, le nettoyage et la réduction de frottement entre les parties tournantes (les paliers, les dents des pignons, le choc de couplage et l'embrayage), l'huile est également utilisé pour l'étanchéité. **[3]**

La figure I.28 représente les composantes du système de lubrification :

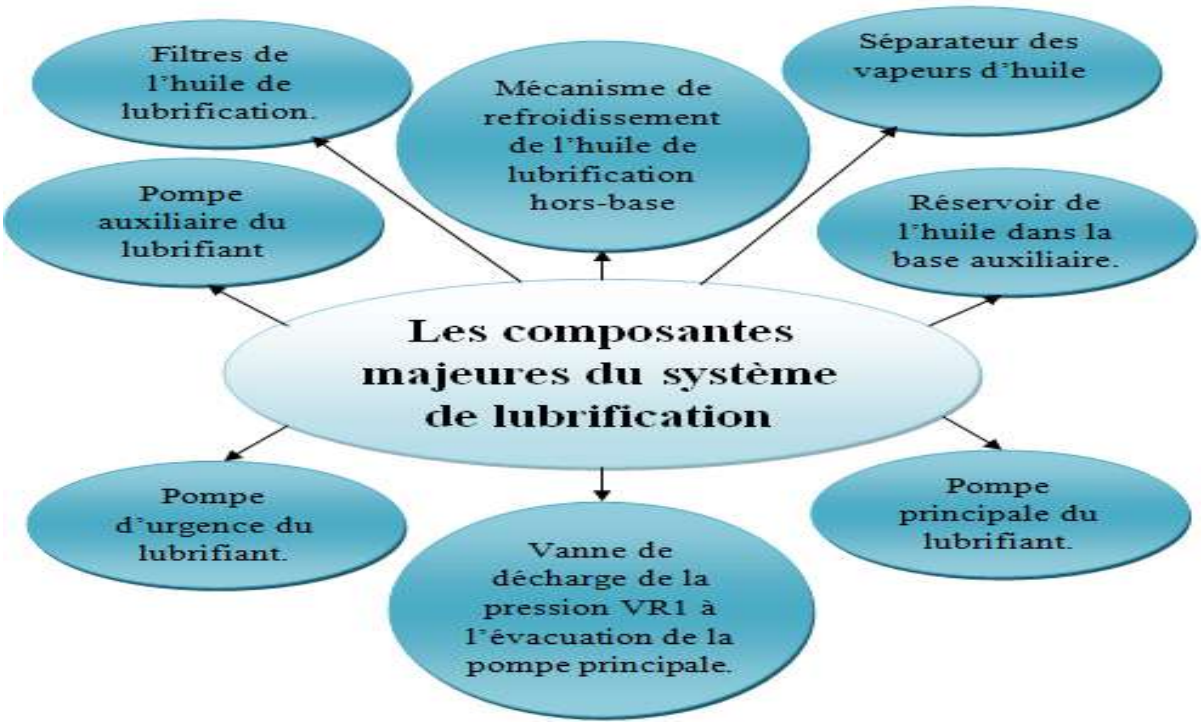


Figure I.28 : Composantes du système de lubrification

I.6.2.1 Circuit d'huile :

Une pompe aspire l'huile d'un réservoir sous la partie intégrale des accessoires de la turbine, comprimant l'huile et le jet dans un circuit fermé en passant par un réfrigérant qui enlève la chaleur excessive, en passant ensuite par le filtre qui sépare les éléments dépassant, cet huile s'écoule à la fin dans les parties concernées de lubrification et fait le retour à la caisse d'huile sous force de gravite. Le circuit d'huile muni d'un dispositif de commande et de protection contre une haute température ou une basse pression, ces limites conditions active des alarme et déclenche le système. **[3]**

I.6.2.2 Pompes d'huile de lubrification :

Trois pompes sont utilisées dans le système de lubrification.

1/-Pompe auxiliaire : De type centrifuge alimenté par un courant alternatif.

2/- Pompe d'urgence : Elle fonctionne pendant la coupure de courant ou en cas ou la pompe mécanique ou la pompe auxiliaire sont incapables de maintenir une pression adéquate de l'huile pour le fonctionnement normal de la turbine à cause d'une défaillance quelconque dans la pompe auxiliaire ou la pompe mécanique.

3/- Pompe mécanique : C'est une pompe volumétrique entrainée par l'engrenage des accessoires dans l'engrenage de commande inferieur. Cette pompe prend la place de pompe auxiliaire juste après le désaccouplement de système de démarrage de l'arbre de la turbine HP (à la fin de cycle de démarrage de la turbine à gaz, à environ de 60% de la vitesse de l'arbre HP).

I.6.3 Système de l'air de refroidissement et d'étanchéité :

Système de l'air de refroidissement et d'étanchéité :

L'air est retiré de compresseur axial, vers les champs de combustions de la turbine à gaz et aussi de l'air d'étanchéité de gaz haute pression du compresseur centrifuge. Puis utilisés pour refroidir : les surfaces avant et arrière de la roue de la turbine du première et deuxième étage, l'ensemble de tuyère et anneau de retenu du première étage, carcasse du rotor turbine, le cadre d'échappement et des éléments de support sous pression des corps de cylindre interne, les doublures des chambres de combustion, coudes et raccourcies de réduction.

Le passage de l'air de refroidissement dans les différentes parties des turbines est incorporé dans diverses parties et sections de la turbine.

Ces sources d'air sont utilisées aussi pour l'étanchéité dans les joints étanches à l'huile dans les paliers de turbine afin de diminuer les fuites d'huile de graissages dans les paliers. **[3]**

I.6.4 Système d'huile de contrôle (déclenchement) :

Le système d'huile de déclenchement hydraulique est l'interface de protection primaire entre le panneau de commande de la turbine et les composants de la turbine qui fait admettre ou arrêter le combustible à gaz entrant à la turbine par le mécanisme de soupape de déclenchement VH-5 et de prendre également, comme un mesure supplémentaire de sécurité, les aubes de deuxième étage à la position (complètement ouverte).**[3]**

I.7 Application d'une turbine à gaz :

Les turbines à gaz ont une très grande utilité dans l'industrie, du fait qu'elles sont des appareils pour la production de l'énergie mécanique. Elles peuvent être utilisées pour l'entraînement des :

1/-Appareils fixes: Ces appareils font l'objet d'un stage de formation. Ils sont destinés aux services industriels suivants :

- ✓ Transmission électrique, pour la production d'énergie électrique par cycle ouvert.
- ✓ Transmission électrique, pour la production d'énergie électrique par cycle combiné.
- ✓ Transmission électrique, pour la production d'énergie électrique par cogénération.
- ✓ Entraînement des pompes de réinjection.
- ✓ Entraînement des compresseurs pour gazoducs.
- ✓ Entraînement des pompes pour oléoducs.
- ✓ Procédés industriels particuliers.

2/-Appareils mobiles: Du point de vue historique, ces appareils ont été introduits en premier. Ils comprennent les domaines suivants :

- ✓ Chemins de fer.
- ✓ Propulsion maritime.
- ✓ Aviation.
- ✓ Traction routière. **[15]**

I.8 Avantages et Inconvénients des TAG

a- Les inconvénients :

La turbine à gaz présente de sévères limitations dues aux contraintes techniques de sa réalisation. Ces principales limites sont les suivantes :

- ✓ Baisse importante de rendement des compresseurs centrifuges à un régime plus faible que le régime nominal.
- ✓ Température de combustion limitée par la résistance mécanique de la turbine.
- ✓ Chute importante du rendement à charge partielle en particulier pour les machines à simple arbre.
- ✓ Coût d'usinage des aubages élevé notamment de la turbine. Inaptitude aux arrêts et démarrages fréquents et peu progressifs.

b- Les avantages :

- ✓ Puissance massique et volumique très élevée du fait du fonctionnement continu.
- ✓ Simplicité apparente de construction (un rotor dans un carter et un brûleur) et équilibrage (peu de vibrations).
- ✓ Pollution limitée en NOx du fait de l'excès d'air et de la température limitée, aptitude à la récupération de chaleur (cogénération).

- ✓ Longévité en marche stationnaire.
- ✓ Aptitude potentielle à utiliser des combustibles variés et de moindre qualité (gaz pauvre, fuel lourd). **[16]**

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude technique sur les Turbines à Gaz, Nous expliquant le principe de fonctionnement et définir les caractéristiques de différentes composants de la Turbine, les différents systèmes auxiliaires nécessaires, on a vu aussi des calcule pour le rendement.

.

Chapitre II

Introduction aux fiabilités des systèmes : disponibilité

I.1 Introduction

Un système est constitué de plusieurs composants assurant divers fonctions. Une des plus importantes mesures de sa performance est sa fiabilité. La fiabilité a sans doute pris son développement depuis la dernière guerre mondiale. Elle est vite devenue une science à part entière dans les applications appartenant à de nombreux domaines. Elle a pour fondements mathématiques la statistique et le calcul des probabilités qui sont nécessaires à la compréhension et à l'analyse des données de fiabilité.

La fiabilité d'un système est définie comme étant la probabilité que le système fonctionne durant une période de temps sous des conditions spécifiées. Un objectif de la théorie de la fiabilité est de trouver le moyen d'évaluer la fiabilité d'un système complexe à partir de la connaissance des fiabilités des composants le constituant. D'où l'évaluation de la fiabilité d'un système est une caractéristique importante.

d'autre part il y'a la disponibilité et par définition, la disponibilité est l'aptitude d'un bien/d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, Il ne faut pas confondre la disponibilité avec la « rapidité de réponse », que l'on appelle aussi « performance ».

La disponibilité est aussi à prendre de manière relative. Les systèmes n'ont pas la même importance suivant le moment, l'impact n'est pas le même selon qu'on a absolument besoin du système ou qu'on est dans une période de moins grand besoin.

La fiabilité, maintenabilite et la disponibilité fonctionnelle de l'équipement ont une influence essentielle sur la performance des systèmes.

Dans ce chapitre, nous présentons concepts généraux de la fiabilité et la disponibilité, Les grandeurs moyennes, les types, amélioration, estimation et disponibilité d'un système et finalement en termine par une petite conclusion.

II.2 Concepts Généraux de la Fiabilité

II.2.1 Définition de fiabilité *R* (Reliability)

La fiabilité est considérée comme la science des défaillances. Par définition, la fiabilité est « l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée » **[17-18]**

La fiabilité alors c'est le maintien de la qualité dans le temps, sans discontinuité. Le temps est donc la variable principale mais il peut être parfois remplacé par une autre : nombre de cycles d'ouverture / fermeture pour un relai, nombre de tours pour un moteur. **[19]**

La fiabilité se distingue selon l'étape d'étudiée de la vie du système **[20] :**

1. La fiabilité prévisionnelle : c'est celle qui est d´exterminée, durant la phase de conception, sur la base d'un modèle mathématique défini à partir des données de fiabilité de ses composantes.

2. La fiabilité estimée ou intrinsèque : c'est la fiabilité mesurée après avoir conçu le système et ceci à l'aide d'un ensemble d'essais.

3. La fiabilité opérationnelle : c'est la fiabilité mesurée sur un matériel en exploitation. Elle dépend des conditions réelles d'exploitations et du support logique.

II.2.2 Objectifs de la fiabilité [21]

La fiabilité a pour objectif de :

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

II.2.3 Etude de la fiabilité d'un système [22]

La détermination de la fiabilité d'un système électronique, mécanique ou autre nécessite tout d'abord de connaître la loi de la fiabilité (ou la loi de défaillance) de chacun des composants intervenant dans le système.

1. Pour un système électronique : chaque composant à un poids important dans la fiabilité du système, la fiabilité du système est donc calculé en fonction de la fiabilité de tous ses composants. Les calculs sont effectués sous l'hypothèse que les taux de défaillance sont constants dans le temps, une hypothèse acceptable pour la plupart des composants, ce qui rend les calculs beaucoup plus simple. La détermination des taux de défaillance des composants est effectuée soit à partir des modèles développés dans des bases de données disponibles, soit à partir d'essais effectués sur les composants ou bien à partir des résultats d'exploitation des produits.

2. Pour un système mécanique : La fiabilité d'un système mécanique, contrairement à l'électronique, repose sur la fiabilité de quelques composants élémentaires responsables de son dysfonctionnement, dits composants « responsables» ou «critiques» (parfois un seul).

L'étude de la fiabilité d'un système comprend trois phases importantes :

a) Une phase d'analyse : débute par un diagramme de fonctionnement qui fait apparaître les différents constituants du système susceptibles de compromettre (exposer, risquer) la fonction du système, Pour chaque composant on détermine les modes de défaillances et on recense toutes les causes.

b) Une phase d'estimation : des probabilités d'apparition des défaillances.

c) Une phase de prévision : ou d'estimation de la fiabilité du système.

II.2.4 Fiabilité de système constitué de plusieurs composants

II.2.4.1 En série

La fiabilité R_S d'un ensemble de n constituants connectés en série est égale au produit des fiabilités respectives R_A , R_B , R_C , R_n de chaque composant.

$$R_S = R_A * R_B * R_C *\ldots\ldots..*R_n \qquad \textbf{(II_1)}$$

Si les « **n** » composants sont identiques avec une même fiabilité **R** la formule sera la suivante :

$$R(s) = R_n \qquad \textbf{(II_2)}$$

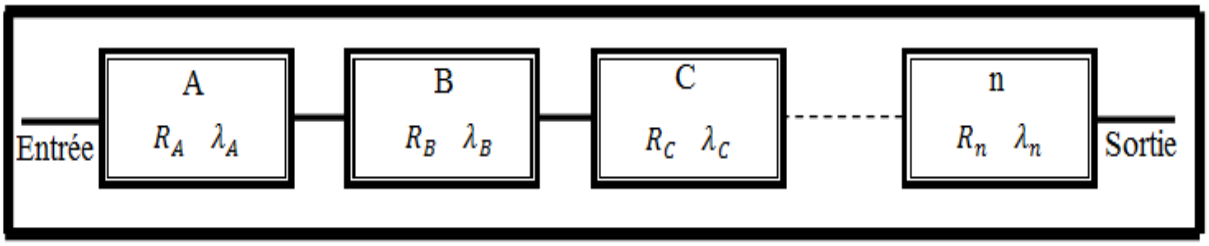


Figure II.1 : Composants en série.

Si les taux de défaillances sont constants au cours du temps la fiabilité sera calculée suivant la formule:

$$R(s) = (e^{-\lambda_A (t)}) * (e^{-\lambda_B (t)}) * (e^{-\lambda_C (t)}) *\ldots\ldots\ldots* (e^{-\lambda_n (t)}) \qquad \textbf{(II_3)}$$

Alors: $MTBF(S) = \dfrac{1}{\lambda_A+\lambda_B+\lambda_C\ldots+\cdots+\lambda_n}$

Si en plus, les composants sont identiques: $\lambda_A = \lambda_B = \lambda_C = \ldots = \lambda_n$

Alors : R(s) = $(e^{-\lambda_n (t)})$ et $MTBF(S) = \frac{1}{n \times \lambda}$ **(II_4)**

II.2.4.2 En parallèle

La fiabilité d'un système peut être augmentée en plaçant les composants en parallèle. Un dispositif constitué de **n** composants en parallèle ne peut tomber en panne que si les **n** composants tombent en panne au même moment.

Si $\mathbf{F_i}$ est la probabilité de panne d'un composant, la fiabilité associée $\mathbf{R_i}$ est son complémentaire:

$$F_i = 1 - R_i$$

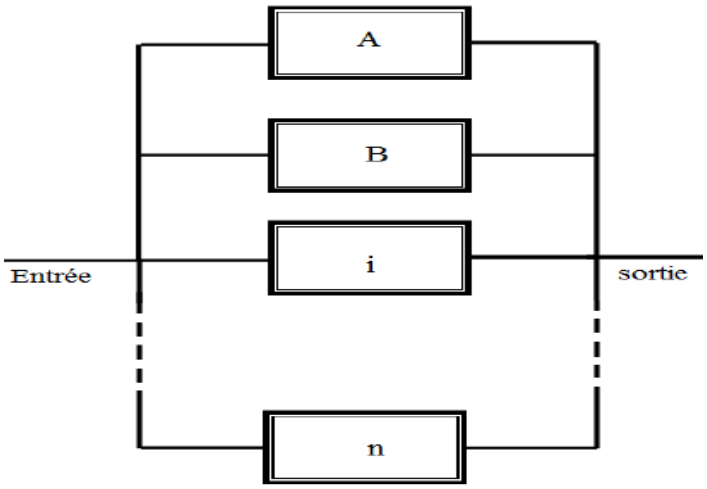


Figure II.2 : Composants en parallèle.

$\mathbf{F_i}$ **:** Représentant la fiabilité associée.

Si la probabilité de panne pour chaque composant repéré **(i)** est notée $\mathbf{F_i}$ alors:

$$R(s) = 1 - (1 - R)^n \quad \textbf{(II_5)}$$

Le cas particulier de deux dispositifs en parallèle si $\boldsymbol{\lambda}$ est constant **R(s)** est obtenu par :

$$R(s) = 1 - (1 - R_A)(1 - R_B) = R_A + R_B - R_A \,.\, R_B = e^{-\lambda_A (t)} + e^{-\lambda_B (t)} - e^{-(\lambda_A + \lambda_B) t}$$

II.2.5 La Fiabilité et ses fonctions de base

Le fonctionnement d'une entité se varié entre système en fonctionnement (fiable) et système à l'arrêt ou non fiable (défaillant), la figure II.3 montre l'état de fonctionnement d'une entité.

Soit :

• X (t) : variable qui représente le fonctionnement d'une entité au cours du temps.

• X (t) = 1 : L'état normal de fonctionnement.

• X (t) = 0 : L'état défaillant.

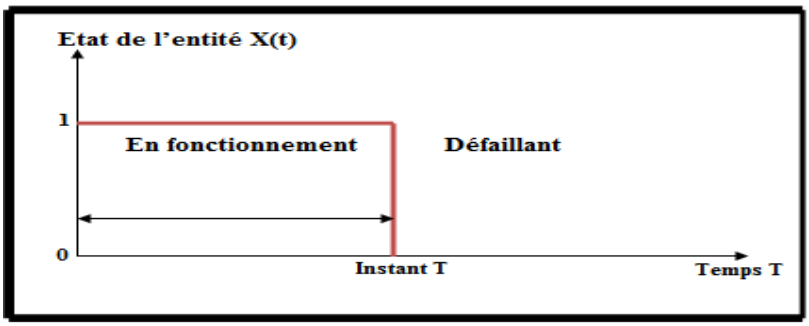


Figure II.3 : Représentation de l'état de fonctionnement d'une entité

- L'instant T d'occurrence d'une défaillance n'est jamais prévisible et correspond à un événement aléatoire.
- L'observation du temps d'apparition de la défaillance correspond à une réalisation particulière d'une variable aléatoire dont il conviendra de connaître les caractéristiques en termes de probabilités.

II.2.5.1 Fonction de densité *f(t)*

Soit f(t) fonction de densité de la variable t. Cette fonction peut être obtenue à partir de données de durées de vie du système observées depuis le début de son exploitation.

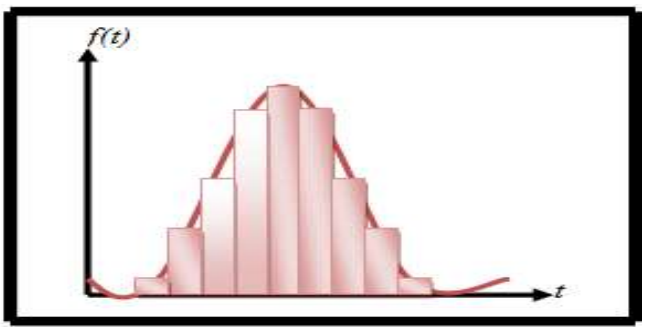


Figure II.4 : Fonction de Densité

$$\boldsymbol{f(t)} > 0$$

$$\boldsymbol{f(t)} = \int_0^{\infty} f(t).dt = 1 \qquad \textbf{(II.6)}$$

$\boldsymbol{f(t).dt}$ **:** Exprime la probabilité que le système tombe en panne entre t et t+ d .

II.2.5.2 Fonction de défaillance *F(t)* ou répartition

Soit F (*t*) la fonction de défaillance associée à la variable aléatoire *t.*

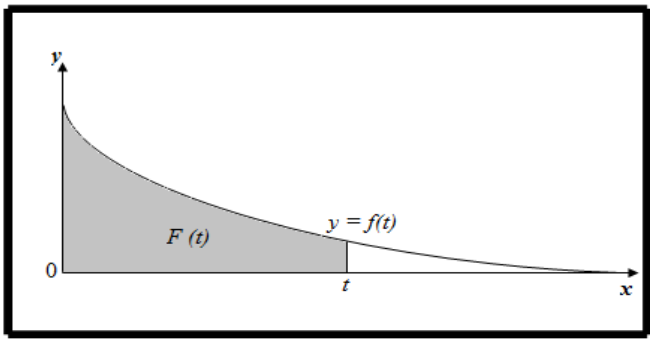


Figure II.5 : Fonction de défaillance

$$F(t) = \int_0^t f(x).dx \qquad \textbf{(II_7)}$$

F(t) exprime la probabilité que le système tombe en panne avant l'instant t.

F(t) = Prob {0< durée de vie < t}.

Une défaillance est « l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonction(s) requise(s) avec les performances définies dans les spécifications techniques».

II.2.5.3 Fonction de fiabilité *R(t)* ou fonction de survie

Soit R(t) la fonction de fiabilité du système :

R(t) exprime la probabilité que le système survive jusqu'à l'instant t.

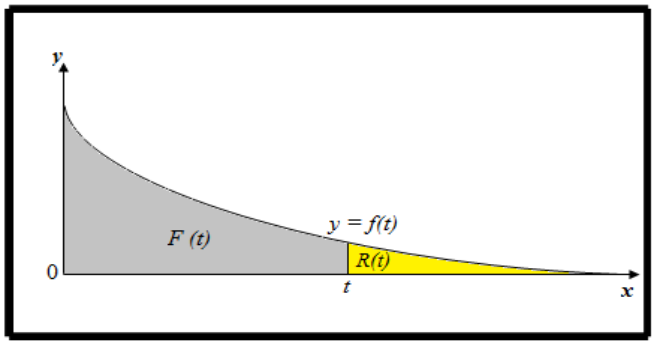


Figure II.6 : Fonction de fiabilité

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(x).dx = 1\text{-}F(t) \qquad \textbf{(II_8)}$$

R(t) = Prob {durée de vie ≥ t}

De notre terme on peut dire que la fonction de fiabilité *R* définie pour tout $t \geq 0$ par : R (t) = 1-F(t). Le nombre R(t) représente la probabilité qu'un dispositif choisi au hasard dans la population n'ait pas de défaillance avant l'instant *t*.

L'aptitude contraire de la fiabilité est appelée dé-fiabilité, et est définie par :

$$\bar{R}(t) = 1 - R(t) = F(t) \qquad \textbf{(II_9)}$$

$\bar{R}(t)$ c'est la probabilité de défaillance du système ou la probabilité complémentaire à 1 de la fiabilité R(t).La Figure II.7 montre les deux fonctions associées.

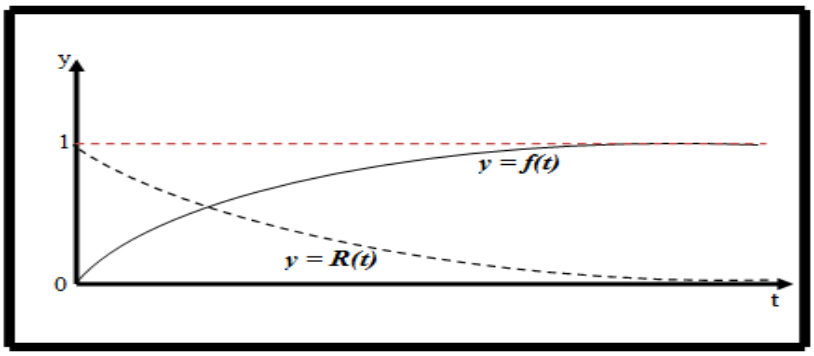


Figure II.7 : Fonction associée

II.2.5.4 Les lois de probabilité utilisées en fiabilité [22]

On distingue deux types

- ✓ Lois discrètes ;
- ✓ Lois continues.

A/-les lois discrètes : Une loi est dite discrète si elle prend ses valeur dans **N** c'est à dire des valeurs entières comme par exemple celle qui compte le nombre de pannes.

Parmi les lois discrètes on peut citer :

1. Loi Uniforme ;
2. Loi de Bernoulli ;
3. Loi Binomiale ;
4. Loi de Poisson ;
5. Loi Binomiale négative ;
6. Loi Géométrique ;
7. Loi Hypergéométrique.

B/-Les lois continues : on peut citer :

1. La loi du Khi deux ;
2. La loi de Birnbaum-Saunders ;
3. La Loi de Cauchy ;
4. La loi Bêta ;

5. La loi Gamma ; 9.Loi Inverse Gamma ;
6. La loi exponentielle ; 10. La loi de Fisher ;
7. La Loi normal ; 11. La Loi Log normal ;
8. La loi de Weibull ; 8. La loi de Student.

Généralement nous intéressons pour d'étude de probabilité d'un équipement par deux lois :

- **La loi exponentielle :** La loi exponentielle a de nombreuses applications dans le domaine de l'ingénierie en particulier dans l'étude de fiabilité d'un équipement. Elle présente également diverses applications dans l'étude des phénomènes d'attentes .Exemples:

- ✓ La durée de vie utile d'un composant électronique
- ✓ Le temps entre deux arrivées consécutives à un guichet automatique.
- ✓ Le temps entre deux défaillances consécutives d'un système informatique Le temps de service à un guichet de pièces détachées d'une usine…

On peut dire que la distribution exponentielle s'applique aux systèmes opérants en continu (systèmes électroniques) c'est ce qu'on appelle distribution sans mémoire.

- **La loi de Weibull :** l'expression loi de Weibull recouvre en fait toute une famille de lois, certaines d'entre elles apparaissant en physique comme conséquence de certaines hypothèses. C'est en particulier, le cas de la loi exponentielle ($\beta = 1$) et de la loi normale ($\beta = 3$).

II.2.5.5 Taux de défaillance

Généralement, pour mesurer la fiabilité, on fait appel à la fonction du taux de défaillance. Cette fonction est notée **λ,** elle représente le taux de défaillance exprimé comme le pourcentage de défauts ou de pannes. Il est exprimé par la relation :

$$\lambda(t) = \frac{P\,[E\ défaillante\ sur\ [t, t+dt]\ \ sans\ \ défaillance\ sur [0,t]\,]}{P\,[S\ non\ défaillante\ sur\ [0,t]]}$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{1}{R(t)}\ \frac{d\,R(t)}{dt} \qquad \textbf{(II_10)}$$

Ce taux de défaillance est dit instantané lorsqu'il représente la fonction d'une période infiniment courte. C'est la limite du taux moyen de défaillance entre les instants t et t' lorsque (t' – t) tend vers zéro. **[23]**

Inversement, pour chercher la fonction de fiabilité à partir du taux de défaillance instantané, on utilise la fonction suivante :

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(x)\,dx} \qquad \textbf{(II_11)}$$

A partir de cette relation :

$$d(\ln(x)) = \frac{dx}{x} \Longrightarrow \int \frac{dx}{x} = \ln(x) \Longrightarrow x = exp \int \frac{dx}{x}$$

$$\lambda(t) = -\frac{\acute{R}(t)}{R(t)} = -\frac{d[\ln(R(t))]}{dt}$$

$$\int_0^t \lambda(x)\,dx = -[\ln(R(x))]_0^t = -\ln(R(t))$$

Donc : $$R(t) = exp_\int_0^t \lambda(x)dx$$

Si : $\lambda(t) = \lambda$ = constant

Alors **:** $R(t) = e^{-\lambda t}$

En bref, on peut écrire tout les Formules des indices de fiabilité dans le tableau suivant :

Fonction principales	**Formules pour la détermination des autres fonctions**			
	R(t)	**F(t)**	**f(t)**	**$\lambda(t)$**
R(t)	_	1 – R (t)	$-\frac{dR(t)}{dt}$	$-\frac{1}{R(t)}\frac{d\,R(t)}{dt}$
F(t)	1 - F(t)	_	$\frac{dF(t)}{dt}$	$\frac{1}{1-F(t)}\frac{d\,F(t)}{dt}$
f(t)	$\int_t^{\infty} f(x).dx$	$\int_0^t f(x).dx$	_	$\frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(x).dx}$
$\lambda(t)$	$e^{-\int_0^t \lambda(x)\,dx}$	$1 - e^{-\int_0^t \lambda(x)\,dx}$	$\lambda(t)\, e^{-\int_0^t \lambda(x)\,dx}$	_

Tableau II.1 : Formules des indices de fiabilité **[18]**

La fiabilité est l'appui à favoriser pour augmenter la disponibilité tout en tenant compte de l'objectif d'optimisation du coût. Cette grandeur peut être quantifiée par ces deux indicateurs : La durée moyenne sans panne (MTTF) pour les systèmes non réparables, comme les lampes et les composants électroniques et la moyenne des temps de bon fonctionnement entre défaillances consécutives (MTBF) pour les articles réparables, comme les équipements industriels ou domestiques. **[19]**

A. Temps moyen de bon fonctionnement *MTBF :*

Le MTBF (Mean Time Between Failure) est souvent traduit comme étant la moyenne des temps de bon fonctionnement mais représente la moyenne des temps entre deux défaillances. En d'autres termes, Il correspond à l'espérance de la durée de vie t.

$$\text{MTBF} = \int_0^{\infty} R(t) \qquad \textbf{(II_12)}$$

Physiquement le *MTBF* peut être exprimé par le rapport des temps :

$$MTBF = \frac{somme\ \ des\ temps\ de\ fonctionnement\ entre\ les\ (n) defaillances}{nombre\ \ d'intervention\ de\ maintenance\ avec\ immobilisation} \qquad \textbf{(II_13)}$$

Si λ est constant : $MTBF = \frac{1}{\lambda}$ **(II_14)**

Par définition le MTBF est la durée de vie moyenne du système.

B. La durée moyenne sans panne *MTTF* (durée moyenne d'exploitation sans défaut)

Le MTTF (Mean time to failure) est la durée moyenne de fonctionnement avant la première défaillance, espérance mathématique de la durée de fonctionnement avant défaillance.

II.2.6 La maintenabilité

La maintenabilité est la probabilité qu'un matériel, lorsqu'il nécessite une intervention de maintenance, soit remis dans un état de fonctionnement donné, dans des limites de temps spécifiées, lorsque le travail est effectué selon des procédures prescrites et des conditions données (AFNOR (1991), norme NF x 60- 010)**.**

La figure II.8 représente l'allure de la maintenabilité M(t) en fonction du temps.

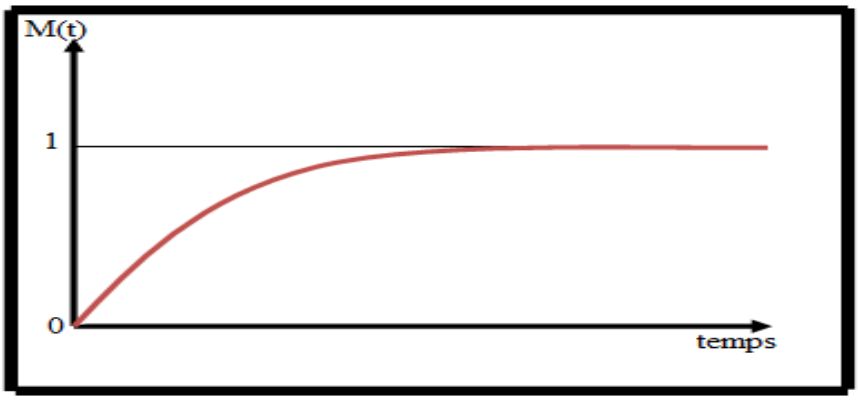


Figure II.8 : la maintenabilité en fonction de temps.

On constate qu'à l'origine des temps M (0) = 0, ce qui est évident car l'entité est défaillante. Elle possède une asymptote égale à 1 car l'on peut supposer qu'elle sera réparée au bout d'un temps donné sinon cette entité ne serait d'aucune utilité. La maintenabilité d'une entité dépend étroitement des moyens et compétences mis en œuvre. Comme pour la fiabilité, la notion de maintenabilité dépend de l'état initial de l'entité étudiée. **[20]**

II.3 Concepts de Disponibilité

II.3.1 Définition de la disponibilité

La disponibilité est : l'aptitude d'un bien, sous les aspects combinés de sa fiabilité, maintenabilité et de l'organisation de la maintenance, à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions de temps déterminées.

Disponibilité	
Aptitude à être en état de marche à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné. **A(t) = Prob [non défaillante à l'instant *t*]**	
Fiabilité	**Maintenabilité**
Aptitude à ne pas présenter des défaillances dans une durée déterminée.	Aptitude à être remis en service dans une durée donnée.
R(t) = Prob [non d´défaillante sur [0, t]]	**M (t) = Prob [R éparée sur [0, t]]**

Tableau II. 2 : Disciplines de la disponibilité, fiabilité et maintenabilité.

Pour qu'un équipement présente une bonne disponibilité, il doit :

- Avoir le moins possible d'arrêts de production.
- Être rapidement remis en état s'il est défaillant.

La disponibilité allie donc les notions de fiabilité et de maintenabilité et l'augmentation de la disponibilité passe par :

- L'allongement de la MTBF (action sur la fiabilité).
- La notion de le MTTR (action sur la maintenance).

On peut dire que La disponibilité représente la probabilité qu'un système se trouve en service à un moment déterminé *t.* Dans la pratique, on entend par disponibilité, la disponibilité à long terme (disponibilité asymptotique). Dans ce contexte, les définitions suivantes sont habituelles **[27-28] :**

$$A(t) = \frac{\text{MTTF}}{\text{MTTF+MTTR}} = \frac{\mu}{\mu+\lambda} \qquad \textbf{(II_15)}$$

$$\overline{A}(t) = \frac{\text{MTTR}}{\text{MTTR+MTTF}} = \frac{\lambda}{\lambda+\mu} \qquad \textbf{(II_16)}$$

Avec : $A(t)$: Disponibilité ;

- Disponibilité : $\mathbf{A(t) = P_0(t)}$ = Probabilité que le système fonctionne = probabilité qu'il y ait 0 défaillance.

$\overline{A}(t)$: Indisponibilité ;

- Indisponibilité : $\bar{A}(t) = \mathbf{1 - A(t) = P_1\,(t)}$ = Probabilité de non fonctionnement = Probabilité qu'il y ait une défaillance.

Avec :

MTTF : Durée moyenne d'exploitation sans défaut ;

MTTR : Durée moyenne de défaillance et de réparation ;

λ : Taux de défaillance ;

μ : Taux de réparation.

NB :

-La qualité initiale du système garantit que : $P_0(0) = 1$ et $P_1(0) = 1$.

-Par complémentarité : $P_1(t) = 1 - P_0(t)$.

La figure II.9 est illustrer disponibilité en fonction du temps t :

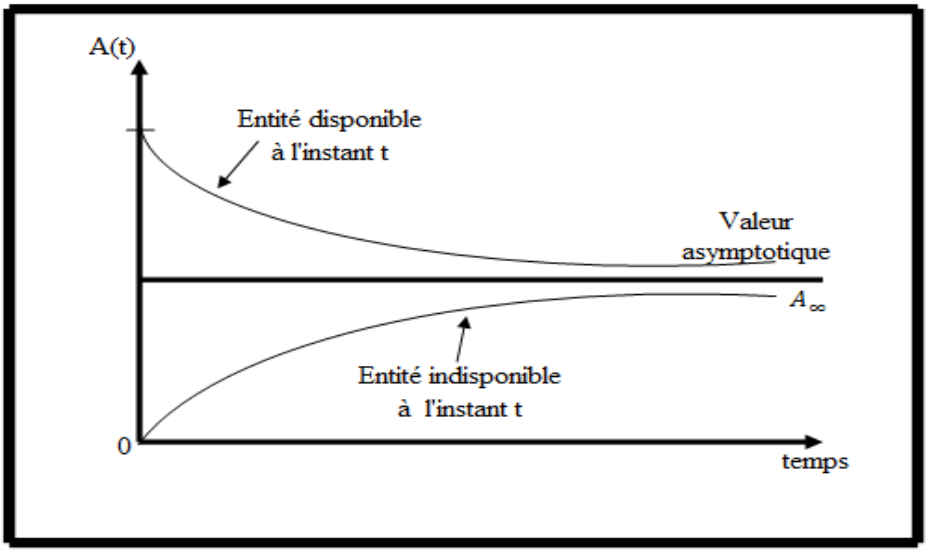


Figure II.9 : Disponibilité en fonction du temps t. **[20]**

II.3.2 Les grandeurs moyennes :

Les grandeurs moyennes associées à la disponibilité les plus courantes sont : **[20]**

– le temps moyen de disponibilité (TMD) ou durée de bon fonctionnement après réparation, ou mean up time (MUT) : durée moyenne de fonctionnement après la réparation et la défaillance suivante.

– le temps moyen d'indisponibilité (TMI) ou durée moyenne d'indisponibilité, ou mean down time (MDT) : durée moyenne entre une défaillance et la remise en état suivante.

– la durée moyenne entre défaillance notée MTBF (mean time between failure) : durée moyenne entre deux défaillances consécutives de l'entité. En général, on a la relation :

MTBF = MUT +MDT

La figure II.10 fournit les représentations graphiques de ces définitions en fonction du temps.

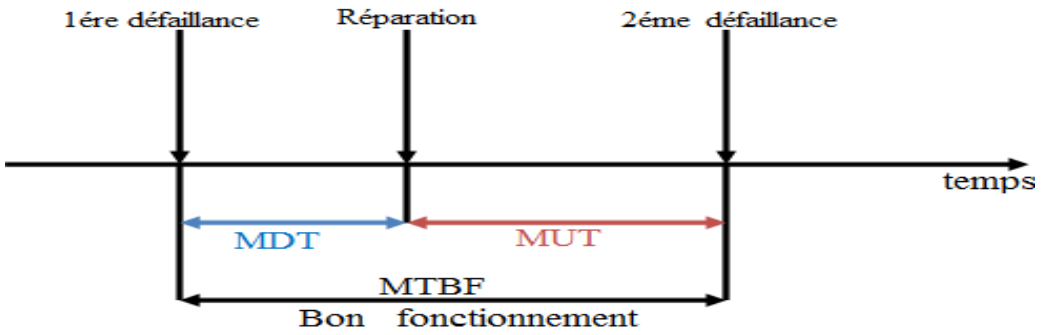


Figure II.10 : Représentation des MTBF, MDT et MUT.

Le MDT se décompose en plusieurs phases lesquelles sont montrées par la figure II.11 :

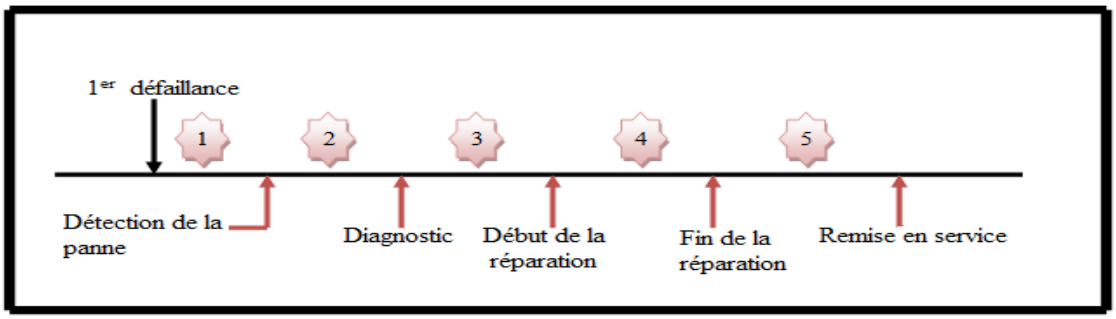


Figure II.11 : phases de MDT

- durée de détection de la panne (1)
- Durée de diagnostic de la panne (2);
- Durée d'intervention jusqu'au début de la réparation (3) ;
- Durée de la réparation (4);
- Durée de remise en service du système (5).

II.3.3 Quantification de la disponibilité [22]

La disponibilité peut se mesurer :

- ❖ Sur un intervalle de temps donné (disponibilité moyenne) ;
- ❖ Disponibilité intrinsèque ;
- ❖ Disponibilité opérationnelle ;
- ❖ À un instant donné (disponibilité instantanée) ;
- ❖ à la limite, si elle existe, de la disponibilité instantanée lorsque $t \to \infty$ (disponibilité asymptotique).

A. Disponibilité moyenne D_m : La disponibilité moyenne sur intervalle de temps donné peut être évaluée par le rapport suivant : **[29]**

$$D_m = \frac{temps\ de\ disponibilité}{temps\ de\ disponibilité + temps\ d'indisponibilité}$$

Ou : $$D_m = \frac{TCBF}{TCBF+TCI} \quad \textbf{(II_17)}$$

Où :

- **TCBF** = temps cumulé de bon fonctionnement.
- **TCI** = Temps cumulé d'immobilisation.

Remarque :

- Le temps cumulé d'immobilisation comprend les temps d'intervention et les temps logistique.
- En l'exprimant par rapport à des temps moyens, la disponibilité moyenne s'écrit :

$$D_m = \frac{temps\ \ moyen\ de\ disponibilité}{temps\ \ moyen\ de\ disponibilité + temps\ moyen\ d'indisponibilité}$$

$$D_m = \frac{TMD}{TMD+TMI} \quad \textbf{(II.18)}$$

En anglais: ***TMD*** = MUT (**M**ean **up** **T**ime) et ***TMI*** = MDT (**M**ean **D**own **T**ime)

Nous pouvons donc écrire la relation II .18 comme suit :

$$D_m = \frac{\text{MUT}}{\text{MUT+MDT}} \quad \textbf{(II.19)}$$

B. Disponibilité intrinsèque D_i : Elle exprime le point de vue du concepteur. Ce dernier a conçu et fabriqué le produit en lui donnant un certain nombre de caractéristiques intrinsèques, c'est à dire des caractéristiques qui prennent en compte les conditions d'installation, d'utilisation, de maintenance et d'environnement, supposées idéales. **[29]**

$$D_i = \frac{TBF}{TBF+TTR+TTE} \quad \textbf{(II.20)}$$

Avec :

- **TBF** : temps de bon fonctionnement ;
- **TTR** : temps techniques de réparation ;
- **TTE** : temps techniques d'exploitation.

C. Disponibilité opérationnelle D_O : Il s'agit de prendre en compte les conditions réelles d'exploitation et de maintenance. C'est la disponibilité du point de vue de l'utilisateur.

Le calcul de D_O fait appel aux mêmes paramètres TBF, TTR et TTE sauf que ces 3 paramètres ne sont plus basés sur les conditions idéales de fonctionnement mais sur les conditions réelles (historiques d'exploitation). **[29]**

Pour cette mesure, sont pris en compte les temps logistiques, ce qui donne :

$$D_O = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR+MTL} \qquad \textbf{(II.21)}$$

Avec :

- **MTL** : moyenne des temps logistiques.

D. Disponibilité instantanée D(t) ou A(t) : On définit la disponibilité instantanée d'un système réparable par : **[20]**

$$\mathrm{D(t)} = \frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda}{\lambda+\mu} \quad e^{-(\lambda+\mu)t} \qquad ; \mathrm{T} \geq 0 \qquad \textbf{(II.22)}$$

Avec :

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

E. Disponibilité asymptotique D_∞ : Quand $t \to \infty$ tend vers une limite asymptotique D_∞ qui se traduit par les formules suivantes :

$$D_\infty = \frac{\mu}{\lambda+\mu} = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} = \frac{1}{1+\frac{\lambda}{\mu}} = \frac{1}{1+\frac{MTTR}{MTBF}} \qquad \textbf{(II.23)}$$

Le rapport $\frac{MTTR}{MTBF}$ est appelé le « rapport de maintenance ».

II.3.4 Relation entre la disponibilité et la fiabilité

L'équation (II.23) montre que la disponibilité fait intervenir la fiabilité via les temps moyens de bon fonctionnement MUT (Mean Up time) et la maintenabilité via les durées moyennes de réparation MTTR (Mean Time To Repair).

$$\textbf{UTR} = \frac{MUT}{MUT+MTTR} = \frac{MUT}{MTBF} = \frac{MUT}{MUT+MDT} \qquad \textbf{(II.24)}$$

Avec :

- **UTR :** temps de bon fonctionnement sur un horizon infini (**U**p **T**ime **R**atio).

NB

- De façon stationnaire, la proportion du temps de bon fonctionnement sur un horizon infini (UTR pour Up Time Ratio) est A(t).

II.3.5 Amélioration de la disponibilité

En améliorant la disponibilité, on améliore l'efficacité, donc la productivité et les résultats. Cela dit, il existe plusieurs manières d'agir sur la disponibilité.

1) La première, c'est d'agir sur la disponibilité « constructeur », en prenant des matériels plus fiables, plus maintenables, et forcément plus onéreux.

2) La seconde consiste à agir sur la disponibilité « opérationnelle ». Celle-ci est directement liée à la politique de maintenance de l'utilisateur, de l'organisation et des moyens mis en œuvre.

3) L'équation (II.24) montre que la disponibilité peut être améliorée par une augmentation des temps moyens de bon fonctionnement MUT (par la fiabilité) et par une diminution des temps moyens de réparations MTTR (par la maintenabilité).

4) Dans ces stratégies, la moyenne des temps de réparation diminue car les actions préventives, généralement mieux préparées et plus rapides, viennent réduire le recours aux actions correctives. L'équation (II.24) donne l'exemple d'une stratégie de maintenance de type age, avec $R(t)$ = 1- $F(t)$ la fonction de fiabilité, T_P la durée d'une action préventive et T_C la durée d'une action corrective.

$$MTTR = T_P\ R(t) + T_C\ F(T) \quad \textbf{(II.25)}$$

Cependant, pour être certain que les actions de maintenance soient plus faciles et rapides, il faut améliorer leur maintenabilité.

II.3.6 Disponibilité des dispositifs connectés en série et en parallèle [30]

II.3.6.1 Disponibilité des dispositifs connectés en série

La disponibilité globale A_S d'un dispositif composé de n composants (A, B, C ….. N) composants montés en série est égale au produit des disponibilités respectives A_A , A_B,..., A_N de chacun des composants.

$$A_S = A_A * A_B * ……..*A_N \quad \textbf{(II.26)}$$

II.3.6.2 Disponibilité des dispositifs connectés en parallèle

La disponibilité globale A_P de n composants (A, B, ….. N) monté en parallèle et dont les disponibilités respectives sont $A_A, A_B,\ldots, A_N$ est égale a :

$$A_P = 1 - (1 - A_A)\ (1 - A_B\ )\ldots\ldots\ (1 - A_V\ ) \quad \textbf{(II.27)}$$

II.3.7 Taux de disponibilité

Le taux de disponibilité est l'indicateur le plus précis pour qualifier la qualité de maintenance d'un équipement : il s'agit du % du temps pendant lequel cet équipement fonctionne, par opposition au temps où il est en panne**. [31]**

À la cour de temps t, le taux de disponibilité (A) d'un matériel est défini par le rapport **[32]** :

$$A = A(t) = \frac{Temps\ d'utilisation\ et\ d'attente}{Temps\ d'utilisation\ et\ d'attente + Temps\ de\ maintenance}$$

II.3.8 La relation entre les notions FMD :

La figure suivante montre la relation entre les paramètres fiabilité, maintenabilité et la disponibilité :

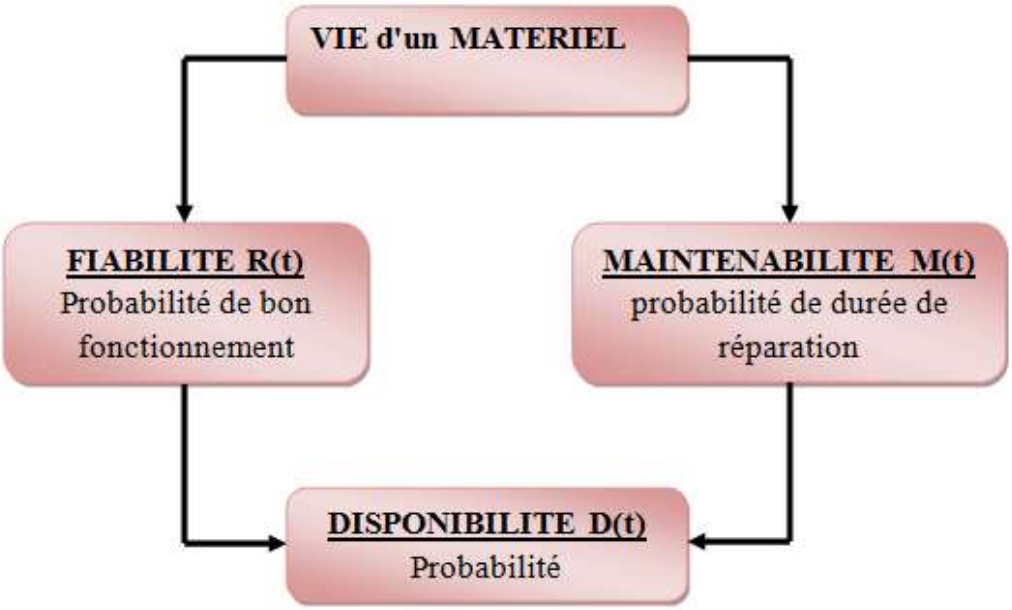


Figure II.12: La relation entre les notions FMD.

Pour qu'un matériel soit disponible il faut s'assurer que sa fiabilité est optimum et qu'il est aussi maintenable**. [12]**

La figure II.13 représente la relation entre les différentes grandeurs caractérisant la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité d'un équipement.

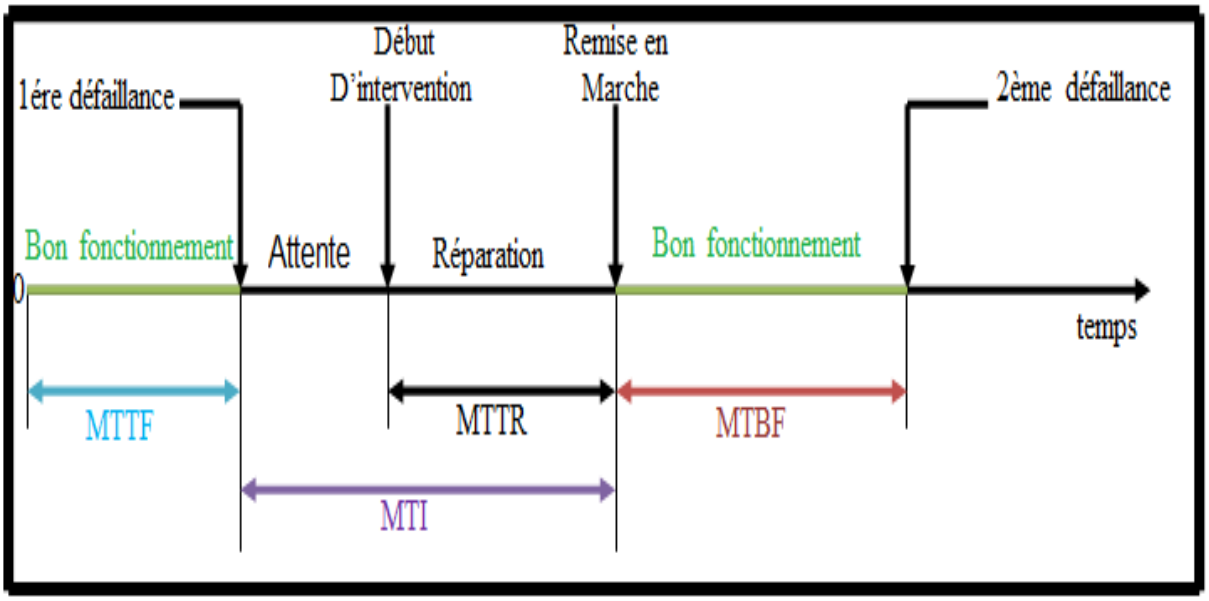


Figure II.13: Relation entre les différentes grandeurs caractérisant la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité d'un équipement.

II.4 Fiabilité des ensembles réparés

Un matériel réparé est destiné à être réutilisé après remise en état. On peut penser que c'est le cas le plus général (les exceptions sont connues : fusées, satellites, etc.). Deux caractéristiques sont utiles ici :

- L'indisponibilité (de préférence à la disponibilité, lorsque celle-ci est proche de 1) est la caractéristique la plus utilisée pour les systèmes réparés. C'est la probabilité pour qu'à l'instant considéré l'ensemble soit défaillant malgré la redondance éventuelle et les remises en état et sa valeur se stabilisent rapidement. C'est aussi la fraction du temps pendant laquelle le matériel n'est pas utilisable (entre sa défaillance et sa remise en état).
- La fiabilité ou de préférence le taux de défaillance élémentaire est une caractéristique moins utilisée mais cependant indispensable. En effet, le taux de défaillance rend compte de la fréquence des défaillances, ce que ne fait pas la disponibilité (et cette fréquence devient vite constante selon le paragraphe).

La fiabilité seule ne suffit pas à définir l'efficacité d'un système, il faut en mesurer la disponibilité lorsque que le système est multi composants et réparable.

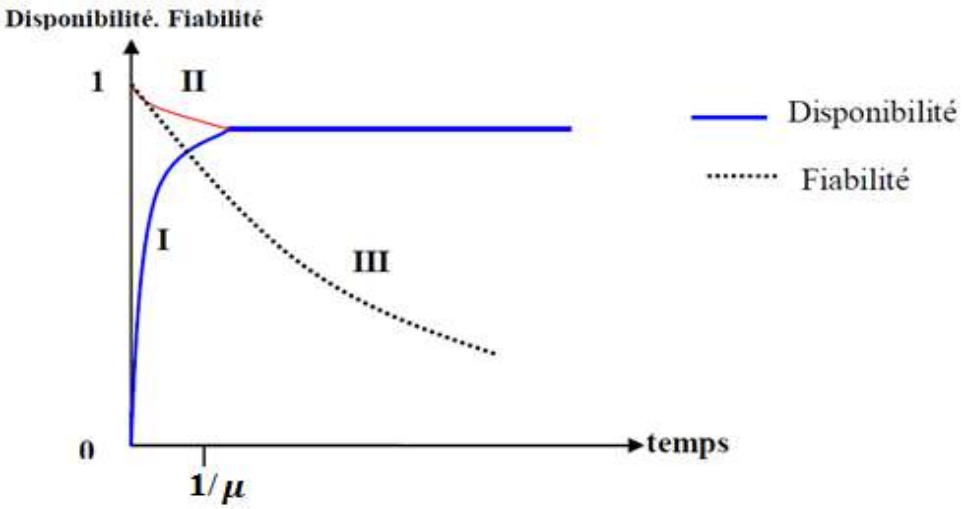


Figure II.14 : Systèmes réparés

- La disponibilité de l'ensemble tend rapidement vers un régime stationnaire : à l'instant initial, panne **(courbe I),** ou bon fonctionnement **(courbe II).**
- La fiabilité est rapidement assimilable à une exponentielle **(courbe III)**

La figure II.15 représente les changements d'états d'un système réparable : (1) en fonction et (0) en panne. L'équation(II.24) montrent que le *MUT* pour (*Mean Up time)* ou

Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement, équivalent est *MTBF*.

$$MUT = E(X_i) \qquad et \qquad MTTR = E(Y_i) \qquad \textbf{(II.28)}$$

$$MTBF = MUT + MTTR \qquad \textbf{(II.29)}$$

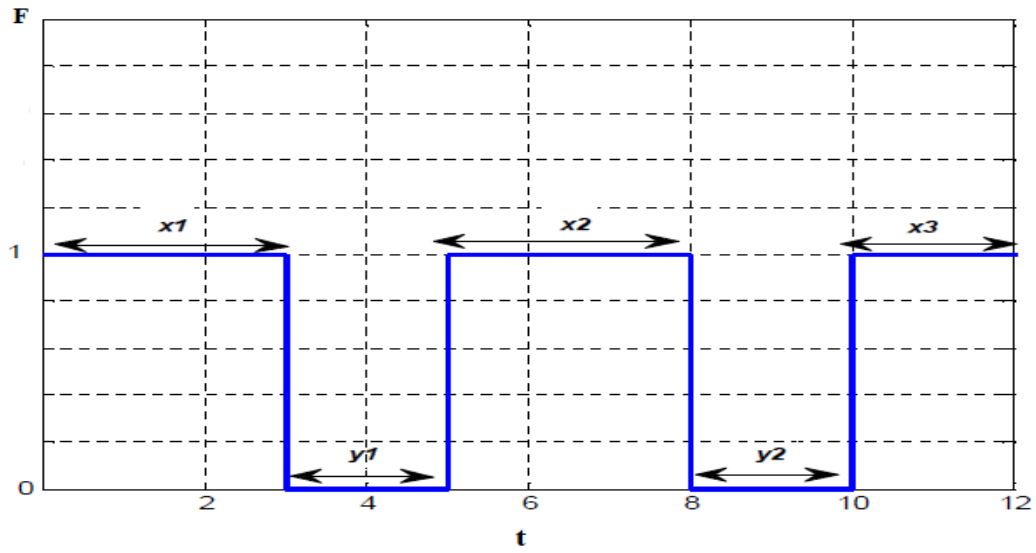


Figure III.15 : Chronogramme d'un système réparable

✓ **Grandeurs fondamentales**

pour les systèmes réparables Pour un système réparable, la durée de réparation est une variable aléatoire dont la fonction de densité est h(t) , la probabilité que le système hors d'usage soit remis en état d'opération entre t et t + dt est h(t).dt , la fonction de densité permet de calculer les autres grandeurs représentant la maintenabilité : la probabilité qu'une réparation soit effectuée dans un intervalle H(τ) , la durée moyenne des réparations MTTR , le taux de réparation m (τ) .

L'équation (II.25) donne le temps moyen d'une réparation ou *MTTR* dans le cas d'une distribution exponentielle des durées de réparation $h(t)$ dont le taux de réparation $\boldsymbol{\mu}$ est constant. Notons cependant que la distribution log-normale s'avère, en général, plus réaliste pour ajuster les durées de réparation des systèmes réparable. $MTTR = \frac{1}{\mu}$ **(II.30)**

Conclusion

En règle générale, la fiabilité est considérée comme un critère pertinent quant à l'évaluation de l'efficacité des systèmes. Dans ce chapitre, nous avons parlé sur la fiabilité des systèmes de point de vue générale avec des déférentes mesures et des types à elle. En suite on définie c'est quoi la maintenabilité et finalement on termine avec la disponibilité ainsi que nous avons mentionné la relation entre les trois paramètres: la fiabilité ; la maintenabilité et la disponibilité et aussi fiabilité des ensembles réparés.

Chapitre III

Concept de la logique floue

III.1 Introduction

Les connaissances sur lesquelles se base le raisonnement humain sont presque toujours entachées d'une quantité d'incertitudes et d'imprécisions, cette caractéristique est en réalité inhérente à l'homme et au monde puisqu'aucun de nos sens, ni de nos instruments de mesures, ne nous permet de décrire avec justesse et certitude ce que nous percevons du monde extérieure.

Il est connu dans la logique classique que la variable prend l'une des deux valeurs (1.0), c'est-à-dire (vrai, faux); Si vous prenez, par exemple, l'ensemble complète X et A est un sous-ensemble du ensemble X, alors l'un des éléments du l'ensemble complète soit appartient au sous-ensemble A ou n'appartient pas à ce ensemble.

La logique floue fournit une solution pour de tels cas, Où un degré de la variable est attribué (l'élément du ensemble complète), c'est-à-dire le degré d'affiliation du zone réel (1.0) au lieu du ensemble réel (1.0) aide à déterminer l'affiliation de l'élément au sous-ensemble.

La logique floue a été introduite par LOTFI.A.ZADEH, professeur à l'université de Berkley en Californie à 1965 suite à la publication d'un article d'une quinzaine de pages intitulé « fuzzy sets » (ensembles flous) constitue un outil très puisant pour la représentation des termes et des connaissances vagues. Dix ans plus tard, il publie un important travail « The concept of a linguistic variable and it's application to approximate reasoning » qui va marquer le point de départ de nombreuses études et expérimentations de la capacité de l'homme à décider et à agir d'une manière intelligente malgré l'imprécis et l'incertitude des connaissances disponibles.

Logique floue a fait de grandes avancées dans diverses applications et magazines. Il est frappant de constater que cette science et dès le début a suscité un grand intérêt de la part des Chinois et des Japonais, et a été ignorée par les États-Unis d'Amérique et les pays européens, mais à la fin des années quatre-vingt du XXe siècle, de grands développements se sont produits et de nombreuses idées ont émergé dans cette spécialité, permettez à tout le monde d'être intéressant , ces derniers temps, les produits, les innovations et les idées industrielles qui reposent sur une logique flottante suivent principalement.

Dans ce chapitre, nous avons fait une présentation complète et générale à logique floue, et au début nous avons commencé par définir la logique floue et son principe. s'en suit le concept des ensemble floue et les caractéristiques de composons dans lui et la fonction d'appartenance, après cela, nous avons fourni du contenu le raisonnement en logique floue qui contient trois notion et étapes fondamentales, en suite nous avons parlé le modélisation par la

logique floue et La structure d'une Commande Floue, Enfin, nous avons présenté les applications, avantages et inconvénients les plus importants en logique floue .

III.2 Définition de la logique floue :

La logique ambiguë (floue) fournit le cadre général pour résoudre le problème de la représentation d'informations approximatives ou totalement non spécifiques et fournit le mécanisme d'utilisation de ces informations.

En 1965, le scientifique iranien Lotfi Zadeh a été le premier à introduire l'idée d'une logique obscure.

Une logique mystérieuse axée sur l'inférence à travers des expressions et des expressions non spécifiques telles que: long, short, Young. De telles expressions sont appelées variables linguistiques ou floues. **[33]**

III.3 Principes de la logique floue

L'idée de base de la logique floue est de modéliser des phénomènes ou des procédés comme le ferait l'être humain, c'est-à-dire de mettre en algorithmes, composés essentiellement par des règles du type {Si ... alors ...}, le raisonnement humain. En effet, l'homme a tendance à tirer des conclusions sur certaines situations à partir de données imprécises ou incomplètes et à agir en fonction d'un ensemble de règles implicites au raisonnement contrairement à l'ordinateur lui, est basé sur des données exactes.

Si l'idée de mettre en algorithme le raisonnement humain est considérée dans le cas de phénomènes ou procédés plus complexes qui font intervenir plusieurs machines et opérateurs, toute la connaissance empirique des experts peut être exploitée en vue d'une meilleure maîtrise de ces procédés complexes. Pour cela il faut suivre la méthodologie de la logique floue qui divise un système en trois éléments principaux, à savoir, un module de fuzzification, un module de déduction de règles, nommé aussi base de connaissances et en module de défuzzification**.[34]**

III.4 Concept des ensembles flous :

La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques comme il est représenté sur figure III **.**1 .Par abus de langage, suivant les us de la littérature, nous utiliserons indifféremment les termes sous-ensembles flous et ensembles flous. Les ensembles classiques sont également appelées ensemble nets, par opposition à flous, et de même la logique classique est également appelée logique booléenne ou binaire. **[35]**

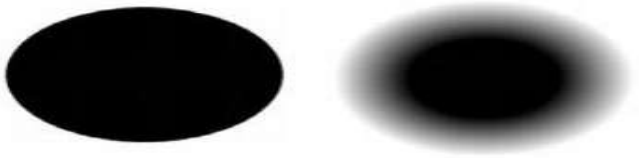


Figure III .1 : Représentation graphique d'un ensemble classique et d'un ensemble flou.

III.5 Notion caractéristique d'un ensemble flou :

Un tableau montrant le concept distinctif d'un ensemble flou. **[36]**

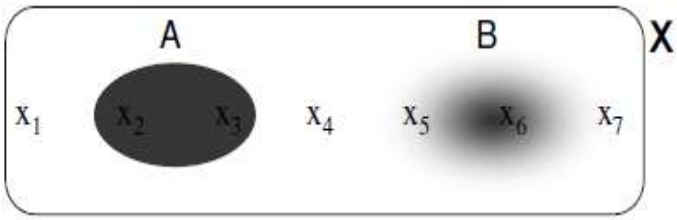
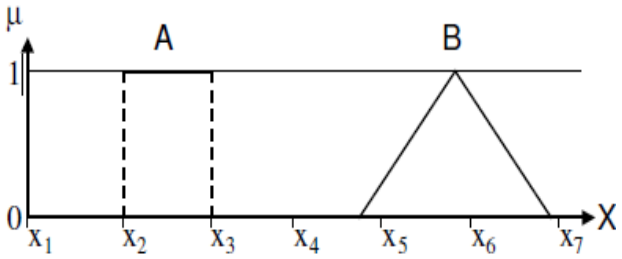
Déférente notion	**Théorie des ensembles**	**Théorie des ensembles floue**
Notion d'ensemble		
Fonction d'appartenance	$\mu_{ensemble}(élement)$ = degré d'appartenance $\mu_A(X_1)=0$ $\mu_B(X_5)=0,3$ $\mu_A(X_2)=1$ $\mu_B(X_6)=0,9$ ... ... $\mu : x \rightarrow \{0,1\}$ $\mu : x \rightarrow [0,1]$ 	

Tableau III.1 : Concept d'un ensemble flou.

III.5.1 Variable linguistique :

La description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en général des expressions floues comme :

- Quelque, beaucoup, souvent,

- Chaud, froid, rapide, lent
- Grand, Moyen, petit etc.

Les expressions de ce genre forment les valeurs des variables linguistiques de la logique floue. D'où une variable linguistique représente un état dans le système à régler ou une variable de réglage dans un contrôleur flou. Sa valeur est définie dans des termes linguistiques d'un langage naturel ou artificiel. **[37]**

La variable linguistique peut être représentée par un triplet (x, T(x), U) dans lequel :

X : est le nom de variable linguistique.

U : l'univers de discours.

T(x) : ensemble des termes de variable linguistique de X.

La figure III .2 illustre un exemple de variable linguistique *'vitesse'* avec trois termes linguistiques : petite, moyenne et grande.

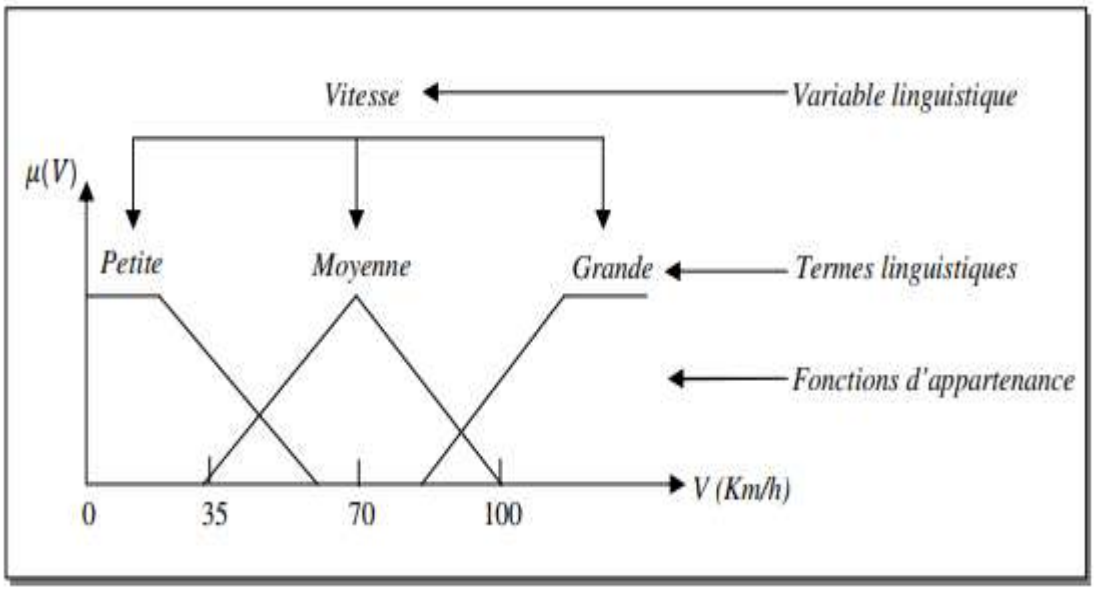


Figure III .2 : variable linguistique

III.5.2 Fonction d'appartenance :

Chaque sous ensemble flou peut être représenté par sa fonction d'appartenance. Si l'ensemble de référence est un ensemble fini, les valeurs d'appartenance sont des valeurs discrètes définies dans [0,1]. Si l'ensemble de référence est fini, on peut représenter ces valeurs comme des fonctions d'appartenance continues.

En général, la forme de fonctions d'appartenance dépend de l'application. **[37]**

Les fonctions d'appartenance le plus utilisés :

- Fonction triangulaire : l'allure est complètement définie par trois paramètres {a, b, c}.

$$\mu(x) = \max\left(min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad \textbf{(III.1)}$$

- Fonction trapézoïdale : elle est définie par deux paramètres {a, b, c, d}.

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad \textbf{(III.2)}$$

- Fonction gaussienne : elle est définie par deux paramètres {m,σ}.

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-m)^2)}{2\sigma}\right) \quad \textbf{(III.3)}$$

- Fonction en forme de cloche : deux paramètres {x,α}.

$$\mu(x) = \frac{1}{1+\left(\frac{x-n}{a}\right)^2} \quad \textbf{(III.4)}$$

- Fonction sigmoïdale : elle est définie par deux paramètres { α, c}.

$$\mu(x) = \frac{1}{1+\exp\left(a(x-c)\right)} \quad \textbf{(III.5)}$$

- Fonction trigonométrique : elle définie par deux paramètres.

$$\mu(x) = \frac{1}{2}\left(1+\cos\left(\frac{\pi(x-x_0)}{2a}\right)\right); x_0 - 2a \le x \le x_0 + 2a \quad \textbf{(III.6)}$$

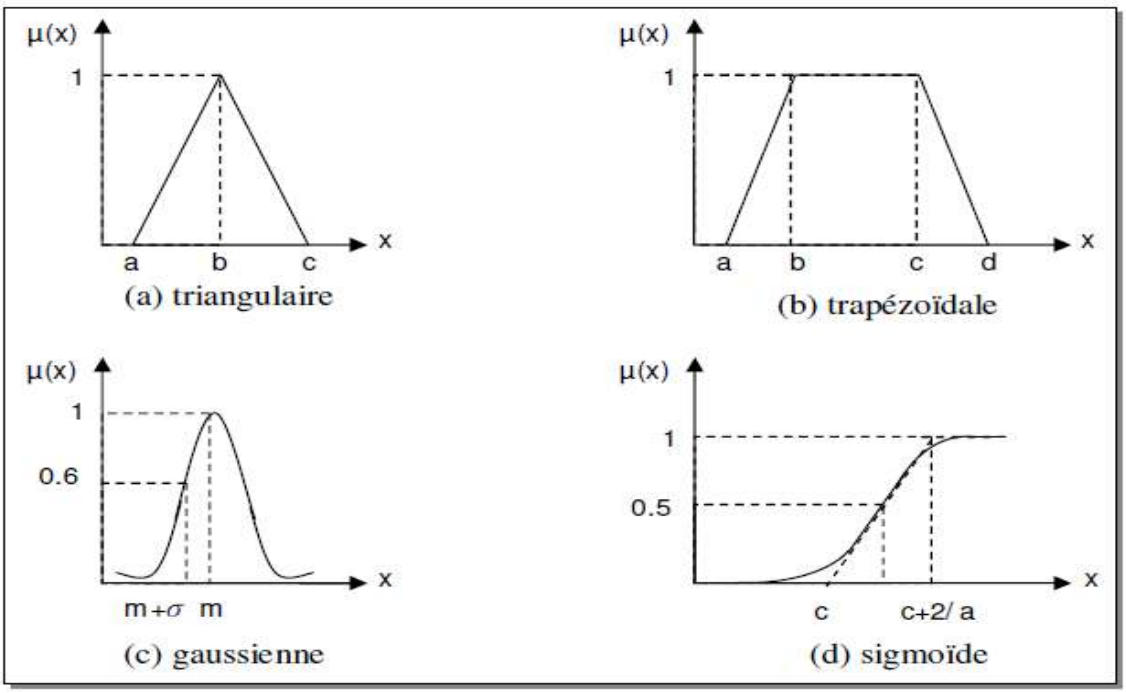


Figure III .3: Formes usuelles des fonctions d'appartenance

III.6 Opérations sur l'ensemble flou :

Il s'agit de la généralisation des opérateurs de : union (disjonction), intersection (conjonction) et négation de la théorie des ensemble classiques.

III.6.1 Union (disjonction)

L'union de deux ensembles flous A et B de U est l'ensemble flou constitué des éléments du U affectés de plus grand de leurs deux degrés d'appartenance, elle est définit comme l'ensemble flou :

$$C = A \cup B \quad (A \text{ ou } B)$$

Un tableau montrant le concept d'un opérateur union. **[36]**

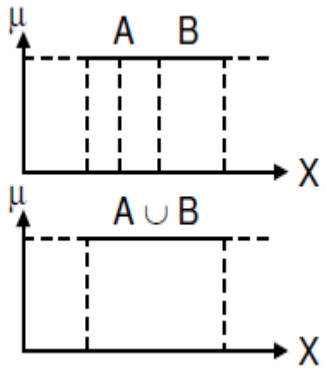
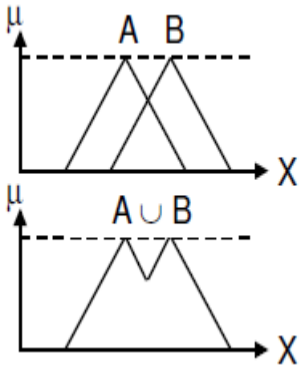
A∪B	**Théorie des ensembles**	**Théorie des ensembles floue**
Opérateur d'union entre Ensembles	 $\mu_{A\cup B} = \mu_A + \mu_B - \mu_A * \mu_B$	 $\mu_{A\cup B} = \max\{\mu_A, \mu_B\}$

Tableau III.2 : Concept d'un opérateur union

III.6.2 Intersection (conjonction)

L'intersection de deux ensemble flous A et B de U est ensemble flou constitué des éléments U affectés du plus petit de leurs deux degrés d'appartenance.

Elle est définie comme l'ensemble flou :

$$D = A \cap B \text{ (A et B)}$$

Un tableau montrant le concept d'un opérateur intersection. **[36]**

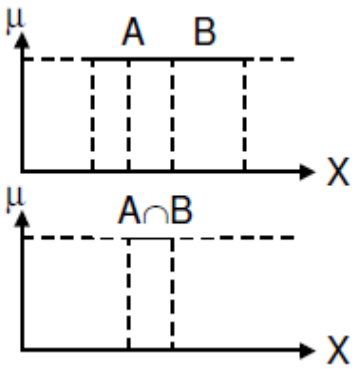
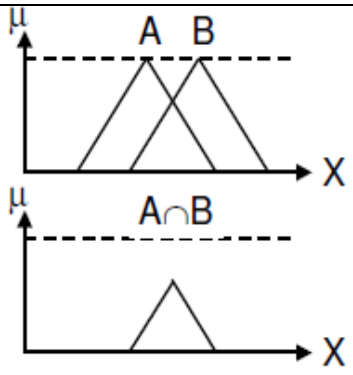
A∩B	**Théorie des ensembles**	**Théorie des ensembles floue**
Opérateur d'intersection entre ensembles	 $\mu_{A\cap B} = \mu_A * \mu_B$	 $\mu_{A\cap B} = \min\{\mu_A, \mu_B\}$

Tableau III.3 : Concept d'un opérateur intersection

III.6.3 Négation (complémentation)

La fonction d'appartenance μ_A du complément d'un ensemble flou A est définie.

Un tableau montrant le concept d'un opérateur négation. **[36]**

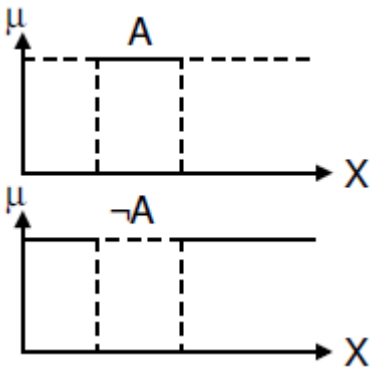
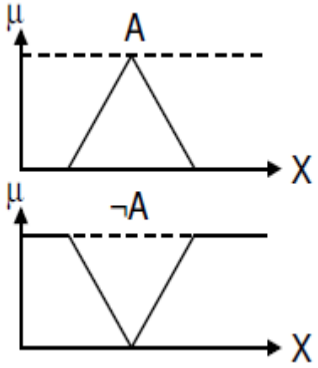
¬A	**Théorie des ensembles**	**Théorie des ensembles floue**
Modificateur de négation d'un ensemble	 $\mu_{\neg A}=1-\mu_A$	 $\mu_{\neg A}=1-\mu_A$

Tableau III.4 : Concept d'un opérateur négation

III.7 Propositions floues

III.7.1 Propositions floues élémentaires

Une proposition floue élémentaire est définie à partir d'une variable linguistique (X T(x) U) par la qualification «X est A», pour une caractérisation floue A, appartenant à U. **[38]**

III.7.2 Propositions floues générales

Une proposition floue générale est obtenue par la composition de propositions floues élémentaires « X est A », « V est B » … pour des variables linguistiques X, V … .

Plus généralement, on peut construire des propositions floues par conjonction, disjonction ou implication, par exemple de la forme « si X est A et V est B alors U est C » (si la taille est moyenne et le prix est peu cher, alors l'achat est conseillé). **[38]**

III.8 Raisonnement en floue :

En logique classique, les raisonnements sont de la forme :

$$\begin{cases} \text{si} & \text{p alors q} \\ \text{p vrai} & \text{alors} \quad \text{q vrai} \end{cases}$$

En logique floue, le raisonnement ou, également appelé raisonnement approximatif, se base sur des règles floues qui sont exprimées en langage naturel en utilisant les variables linguistiques dont nous avons donné la définition précédemment. Une règle floue aura cette forme :

Si : $x \in$ A et $y \in$ B alors $z \in$ C, avec A, B et C des ensembles flous.

-Partie antécédente (prémisse ou condition), exprimée par Si …

-Parie conséquence (conclusion), exprimé par Alors …

Par exemple :

« Si (la qualité de la nourriture est délicieuse), **alors** (le pourboire sera élevé) **»**

La variable 'pourboire' appartient à l'ensemble flou 'élevé' à un degré qui dépend du degré de validité de la prémisse, autrement dit du degré d'appartenance de la variable 'qualité de la nourriture' à l'ensemble flou 'délicieux'. L'idée sous-jacente est que plus les propositions en prémisse sont vérifiées, plus l'action préconisée pour les sorties doit être respectée. Pour connaitre le degré de vérité de la proposition floue 'le pourboire sera élevé', nous devons définir l'implication floue. **[39]**

- Le raisonnement floue basée sur trois opérateurs: ou (union), et (intersection), non (négation).

- Le raisonnement flou fait appel à trois notion et étapes fondamentales :
  - L'implication floue ;
  - L'inférence floue ;
  - L'agrégation des règles.

✓ **Implication floue :** l'implication floue donne une information sur le degré de vérité d'une règle floue. En d'autres termes, on quantifie la force de véracité entre la prémisse et la conclusion. Considérons par exemple les deux propositions floues.

″ X est A ″

″Y est B ″

Où : **x** et **y** sont des variables floues et A et B des ensembles flous de l'univers des discours U.

Ainsi que la règle floue : Si ″ x est A ″ Alors ″ y est B ″.

L'implication floue donne alors le degré de vérité de la règle floue précédente à partir des degrés d'appartenance de x à A (prémisse) et de y à B (conclusion).

On notera implication : opérateur imp (équivalent à l'opérateur Alors). Les normes d'implication les plus utilisées sont : **[38]**

- La norme Mamdani imp (μA(x), μB(y)) = min (μA(x), μB(y))
- La norme Larsen imp. (μA(x), μB(y)) = (μA(x).μB(y))

✓ **Inférence floue :** le problème tel qu'il se pose en pratique n'est généralement pas de mesurer le degré de véracité d'une implication mais bien de déduire, à l'aide de faits et de diverses règles implicatives, des évènements potentiels. En logique classique, un tel raisonnement porte le nom de Modus Ponens (raisonnement par l'affirmation).

Si : $p \Longrightarrow q$ vrai

Alors : q vrai et p vrai

De façon générale, les conditions d'utilisation du Modus Ponens Généralisé sont les suivantes : [**38]**

	Prémisse	**Conclusion**
Règle floue	Si x est A	Alors y est B
Fait observé	Si x est A'	
Conséquence	/	y est B

Tableau III.5 : Conditions du Modus Ponens

A et B sont les ensembles flous constatés dans le cas que l'on traite et ne sont pas nécessairement strictement égaux à A et B. B' est l'ensemble flou résultant de A' par l'application de l'implication.

Les informations disponibles pour déterminer la conséquence sont donc d'une part celles relatives aux règles, quantifiées par l'implication floue $\mu B/A$(x, y), d'autres part celles relatives au fait observé, quantifiées par la fonction d'appartenance μ_A.

▪ Par matrice d'inférence : elle rassemble toutes les règles d'inférences sous forme de tableau.

✓ **Agrégation des règles :** lorsque la base de connaissance comporte plusieurs règles, l'ensemble flou inféré B' est obtenu après une opération appelée agrégation des règles. En d'autres termes, l'agrégation des règles utilise la contribution de toutes les règles activées pour en déduire une action de commande floue. Généralement, les règles sont activées en parallèle et son liées par l'opérateur " Ou ".

Nous pouvons considérer que chaque règle donne un avis sur la valeur à attribuer au signal de commande, le poids de chaque avis dépend du degré de vérité de la conclusion. **[38]**

III.9 Modélisation par la logique floue

Le problème de la modélisation floue est résolu par le théorème de l'approximation universelle. Ce problème consiste à trouver les conditions pour lesquelles un modèle flou peut être trouvé pour approcher un système non linéaire préalablement donné avec une précision arbitraire imposée à priori.

Récemment, des résultats ont été obtenus parmi lesquels, nous pouvons citer : **[40]**

- ✓ Modélisation floue en utilisant les modèles de types Mamdani.
- ✓ Modélisation floue en utilisant les modèles de types Takagi-Sugeno.

A/-Modélisation floue type Mamdani :

En 1974, E.H Mamdani avait présenté, pour la première fois, la technique de commande par logique floue. Celle-ci consiste à déterminer un ensemble de règles qui maîtrise le comportement dynamique du système à commande. L'obtention de ces règles est facile auprès des experts qui connaissent bien le système. Il avait utilisé des règles à prémisses et conclusions symboliques, l'inférence (max, min), et la défuzzification par centre de gravité.

La forme de l'implication floue définie par ce type de contrôleur est de la forme :

$$\ll \boldsymbol{Si}\ x_1\ est\ A\ et\ x_2\ \ est\ B\ \textbf{Alors}\ \text{Y est C} \gg$$

La conséquence de ce type de système est une valeur floue. **[41]**

B/-Modélisation floue type Takagi-Sugeno :

La méthode de Sugeno permet de simplifier le calcul de l'agrégation, afin d'obtenir plus rapidement une solution nette. Cette méthode est souvent utilisée pour des applications à temps réel, où le temps de calcul est important.

La méthode de Sugeno utilise un seul pic comme fonction d'appartenance, plutôt qu'un polygone. Ce pic est un ensemble flou ayant une fonction d'appartenance 1 à un point particulier de l'espace, et 0 ailleurs. Le résultat de l'´evaluation des règles devient l'amplitude du pic.

Les conséquences sont évaluées selon le résultat de l'´evaluation des règles. **[42]**

III.10 La structure d'une commande floue :

Un régulateur flou est un système à base de connaissance particulière composé de quatre modules principaux à savoir : la fuzzification, la base de règle, le moteur d'inférence et la défuzzification comme il est montré par la figure (III.4) : **[43]**

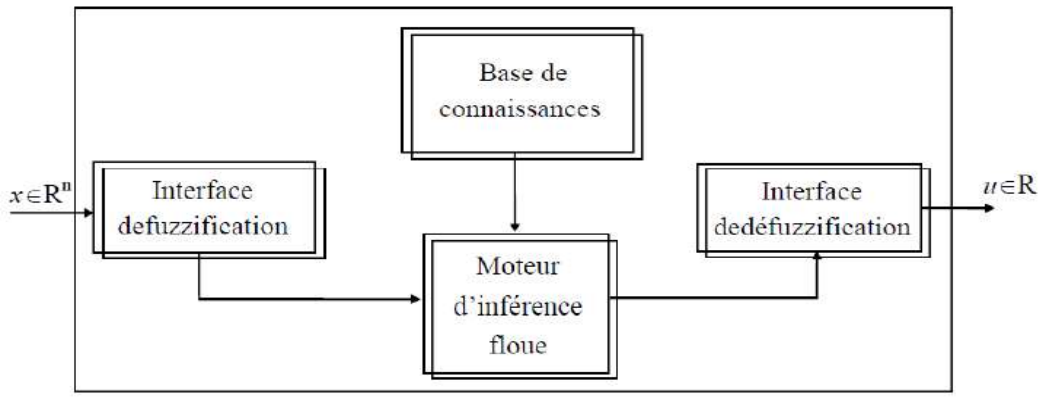


Figure III.4 : Structure de base d'un régulateur flou.

III.10.1 Interface de fuzzification

La fuzzification de la valeur précise d'une variable consiste à caractériser le degré avec lequel cette mesure appartient à un sous-ensemble flou donné, c'est-à-dire le passage d'une grandeur précise à une variable floue.

Le choix des formes des fonctions d'appartenance est arbitraire. Des études comparatives ont montré qu'avec les différentes formes des fonctions d'appartenance, les résultats sont pratiquement similaires en boucle fermée. La forme la plus fréquemment utilisée en commande floue est la forme triangulaire. Le nombre de fonctions d'appartenance est généralement impair et se répartissent autour de zéro. En général, on introduit pour une variable linguistique trois, cinq ou sept ensembles flous. Le choix du nombre dépend de la précision souhaitée. Les fonctions d'appartenance peuvent être symétriques, non symétriques et équidistantes ou non équidistantes. **[41]**

III.10.2 Base de connaissance (base de règle)

La base de règles floues, ou base de connaissances, contient des règles floues décrivant le comportement du système, elle est le cœur du système entier dans le sens où tous les autres composants sont utilisés pour interpréter et combiner ces règles afin de former le système final. Ces règles peuvent être fournies par un expert ou peuvent être extraites de données numériques. Dans les deux cas, les règles prennent la forme « SI prémisse ALORS conclusion », **[43]** à titre d'exemple :

$R^k{}_1$: Si $x_1\ est\ A^K{}_1\ et$ ……..……..$et\ x_n\ est\ A^K{}_n$ Alors y est B^K

Ou sous forme de sugeno :

$R^k{}_1$: Si $x_1\ est\ A^K{}_1\ et$ ……..$et\ x_n\ est\ A^K{}_n$ Alors $y_k = f_k(x)$

Avec : k=1,2……, M ; $A^K{}_1\ et\ B_k$ sont des ensemble flous dans $x_i \subset \Re\ et\ y \subset \Re$

Respectivement ; x= $[x_1, x_2, \ldots\ldots x_n] \in X_1 \times X_2 \times \ldots\ldots\ldots X_n$ et y∈ Y

Avec : X et y sont des variables linguistiques.

$f_k(x) = ak,0 + ak,1x1 + ak,2x2 + \ \ldots\ldots\ldots + ak,nxn$ (Poly-nôme)

Avec : $(ak,ak,1,ak,2,\ldots\ldots\ldots,ak,n)$ variable.

III.10.3 Moteur d'inférence (logique de prise de décision)

Le moteur d'inférence floue transforme, à l'aide des techniques de raisonnement flou, la partie floue issue de la fuzzification en une nouvelle partie floue afin de définir l'ensemble flou caractérisant la commande. En fait, le mécanisme d'inférence combine les règles floues pour effectuer une transformation à partir des ensembles flous dans l'espace d'entrée vers des ensembles flous dans l'espace de sortie. Il existe plusieurs méthodes d'inférence utilisées dans la littérature, parmi elles, on cite : **[43]**

- ✓ Méthode d'inférence MAX-MIN ;
- ✓ Méthode d'inférence MAX-PROD ;
- ✓ Méthode d'inférence SOMME-PROD.

A/-Méthode d'inférence MAX-MIN :

Cette méthode réalise l'opérateur "ET" par la fonction minimum "Min", la conclusion "ALORS" de chaque règle par la fonction minimum "Min" et la liaison entre toutes les règle (opérateur "OU") par la fonction maximum "MAX".

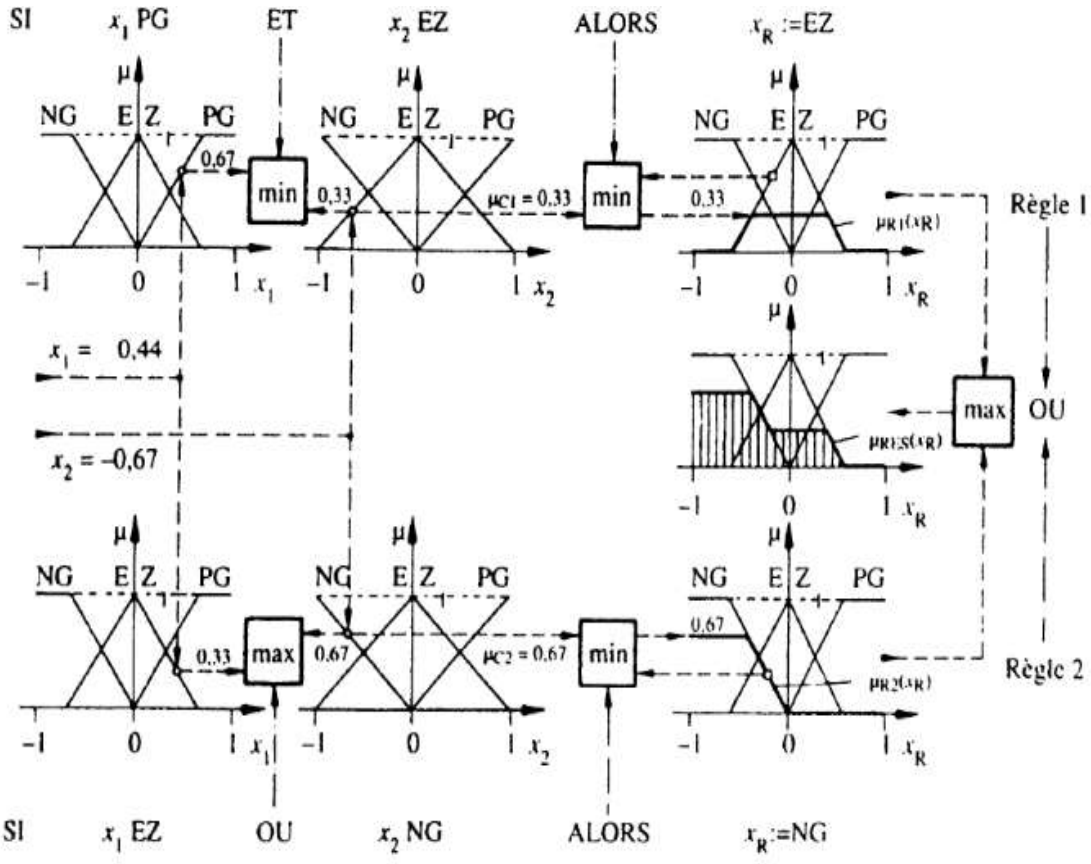


Figure III.5 : Méthode d'inférence MAX-MIN

La dénomination de cette méthode, dite Max- Min ou "implication de Mamdani", est due à la façon de réaliser les opérateurs ALORS et OU de l'inférence.

B/-Méthode d'inférence MAX-PROD

Cette réalise en générale, au niveau de la condition, l'opérateur "OU" par la formation du maximum "Max" et l'opérateur "ET" par la fonction du minimum "Min". Par contre, la conclusion dans chaque règle "ALORS", qui lie le facteur d'appartenance de la condition avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie par l'opérateur "ET" est réalisée cette fois-ci par la formation du "produit". Comme on le voit, le "OU", liant les règles est réalisé par la formation du maximum "Max" et la "ALORS" est réalisé par la formation du "produit", d'où la désignation de cette méthode d'inférence par « MAX-PROD ».

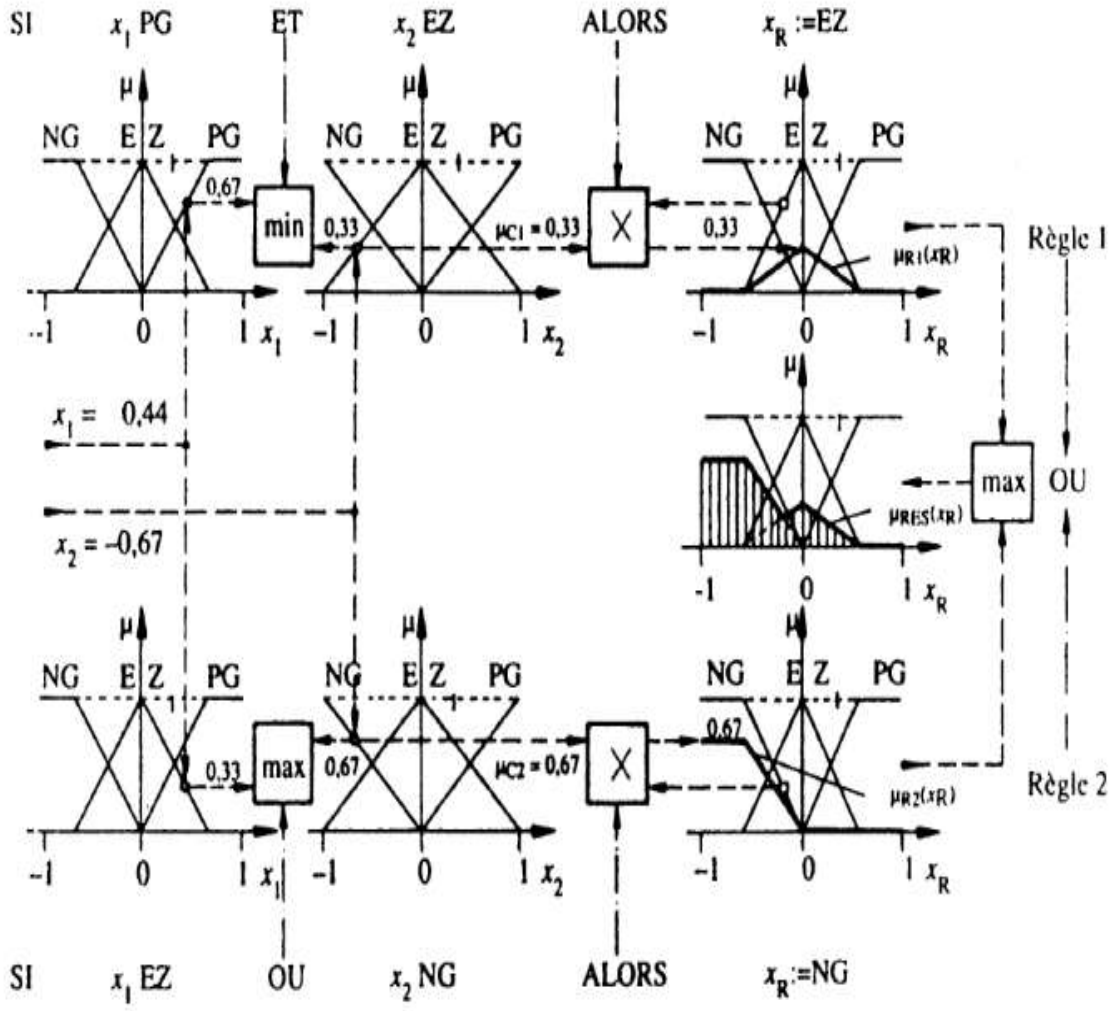


Figure III .6: méthode d'inférence MAX-PROD

C/-Méthode d'inférence SOMME-PROD :

La méthode d'inférence somme prod réalise, au niveau de la condition, l'opérateur "OU" par la formation de "la somme", plus précisément par la valeur "moyenne", tandis que l'opérateur" ET" est réalisé par la formation du "produit".

La conclusion de chaque règle, précédée par "ALORS", liant le facteur d'appartenance de la condition avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie par l'opérateur " ET", est réalisée par la formation du "produit". L'opérateur "OU" qui lie les différentes règles est réalisé par la formation de "la somme", donc de la valeur "moyenne".

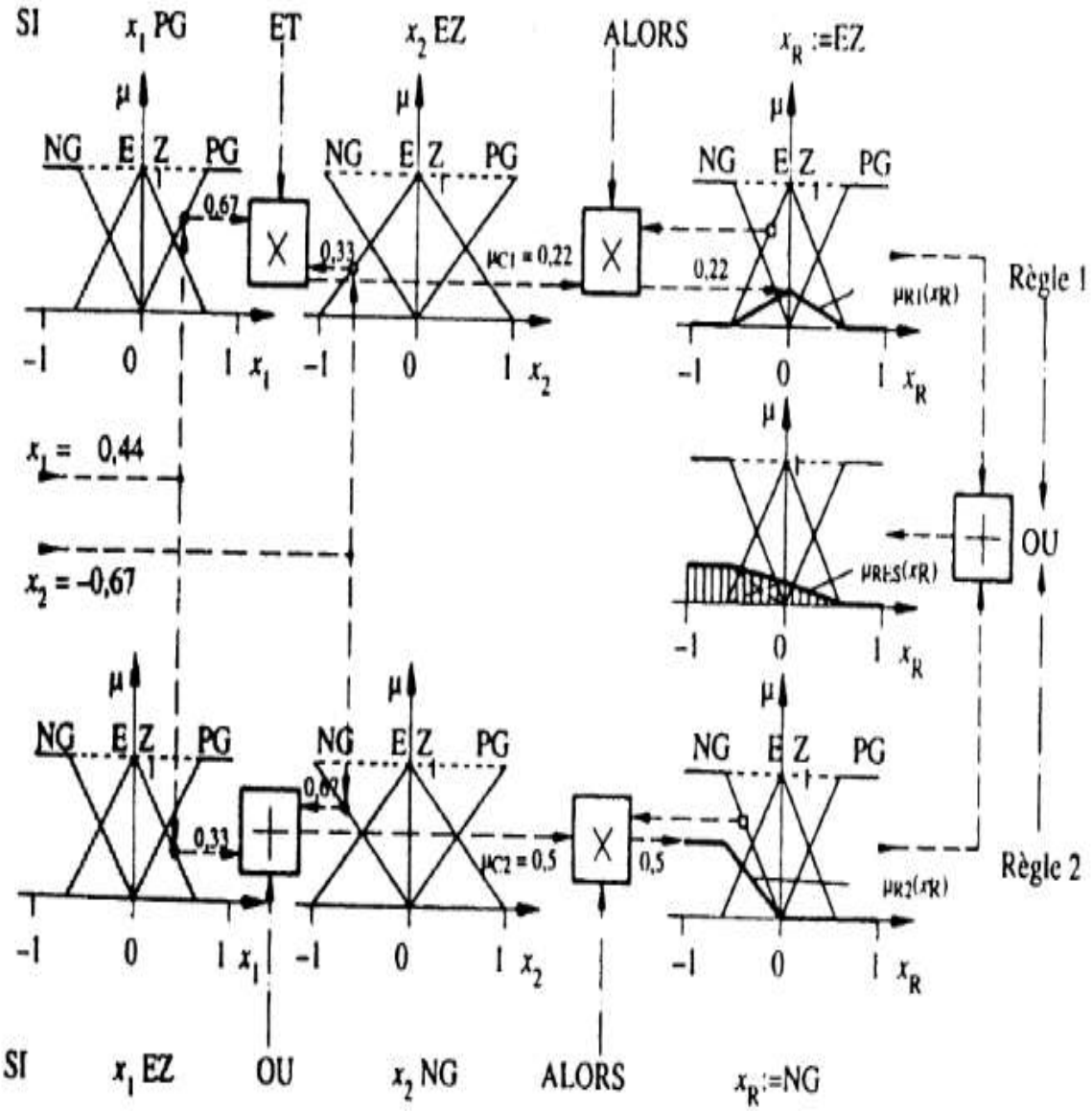


Figure III.7 : méthode d'inférence SOMME-PROD

III.10.4 Interface de défuzzification

Pour pouvoir définir la loi de commande, le contrôleur flou doit être accompagné d'une procédure de défuzzification. Etant donné que l'organe de commande nécessite un signal de commande précis à son entrée, il faut donc prévoir une information déterminée (physique).

Cette transformation est assurée par le bloc de défuzzification. Ce même bloc réalise la conversion inverse de la fuzzification (conversion digitale/analogique). Plusieurs stratégies de défuzzification peuvent être utilisées, parmi lesquelles on trouve **: [40]**

- ✓ Méthode de défuzzification par centre de gravité.
- ✓ Méthode de défuzzification par valeur maximale.
- ✓ Méthode de défuzzification par valeur moyenne des maxima

III.10.4.1 Défuzzification par centre de gravité :

L'une des méthodes de défuzzification les plus utilisées est celle de la détermination du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante, il suffit de calculer son abscisse dont l'expression est donnée par :

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mu_z(w_i).w_i}{\sum_{j=1}^{n} \mu(w_j)} \quad \textbf{(III.7)}$$

Z : Est le sous ensemble flou obtenu par le moteur d'inférence.

Z_0: Le centre de sous ensemble flou.

$w_j, j = 1, \ldots\ldots, n$: n Points uniformément repartis sur l'univers de discours.

μ_z : Fonction d'appartenance associée au sous ensemble flou z. **[44]**

III.10.4.2 Méthode de défuzzification par valeur maximale :

Cette méthode ne s'utilise que dans le cas discret. On choisit comme sortie y_m l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante μB_{res}(y). Lorsque μB_{res} (y) est écrêtée, on prend la moyenne des abscisses du maximum :

$$y_m = \frac{\sum_{yieM} \ y_i}{|M|} \quad \textbf{(III.8)}$$

Avec : $M = \{y \in [-c, c] \mu B_{res}(y) = H\ (B_{res}(y))\}$. **[44]**

III.10.4.3 Méthode la Défuzzification par la moyenne des maxima (MM) :

La méthode de la moyenne des maximas revient à prendre l'abscisse correspondant à la moyenne des abscisses ayant pour ordonnée la valeur maximale des fonctions d'appartenance.

Mathématiquement la MM s'énonce comme suit : **[35]**

$$\text{Valeur} = \frac{\int_s x dx}{\int_s dx}, \text{ avec } \quad S = \{x, \mu(x) = sup(\mu(x))\} \qquad \text{(III.9)}$$

III.11 La logique floue dans l'industrie :

Depuis quelques années, on voit émerger, notamment aux États-Unis, plusieurs applications utilisant des systèmes de contrôle basées sur la théorie des ensembles flous. Les principaux domaines de recherche et d'application de la logique floue sont les suivants :

• Automatisation de la production de fer et de l'acier, purification de l'eau, chaîne de montage et robots de fabrication.

• Commande des instruments (capteur, et instruments de mesure), et reconnaissance de voix et de caractères.

• Conception, jugement et décision (consultation, investissement et développement horaires de train).

• Commande des unités arithmétiques, des micro- ordinateurs, et réalisation des opérateurs.

• Traitement d'information telles que les données, recherche de l'information modélisation des systèmes,… etc. **[34]**

III.12 Avantages et inconvénients de la commande par logique floue

La commande par logique floue réunit un certain nombre d'avantages et de dés inconvénients :

A. Les avantages essentiels sont :

- La non-nécessité d'une modélisation (cependant, il peut être utile de disposer d'un modèle convenable).
- La possibilité d'implanter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus.
- La maîtrise du **procédé** avec un comportement complexe (fortement non-Linéaire et difficile à modéliser).
- L'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non-linéaire);
- Deux solutions sont possibles: solution par logiciels (par microprocesseur, **DSP** et **PC)** ou solution matérielle (par fuzzy processeurs). **[34]**

B. Les inconvénients :

- Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification).
- L'approche **artisanale** et non systématique (implantation des connaissances des opérateurs souvent difficile).
- L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toute généralité (en l'absence d'un modèle valable).
- La possibilité d'apparition de cycles limites **à** cause de fonctionnement **non-**linéaire.
- La cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible). **[34]**

Conclusion

Dans ce chapitre, nous sommes intéressés à l'utilisation de la logique floue en commande l'accent a été particulièrement mis sur les différentes étapes dans le traitement des règles d'un contrôleur flou. Les systèmes flous sont à l'évidence meilleurs que les systèmes linéaires à partir du moment où ils génèrent des résultats assez proches du raisonnement humain, sous réserve d'avoir au préalable bien défini les trois parties qui structurent sont fonctionnement ,à savoir : la modélisation des données d'entrées en variables linguistiques grâce à des fonctions d'appartenances, la définition d'une liste de règles d'inférences qui représentent les connaissances que l'on a du système et enfin, le choix de l'opérateur logique utilisé et le type de Défuzzification choisie .

En tout cas, on peut confirmer que le réglage par logique flou présente une solution valable par rapport aux réglages conventionnels. Cela est confirmé non seulement par un fort développement dans beaucoup de domaines d'application, mais aussi par des travaux de recherche sur le plan théorique. Ainsi, il est possible de combler quelques lacunes actuelles, comme le manque de directives pour la conception et l'impossibilité de la démonstration de la stabilité en l'absence d'un modèle valable.

Chapitre IV

Résultats d'étude de la fiabilité de la turbine à gaz examinée

IV.1. Introduction

Dans un cadre international extrêmement concurrentiel, les entreprises doivent très intéresse à la fiabilité prévisionnelle pendant la conception des systèmes industriels. Les études sur la fiabilité prévisionnelle jouent un rôle très important dans les industries modernes et aussi dans les domaines économiques, donc a la lumière de cette vérité, plusieurs sociétés essai de crée des méthodologies et faire des exercices expérimentaux pour arriver a la meilleure méthode qui assure une conception des systèmes plus fiable et très efficace. Dans ce chapitre les résultats obtenus de l'étude de fiabilité floue d'une turbine a gaz seront présenter. En effet, dans le processus de développement des systèmes mécaniques complexes, la fiabilité est devenue une caractéristique essentielle. Ainsi, pour optimiser le développement de ces systèmes, il est impératif de disposer des méthodes permettant d'évaluer la fiabilité dans les phases préliminaires de conception. Les méthodes d'analyse et d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes sont nombreuses et la plus par de ces méthodes base sur les lois probabiliste ou des diagrammes qui analyse le fonctionnement des systèmes, a partir cette description on propos dans ce qui suit une méthodologie base sur un système expert a base de la logique floue pour avoir une évaluation plus réaliste de la fiabilité prévisionnelle d'une turbine a gaz.

IV.2. Elaboration d'un système expert à base de la logique floue

L'évaluation de la fiabilité prévisionnelle par les systèmes experts à base de la logique floue n'est pas une tache délicate a cause de la nature probabiliste de cette grandeur. Pour effecteur cette méthode, on combine la logique floue avec un système expert qui reçoit des informations a propos des grandeurs caractéristiques de la turbine a gaz examinée et leurs conditions de fonctionnement. La logique floue utilise les informations précédentes et a l'aide de l'opinion de l'expert a propos la dépendance entre les composantes et la priorité des composantes (les éléments les plus défaillantes) il donne une évaluation fidele de la fiabilité prévisionnelle de turbine.

IV.3. Elaboration de système expert

Les systèmes expert sont défini par des ensembles des programmes capable de reproduire la démarche d'un expert, a partir de cette définition le but de cette section est d'établir un programme expert capable d'évaluer suivant la situation de fonctionnement : le

taux de défaillance, la fiabilité, et la moyenne des temps de bon fonctionnement de chaque composent de turbine, ou un système mécanique similaire a partir des bases de connaissances d'expert MIL-HDBK.

IV.4. Détermination de taux de défaillance de chaque composante

La première étape consiste a calcule le taux de défaillance de composantes choisi a partir des informations sur les conditions de travail de turbine, qui utilise des lois mécaniques et des lois empiriques bases sur la connaissance de l'expert, puis il prend une décision sur le taux de défaillance global de pompe centrifuge a partie de ces composants.

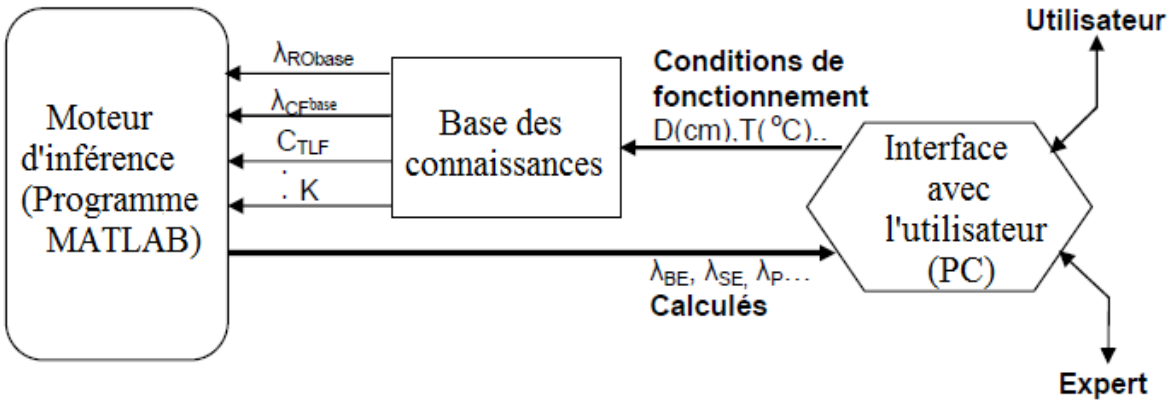


Figure IV.1: Architecteur de système expert

La structure générale de système de fiabilité floue est présente comme suite :

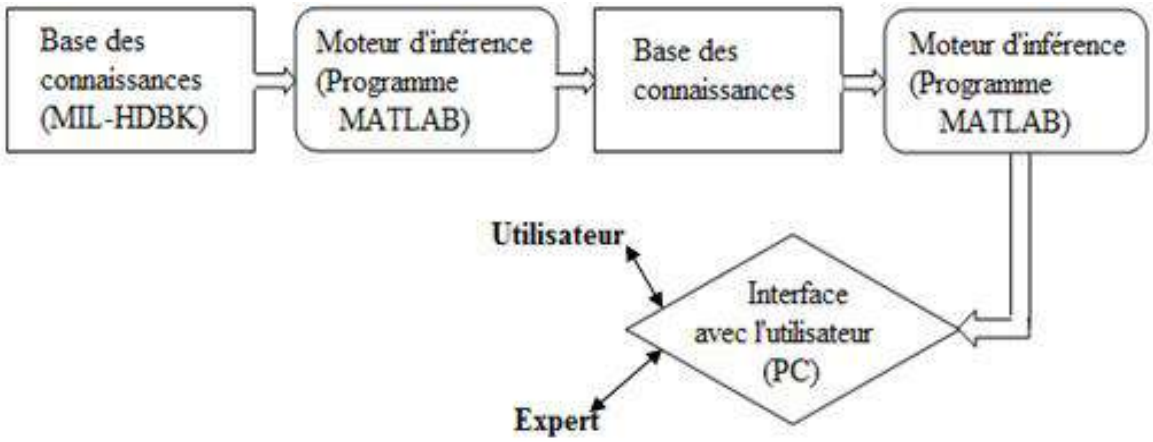


Figure IV.2: Architecteur général du système expert pour l'évaluation de fiabilité prévisionnelle

A partir des donne de fonctionnement, ce système expert fourni plusieurs résultats tel que les paramètres des lois de distribution de taux de défaillance, la fiabilité prévisionnelle, la moyenne des temps de bon fonctionnement et taux de défaillance instantané pour chaque sous système dans la turbine a gaz examinée.

La structure de la logique floue utilisée est donnée par la figure suivante :

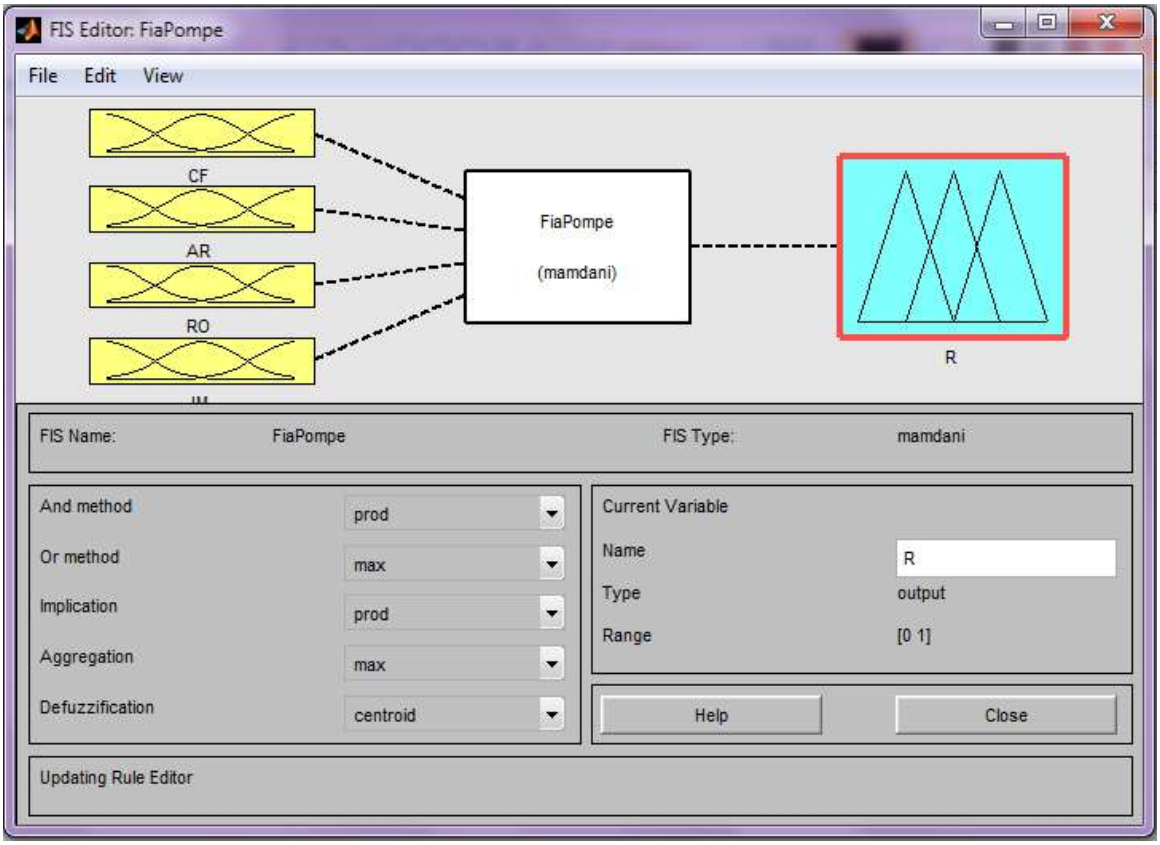


Figure IV.3: Structure de bloc de la logique floue

IV.4.1. Caractéristiques de bloc flou

- Type de bloc flou : Mamdani
- Les variables d'entrées :
    1. Nombre des entrées de bloc floue : 4.
    2. Horizon de chaque entrée : [0 1].
    3. Nombre de fonction d'appartenance: 5.
    4. Type de fonctions d'appartenance : Gaussien.
- Les variables de sorties :
    1. Nombre des sorties de bloc floue : 1.
    2. Fiabilité résultante de turbine a gaz.

La fiabilité totale de pompe centrifuge est le produit de fiabilité résultant obtenue par logique flue et la fiabilité de l'enveloppe de la pompe qui a une valeur proche de 1 ce qui explique que les deux fiabilités ont des valeurs proches.

- Type de fonctions d'appartenance : Gaussien.

➢ Méthodes de calcule de sortie a partir des entrées:

- Méthode pour AND : le Produit ;
- Méthode pour OR : le Maximum ;
- Méthode de l'implication : le Produit ;
- Méthode de l'agrégation : le Maximum ;
- Méthode de fuzzification : Centre de gravite.

La répartition des fonctions d'apptanance est déterminée à partir de l'avis de l'expert (Barringer) sur les éléments qui causes plus de défaillance et qui contribuent plus que les autres éléments la dégradation et défaillance de la turbine.

Les figures suivantes présentent les fonctions d'appartenance d'entrées et de sortie du bloc flou:

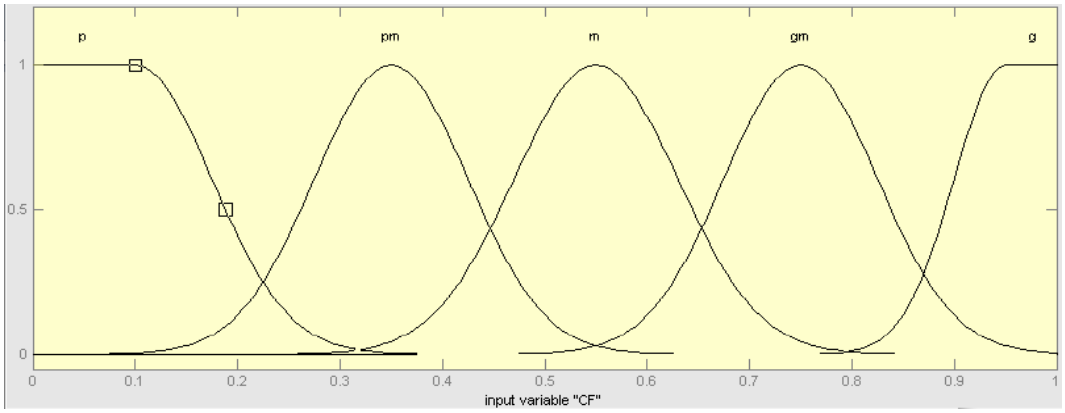


Figure IV.4: Fonctions d'appartenance de fiabilité résultante

IV.5. Résultats obtenus de fiabilité de la turbine à gaz examinée

Dans cette partie, on s'est intéressé à des données de terrain, recueillis de l'historique d'une installation de turbine a gaz examinée, afin d'évaluer au mieux sa fiabilité et sa sûreté de fonctionnement ainsi que de proposer un planning scientifique des actions de maintenance préventive. Dans cette étude nous avons utilise la loi de Weibull pour déterminer les paramètres de fiabilité de la turbine a gaz examinée, en vue de son application par la suite dans ce travail pour le développement d'un système pronostic propre a cette turbine a gaz. En

effet, notre démarche consiste à observer ce système, pendant un certain temps de fonctionnement, dans des conditions réelles d'utilisation, une turbine a gaz auquel on s'intéresse et a répertorier toutes les défaillances qui surgissent et les informations relatives à celle-ci (TBF, TTR), donner sur la tableau IV.1. On obtient ainsi les données de base, qui permettent de quantifier la fiabilité de la turbine a gaz examine.

Nous avons procèdes le regroupement de ces données en classe, dans ce cas on a N > 50, plusieurs règles empiriques proposent le nombre de classes K a créer. Dans notre cas, N = 11 et d'après la formule de stringers, ce qui donne que K=1+3.31 $\log \sum_1^{11} n_i$ Alor, K= 1+3.3 log 11 = 4.44. On prend K=5, L'intervalle de temps entre deux classes est $\Delta T \ \frac{TB\ F_{max}}{K}$ = 2764 h. Donc les défaillances par classe sont données par le tableau IV.2.

N°	Marche Cumulée (h)	TBF (h)	DESIGNATION DES TRAVAUX
1	06 906	06 906	CI : Inspection des chambres de combustion
2	18 162	11256	Révision des veines chaudes (HGPI) et changement des chambre de combustion
3	31 783	13 621	CI : Inspection des chambres de combustion
4	37 153	05 370	MI : Révision générale
5	45 799	08 646	CI : Révision des chambres de combustion
6	59 618	13 819	Révision HGPI, changement IGV et changement de la pompe HP principale
7	67 223	07 605	CI : Inspection des chambres de combustion, des joints et accouplements cotes charge
8	74 174	06 951	Inspection des disques de poussées axiales
9	76 841	02 667	MI : Révision générale
10	86 591	09 750	Inspection des chambres de combustion
11	93 784	07 193	Révision HGPI

Tableau IV.1 : Données de fiabilité de turbine à gaz examinée

Classe	DT(h)	Nombre de pannes
1	0 – 2 764	1
2	2 764 – 5 528	1
3	5 528 – 8 292	4
4	8 292 – 11 056	2
5	11 056 – 13 820	3

Tableau IV.2: Données de défaillances de turbine à gaz examinée

Les résultats de l'expérience passive ont aboutis a une courbe du taux de défaillance rapidement croissante, comme il est montre sur les Figures IV.5, IV.6, IV.7, IV.8 et IV.9, pour les modèle de Weibull a deux paramètres et sur les Figures IV.10, IV.11, IV.12 et IV.13, pour le modèle de Weibull a trois paramètres. Par contre la Figure II.20, montre une comparaison de résultats avec l'utilisation de modèle de Weibull à deux et a trois paramètres. Ce qui signifie qu'un mode de défaillance prédominant a entraine une dégradation accélérée. La connaissance du paramètre de forme b de la loi de Weibull nous permet de localiser notre équipement sur sa courbe en baignoire et d'orienter un diagnostic, pour 3 <b< 4 : phase d'obsolescence ou apparait des phénomènes d'usure rapide et de corrosion.

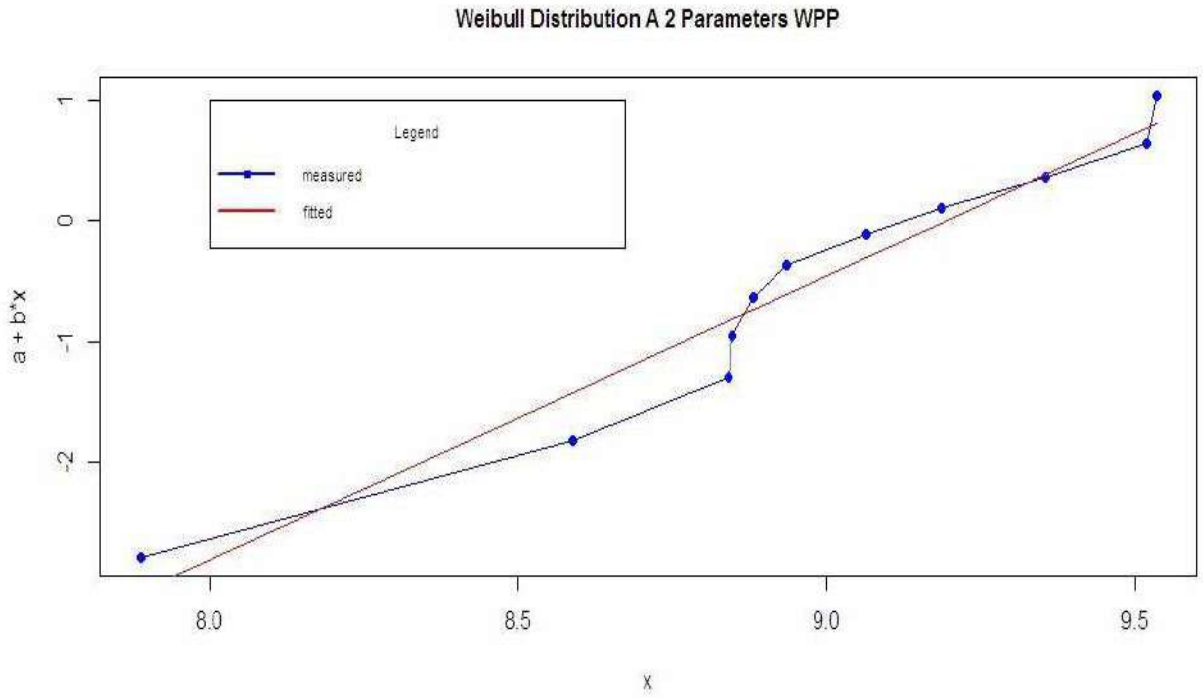


Figure IV.5: Fonction de probabilité avec Weibull à deux paramètres

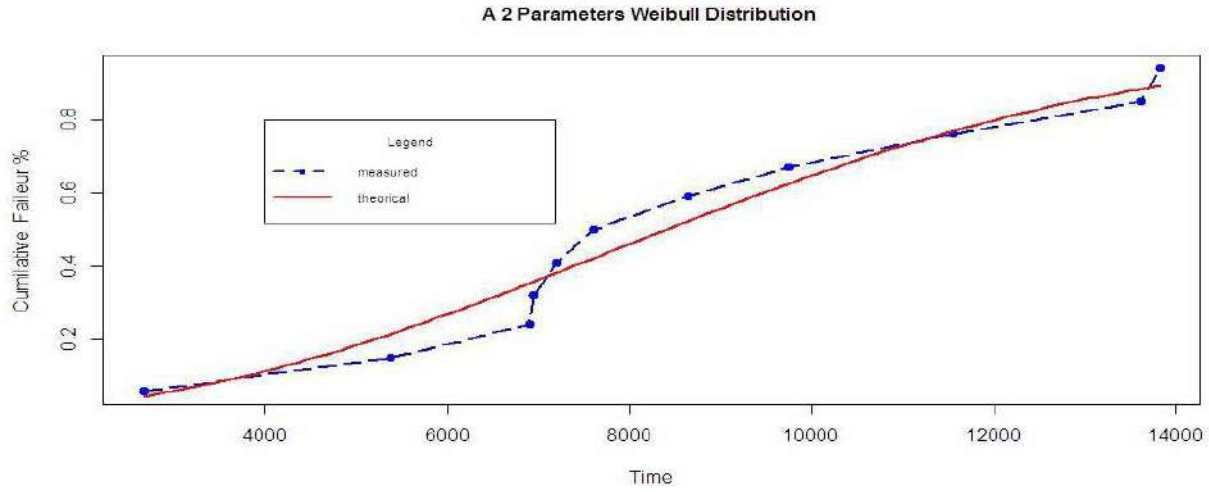


Figure IV.6: Défaillances cumulative avec Weibull à deux paramètres

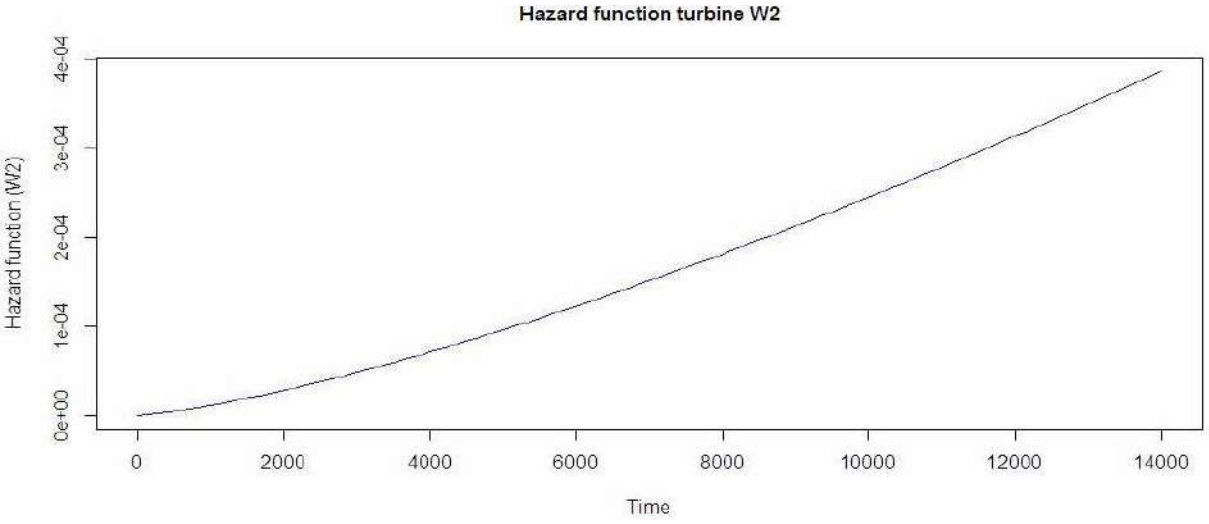


Figure IV.7: Fonction Hazard avec Weibull à deux paramètres

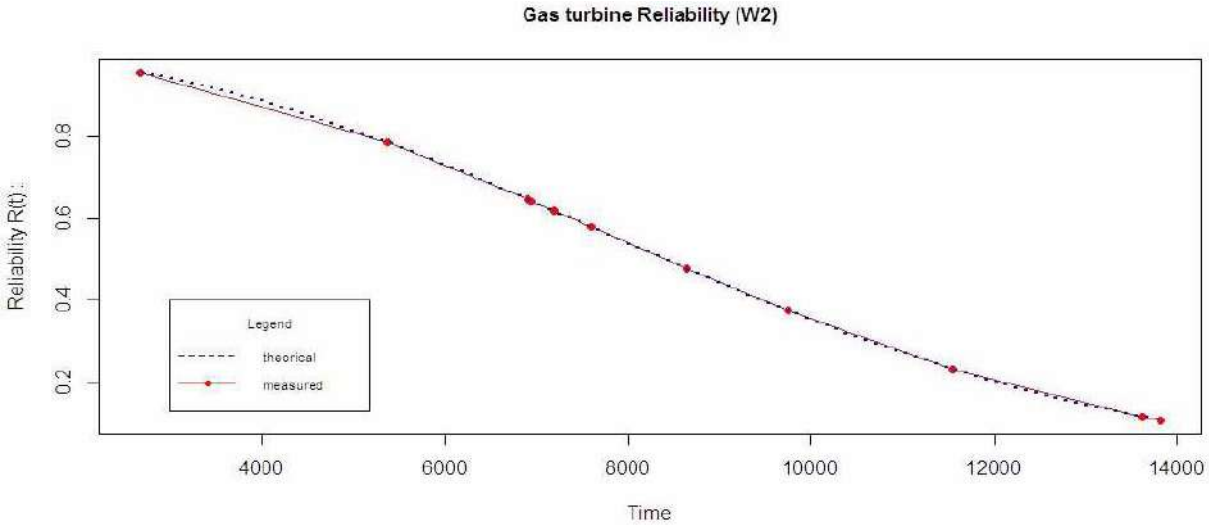


Figure IV.8: Fiabilité avec Weibull à deux paramètre

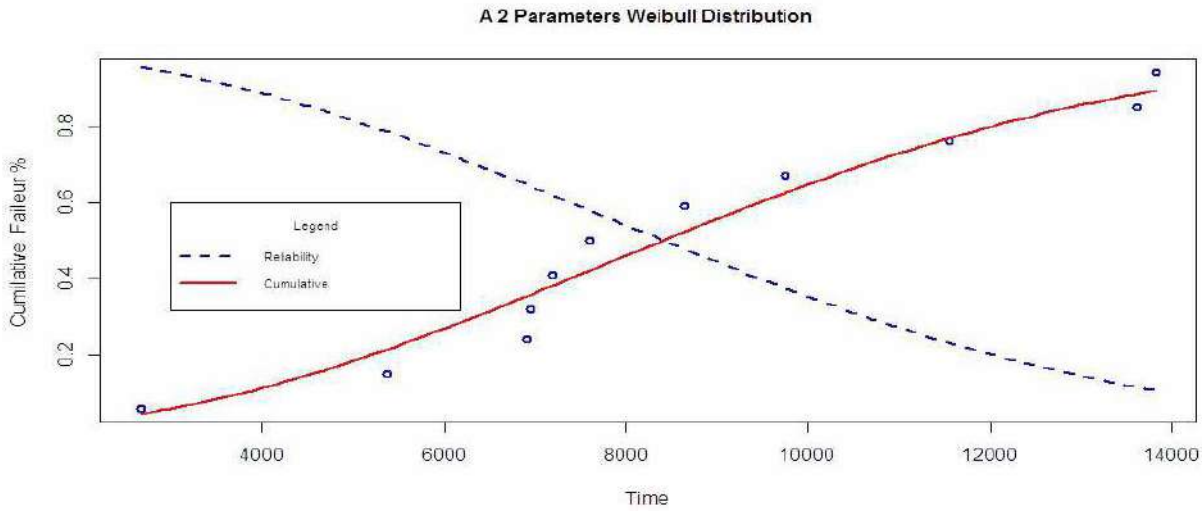


Figure IV.9: Fiabilité et défaillances cumulatives avec Weibull à deux paramètres

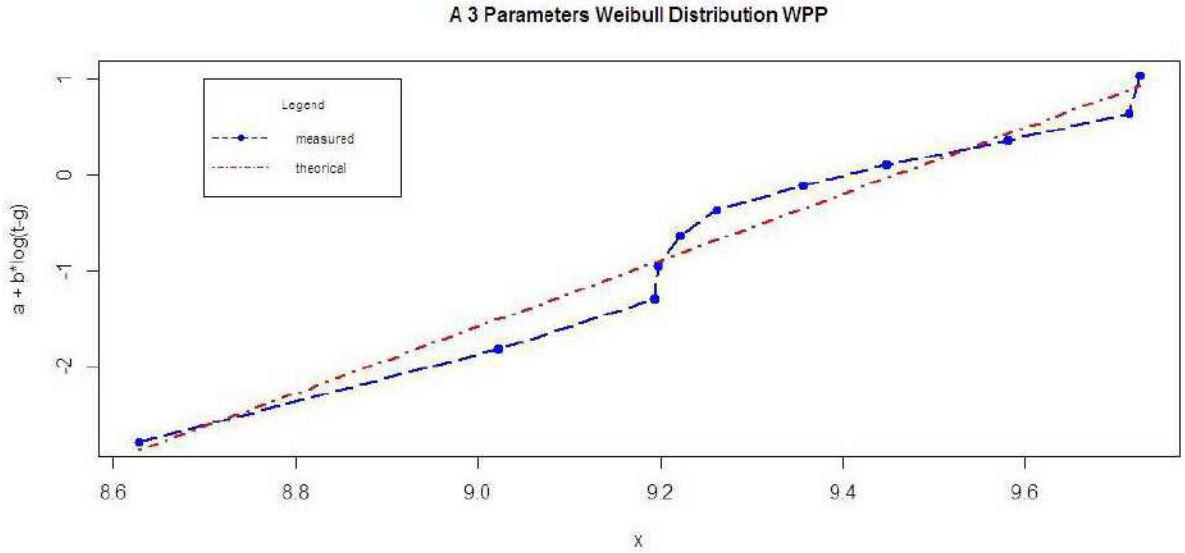


Figure IV.10: Fonction de probabilité avec Weibull à trois paramètres

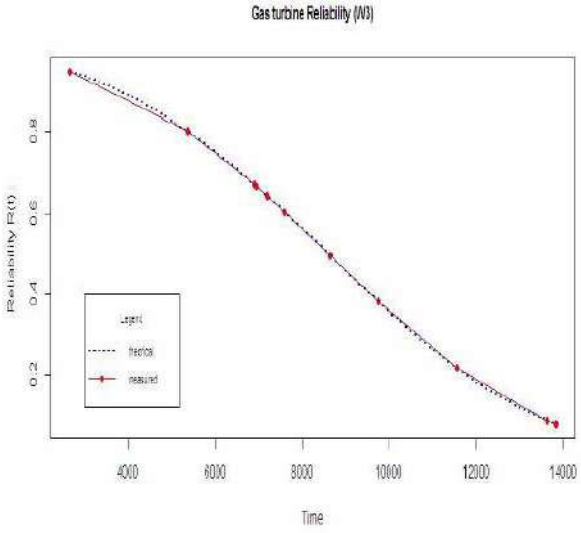


Figure IV.11: Fiabilité avec Weibull à trois paramètres

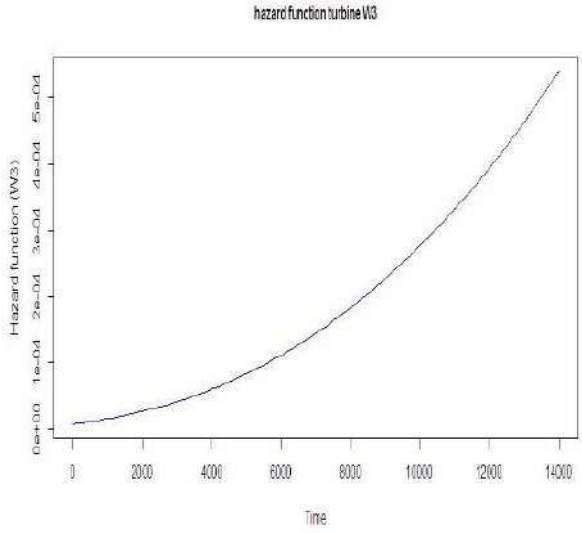


Figure IV.12: Fonction Hazard avec Weibull à trois paramètres

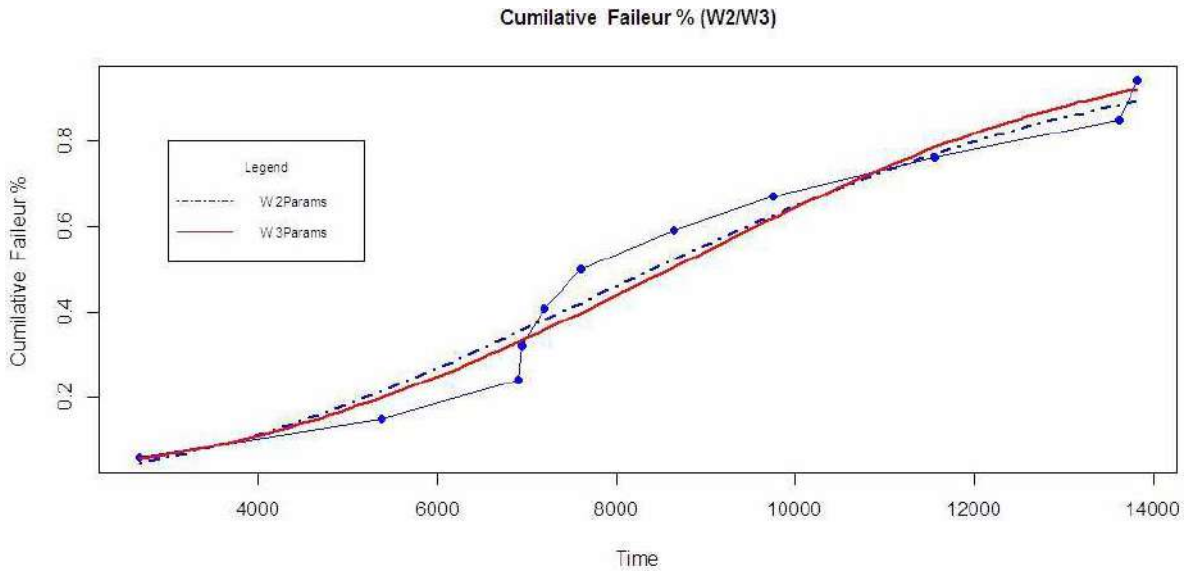


Figure IV.13: Défaillances cumulative avec Weibull à deux et à trois paramètres

On constate que la première période inclut la deuxième, ce qui nous permet de considérer la période **T=6100h** comme période optimale d'interventions systématique pour le changement des organes fragiles. Au-delà d'une certaine période de maintenance préventive qui a pour objet de surveiller et d'apprendre a connaitre le comportement de la TAG, le choix du type de préventif se pose. Il est évident que ce choix est a faire au niveau des composants les plus sensibles. Ainsi, la TAG peut être pris en charge :

- En rondes : lubrification, réglages,….

- En systématique : joints d'étanchéité….

- En conditionnelle : équilibrage, roulements….

A partir de ce dernier point et après avoir déterminé la période optimale d'interventions préventives (**T=6100h**), on peut adopter un programme de renouvellement des organes fragiles. Aussi, le programme de maintenance propose pour notre turbine a gaz examinée, consiste a réaliser un cycle d'interventions préventives chaque **30500h** de marche de la turbine. Ce cycle est proche de celui recommande par le constructeur qui est de **32000h.** Un écart de **1500h** qui pourrait aider à mieux gérer cette turbine dans son age obsolescence.

Au bout de periode optimale de remplacement des organes fragiles : **T=6100h,** la fiabilité d'une TAG est, alors, R(T)= 0,7572. Par complémentarité, F(T) =0,2428. Estimons

maintenant le taux d'amélioration de la fiabilité de la station par l'application de la redondance active. Le taux d'amélioration sera égal à $\tau = \frac{R_S - R}{R} = 0.3160$.

Cette amélioration sensible de la fiabilité (31.6%) pourrait avoir des répercussions techniques ; rallongement de la période d'interventions systématiques pour certaines turbines, ou organisationnelles ; avoir le choix d'intervenir ou pas a la défaillance d'une ou deux turbines (cela dépendra de la capacité globale désirée) selon la disponibilité des techniciens de maintenance, comme il est montre sur la Figure IV.14.

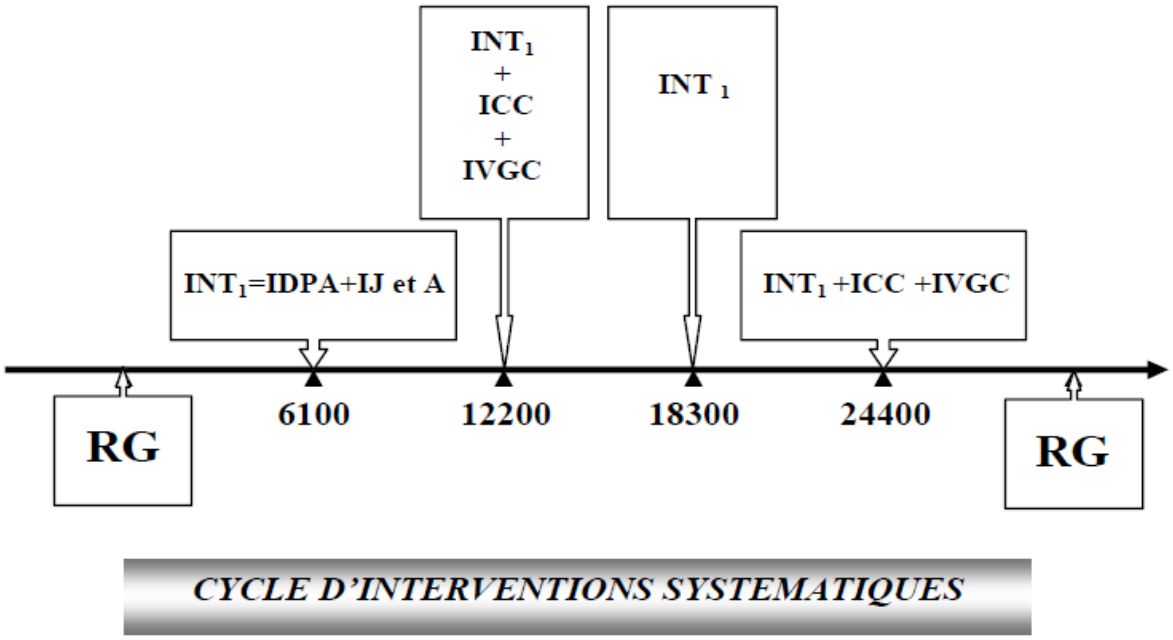


Figure IV.14 : Programme de maintenance proposé

Avec :

RG : révision générale. **INT1 :** intervention.

IJ : inspection des joints. **A :** accouplements.

ICC : inspection de la chambre de combustion.

IVGC : inspection de la veine des gaz chauds.

IV.6. Résultats de fiabilité avec système expert flou

L'évaluation de la fiabilité prévisionnelle de chaque composante été faite sur un horizon de 43800 h de fonctionnement, ce choix est motive par la durée de vie moyen des composantes les plus influentes sur la durée de vie de la turbine. Les résultats de simulation sont représente par les Figures suivent.

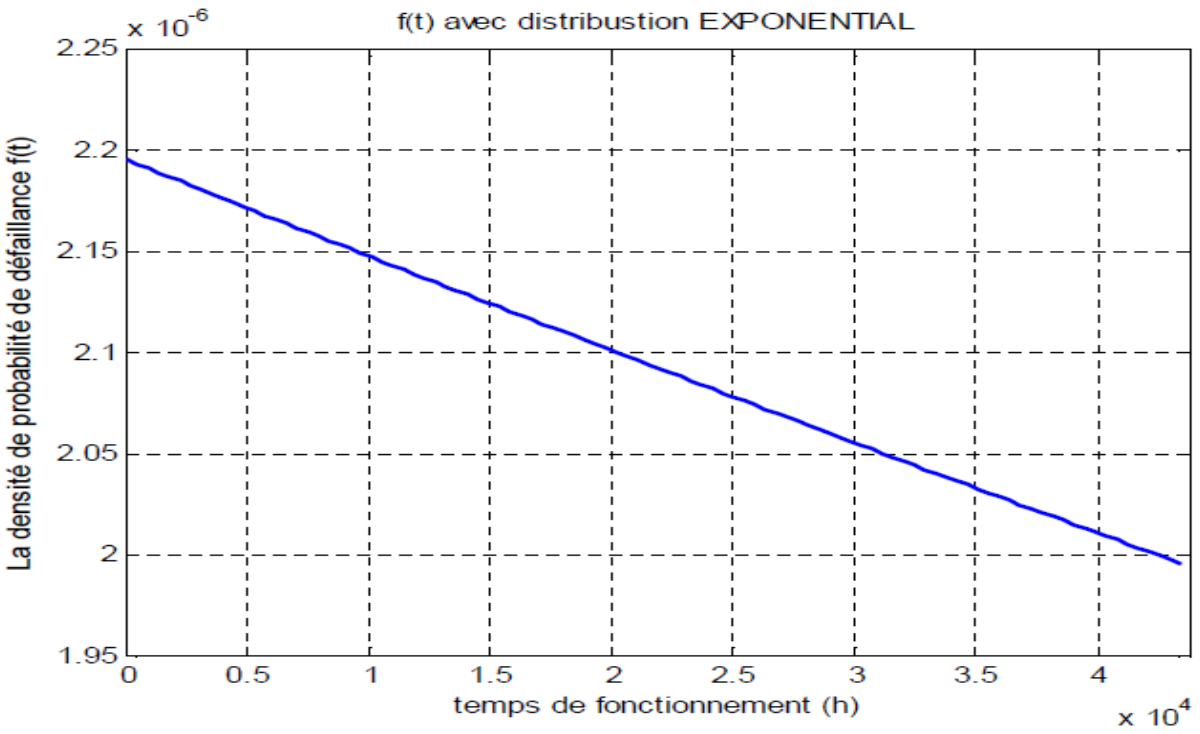


Figure IV.15: Densité de fiabilité floue avec la loi exponentielle

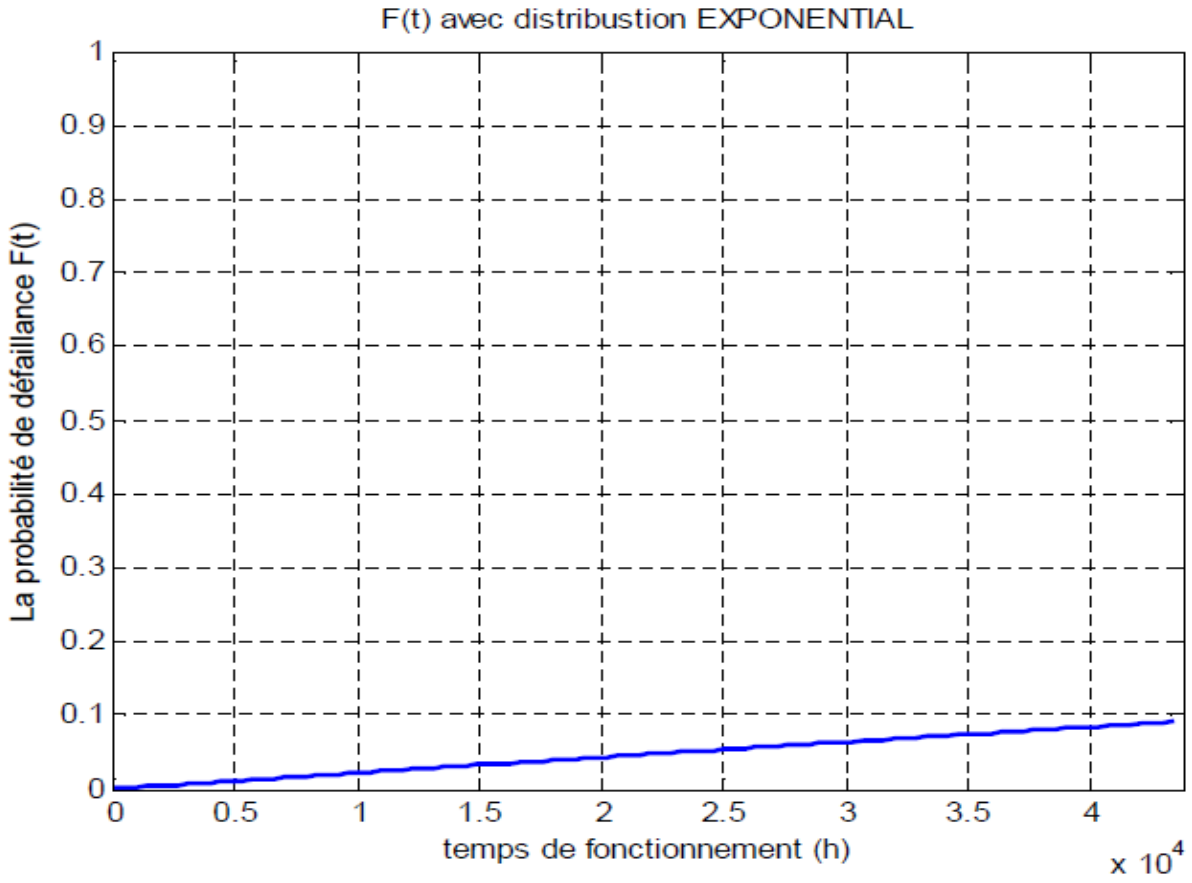


Figure IV.16: Probabilité de défaillance floue avec la loi exponentielle

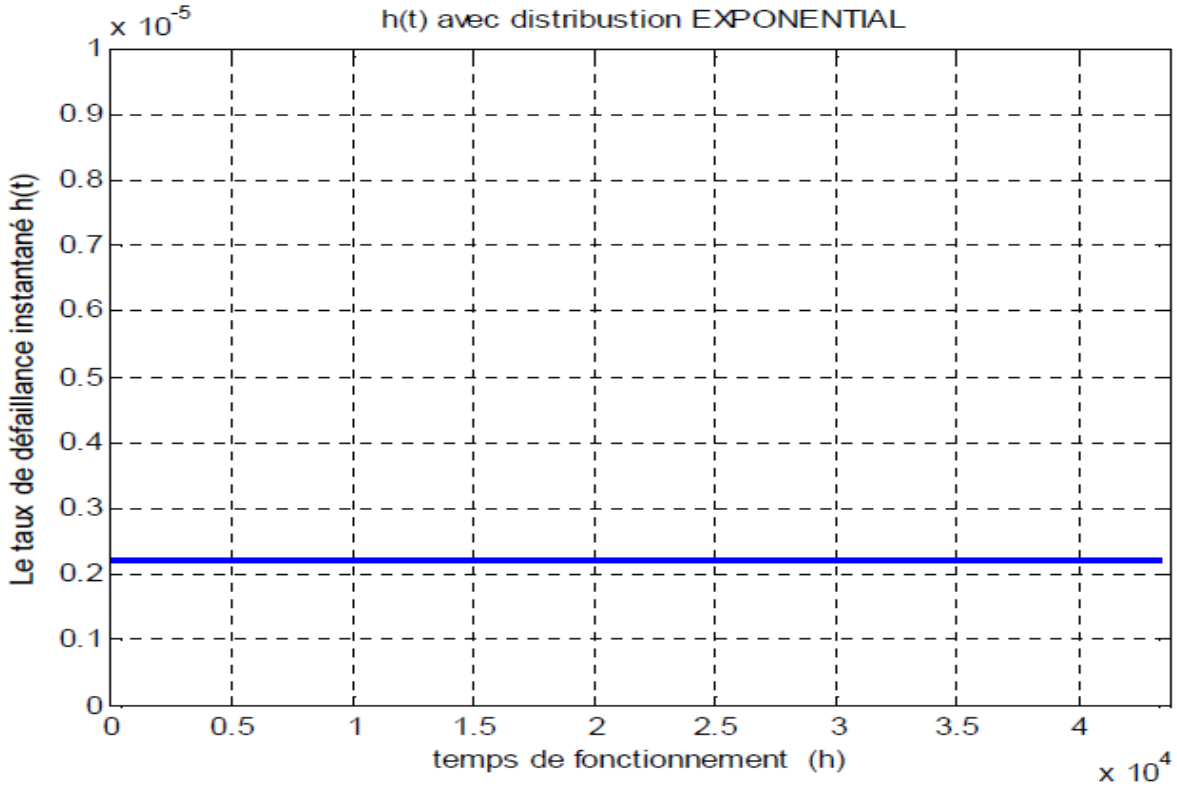


Figure IV.17: Taux de défaillance floue avec la loi exponentiel

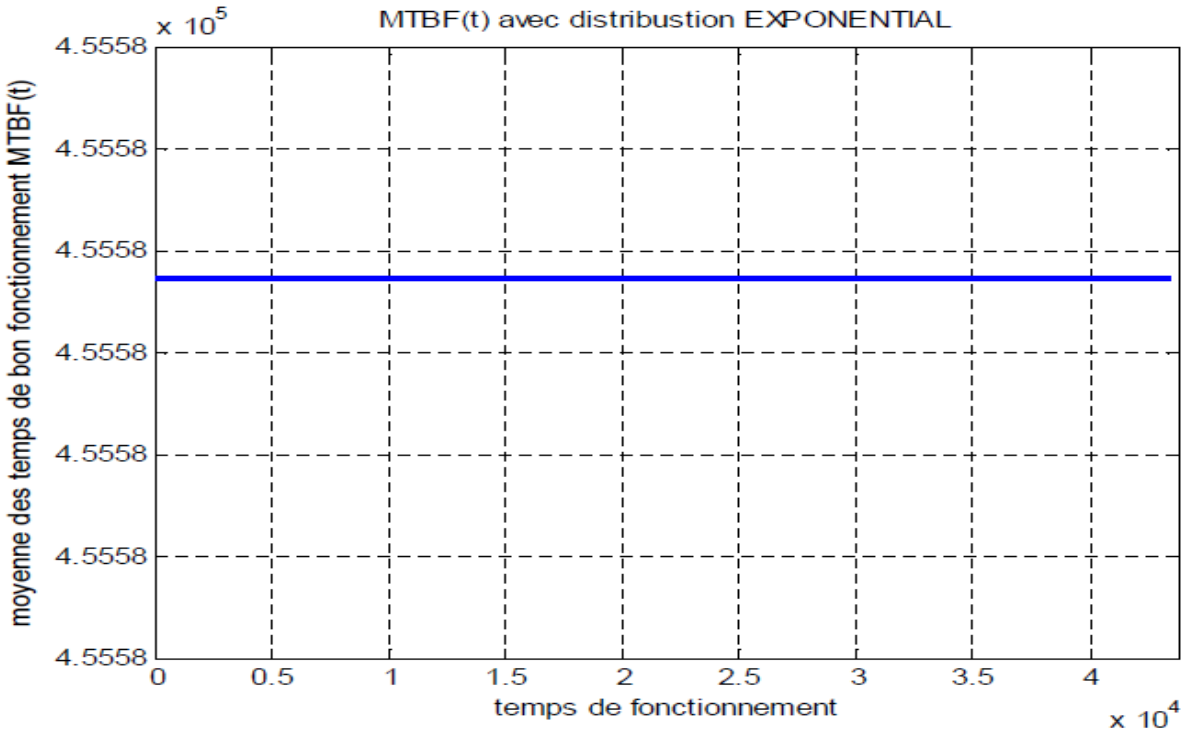


Figure IV.18: MTBF floue avec la loi exponentielle

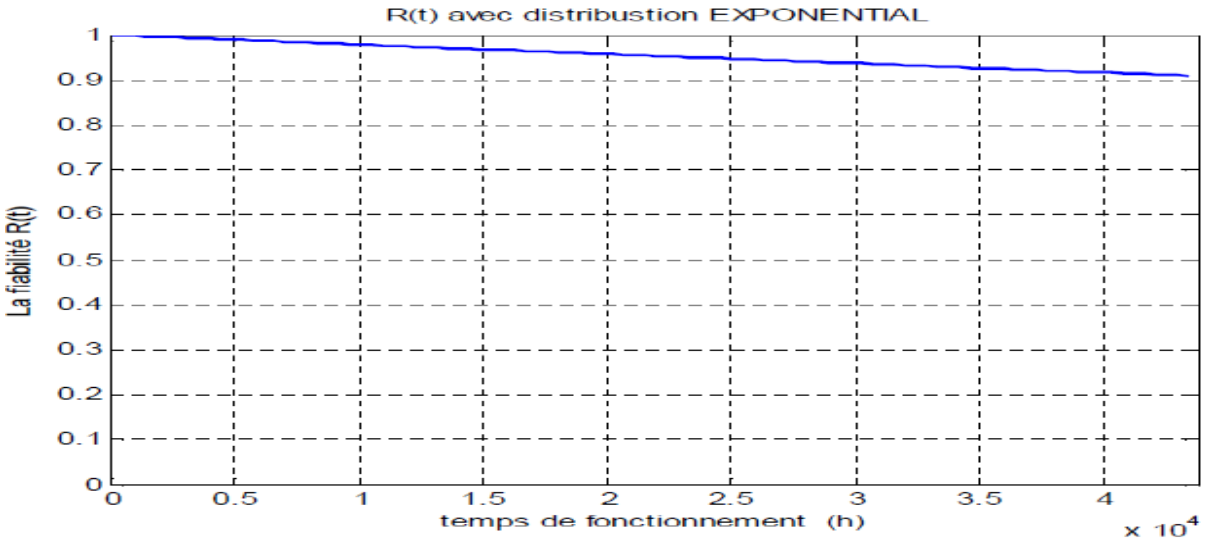


Figure. IV.19: Fiabilité floue avec la loi exponentielle

Les résultats de simulation montrer que les composantes de turbine examinée sont des éléments très fiable, on vue que la probabilité de défaillance pour lui ne dépasse pas la limite de 10 % après 5 ans de fonctionnement, ce que implique que les éléments stationnaire sont le plus fiable et que le choix de matérielle joue un rôle important dans la fiabilité des systèmes. Les résultats suivante montrent l'utilisation de la deuxième phase de système expert confirme que la distribution du taux de défaillance prend la forme Weibull avec une pente élevé ce que explique la régression rapide de fiabilité des joints dynamique, donc on peut dire que les éléments dynamique sont des éléments a faible, ca a cause du fatigue des matérielles. En effet la fiabilité est égale à zéro on 1 ans seulement.

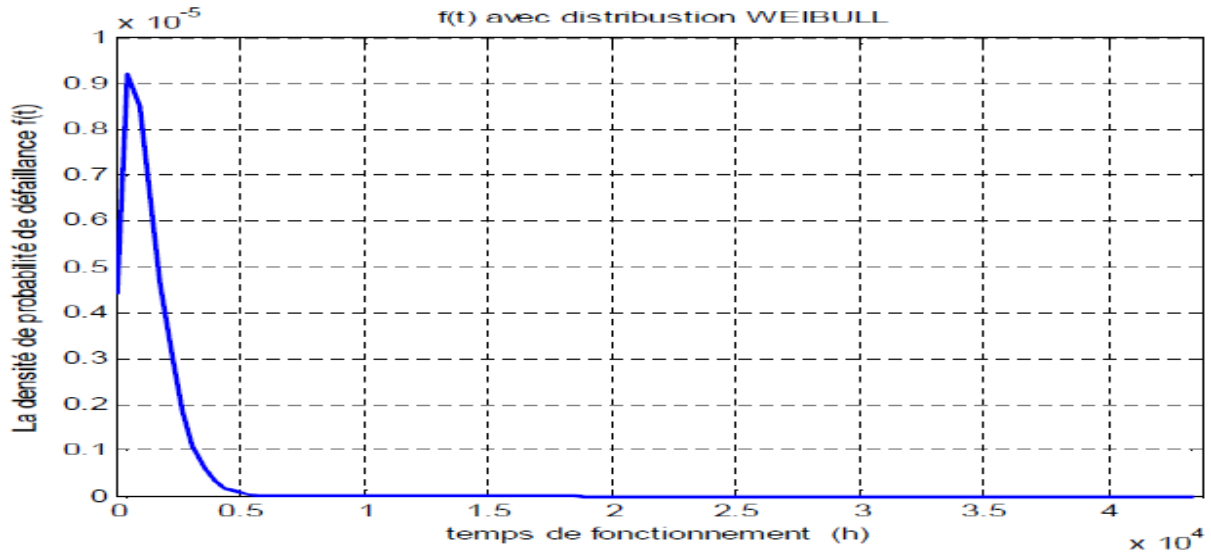


Figure. IV.20: Densité de fiabilité floue avec la loi Weibull

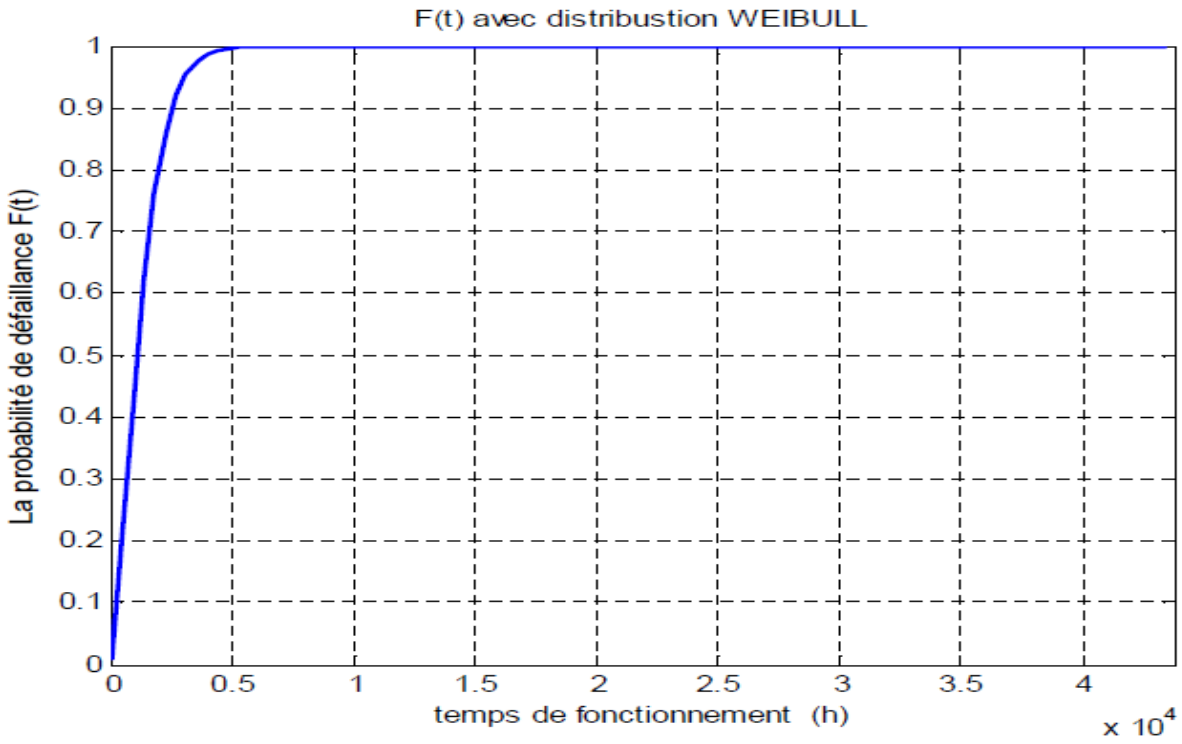


Figure. IV.21: Probabilité de défaillance floue avec la loi Weibull

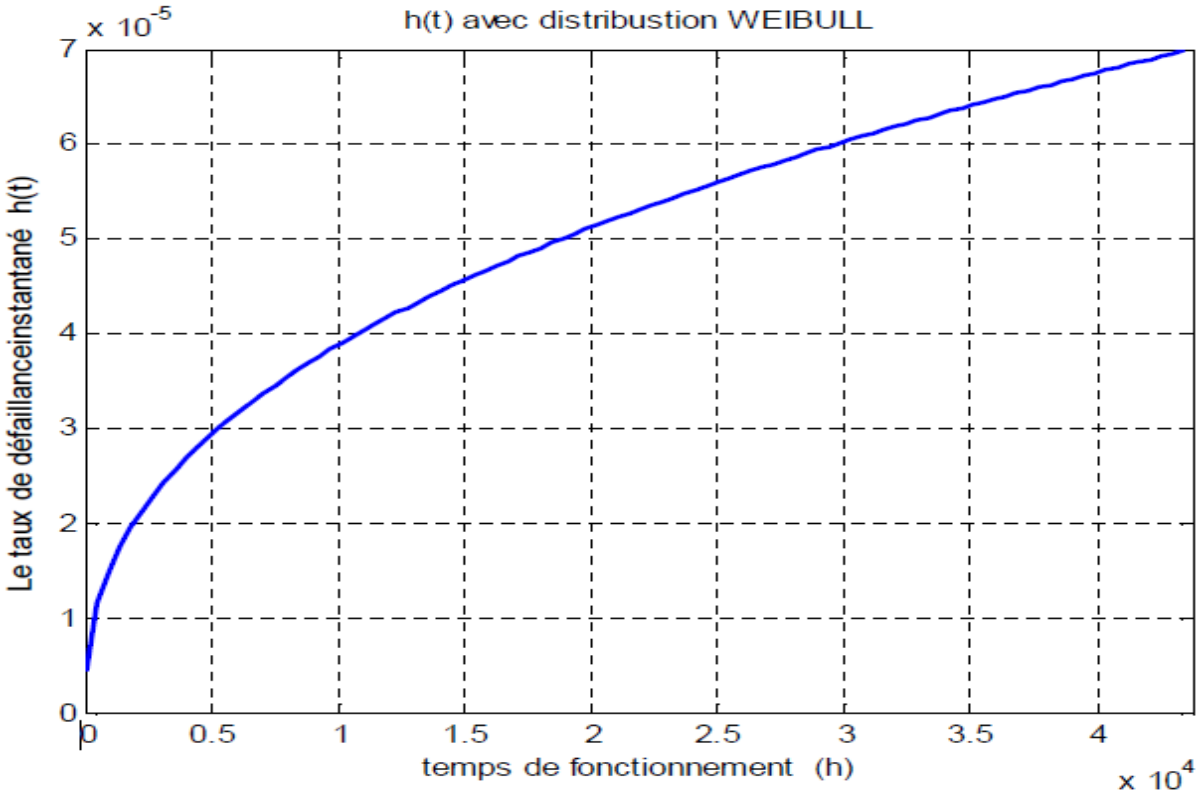


Figure. IV.22: Taux de défaillance floue avec la loi Weibull

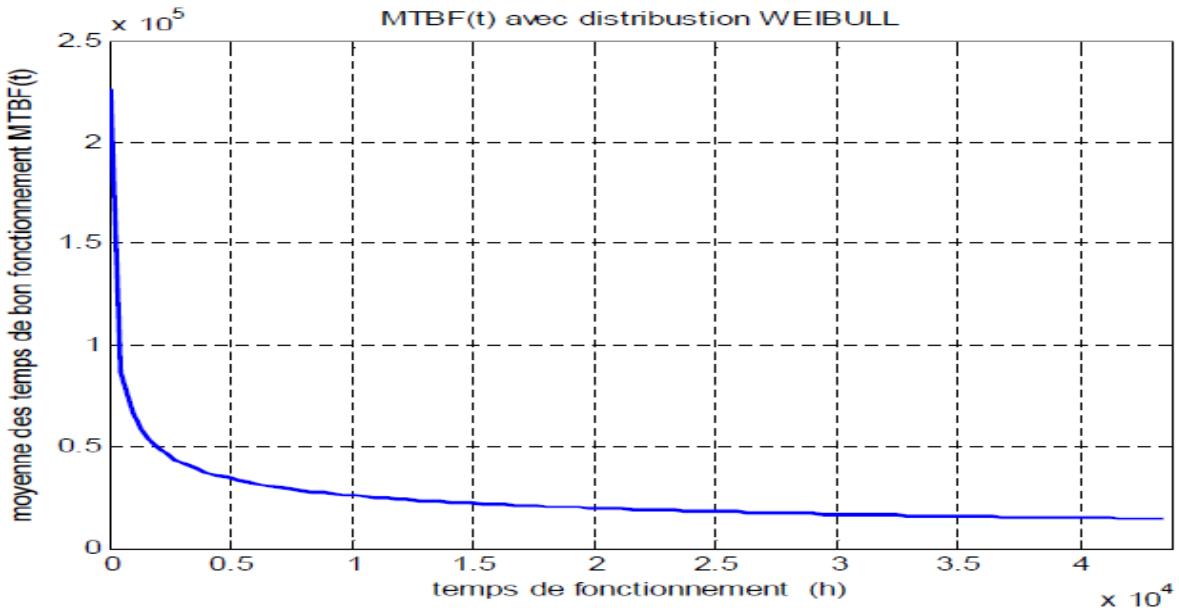


Figure. IV.23: MTBF floue avec la loi Weibull

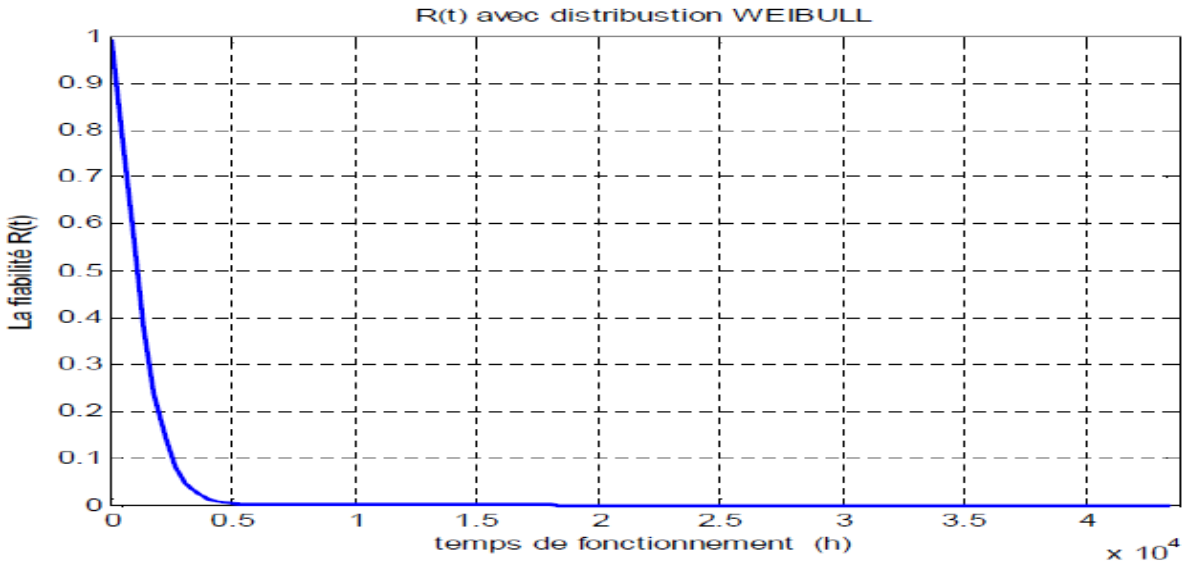


Figure. IV.24: Fiabilité floue avec la loi Weibull

L'utilisation du système expert montre que le taux de défaillance correspondent l'arbre de rotation de turbine prend la forme de distribution Weibull, donc on extraite les paramètres exact de la distribution a partir de la base des donne Weibull : β=1.2 et η=50000, et a partir ces paramètres on trace les fonctions qui déterminer la fiabilité prévisionnelle d'arbre. A partir de ces résultats, on peut conclure que l'arbre c'est le composant dynamique le plus fiable parmi les composants de la turbine, cette grande fiabilité retournée a la robustesse de la matière de construction.

Conclusion

Dans ce chapitre, on a fait une évaluation de la fiabilité prévisionnelle de turbine a gaz examinée par un système expert floue, cette évaluation passe par deux étapes essentielles, la première basée sur la point de vue d'expert, et la deuxième utilise la logique floue qui fonde a les résultats de la première. Cependant, la turbine a gaz est un équipement complique, mais très important dans les stations pétrolières qui nécessite une maintenance préventive bien planifiée. Dans ce cadre, nous avons fait une étude de fiabilité, et avons utilise toutes les démarches de calcul pour déterminer les paramètres de la fiabilité et le cout de maintenance, pour atteindre la meilleure estimation. Dans ce but, nous avons développe les démarches de maintenance basée sur la fiabilité, adaptée a un système de turbine a gaz, sujet de notre application dans ce projet de Master. Afin de valider ces méthodes, qui permettent d'assurer une disponibilité fonctionnelle du système examine et d'assurer une fonction logistique permettant d'organiser et de réaliser toute une série de précautions pour éviter les défaillances imprévues.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'évaluation prévisionnelle de la fiabilité des systèmes est indispensable pour concevoir des systèmes de plus en plus performants. Contrairement aux systèmes électroniques, il n'y pas de méthodes uniques ou normalisées pour évaluer la fiabilité prévisionnelle des systèmes industriels. Le choix de la méthode à appliquer se fait en fonction des objectifs fixés et des outils disponibles. Dans ce projet de Master nous avons fait une modélisation et évaluation de la fiabilité prévisionnelle d'un système de turbine à gaz industriel à base d'un système expert flou. Nous avons pris comme exemple d'application une turbine à gaz, ce choix est justifié par l'utilisation très vaste de ce type de turbine, la simplicité de principe de fonctionnement et la similarité avec un grand nombre des systèmes industriels.

Nous avons développé dans ce projet de Master, une méthodologie d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle d'un système industriel, pour permettre aux industriels de mieux appréhender les principes d'estimation de la fiabilité tout au long du cycle de vie des systèmes industriels. Les turbines étant des systèmes dynamiques, nous avons proposé, suite à une étude comparative sur les principales méthodes classiques d'évaluation de la fiabilité à travers le cycle de développement, de les estimer par une méthodologie de système "Expert-floue". Cette méthodologie d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle s'appuie sur :

- ✓ une modélisation fonctionnelle (permettant de donner les temps de fonctionnement);
- ✓ une modélisation dysfonctionnelle (donnant les instants de défaillance) du système ;

Pour la création de système expert, nous avons commencé par la détermination de taux de défaillance global de la turbine et cela à base de taux de défaillance de chaque composants.

Une étape considérée importante dans la méthodologie globale. Une analyse fonctionnelle de ces composants a été réalisée afin d'identifier leurs modes de défaillances, les causes possibles et leurs effets sur les systèmes à étudier.

Ensuite nous avons simulé la fiabilité floue pour déterminer en fin le type de sa loi de distribution et connaître tous les paramètres caractérisant sa fiabilité tels que les probabilités de temps de bons fonctionnements, les probabilités de défaillance, la fiabilité et le taux de défaillance.

Pour y arriver à construire ce système, des données issues des recueils de données de l'historique de la turbine examinée ont été utilisées. Après la création de système expert, nous

avons élaboré un système flou qui utilisera les données de notre système expert pour la modélisation, l'identification et l'évaluation de la fiabilité prévisionnelle de turbine à gaz examinée.

Annexes

ANNEXE_A_

A. Les contraintes spécifiques

L'analyse des types de défaillances a montré que la fiabilité dépend de contraintes diverses qu'il est facile de répartir en contraintes de fonctionnement, de mise en œuvre, et d'environnement. Cela explique que la fiabilité ne soit définie que dans des conditions de fonctionnement et d'environnement données.

A.1 Contraintes dues à l'environnement

On peut distinguer :

- **Les contraintes mécaniques :** chocs, vibrations, accélérations.
- **Les contraintes thermiques :** extrêmes de température ambiante, conditions de refroidissement (rayonnement, conduction, convection), chocs thermiques.
- **Les contraintes électriques :** surtensions, surintensités, coups de foudre, champs électriques ou magnétiques intenses.
- **Les contraintes climatiques :** degré hygrométrique, gaz corrosifs, pression atmosphérique, pollution (poussières), présence de liquides.

A.2 Contraintes de fonctionnement et de mise en œuvre

Ce sont :

- **Les contraintes thermiques** (probablement les plus importantes) : le caractère cyclique éventuel ajoute d'autres effets (fatigue par dilatations et contractions).
- **Les contraintes électrique** : densité de courant, champ électrique interne, champs magnétiques ; les impédances des circuits modifient les contraintes et le caractère cyclique éventuel ajoute des effets comme ceux décrits précédemment.

A.3 Contraintes sur la turbine à gaz

A.3.1 Compresseur d'air

Contraintes internes	Contraintes externes
▪ vitesse de rotation, température. ▪ Contraintes centrifuges sur ailettes et disques ▪ Vibrations des aubages fixes difficiles à maîtriser.	▪ Corrosion : agent chimique lié à l'environnement. ▪ Encrassement : vapeur d'huile, poussière. ▪ Erosion : air aspiré chargé de particules abrasives.

Tableau. A.1 : Les contraintes internes et externes du compresseur d'air

A.3.2 Distributeurs de turbine

- Mauvaise répartition de température.

A.3.3 Chambre de combustion

Contraintes internes	Contraintes externes
▪ Températures élevées :(Surchauffes locales, Brûlures d'injecteurs, Déformations). ▪ Vibration de combustion. ▪ Chocs thermiques : déformation, fissures.	▪ Corrosion à chaud : souffre et chlorures.

Tableau. A.2 : Les contraintes internes et externes de chambre de combustion**.**

A.3.4 Turbine

Contraintes internes	Contraintes externes
▪ vitesse de rotation, température. ▪ Contraintes centrifuges sur ailettes et disques. ▪ Fluage, Surchauffes, Chocs thermiques, Survitesse.	▪ Surchauffes locales dues aux condensats, Corrosion.

Tableau. A.3 : Les contraintes internes et externes de la turbine.

A.3.5 Lignes d'arbres

Les lignes d'arbres de turbines industrielles comportent les paliers lisses refroidis par huile. Les turbines aéronautiques sont munies généralement de paliers à billes et à rouleaux refroidis par air.

Contraintes internes	Contraintes externes
Vibration. Forte vitesse de rotation et température élevée. Déséquilibrage et charges anormales.	Mauvaise caractéristique de l'huile. Mauvaise alignement.

Tableau. A.4 : Les contraintes internes et externes des lignes d'arbres.

A.3.6 Circuits annexes

✓ Circuits de démarrage, Circuits de graissage, Circuits gaz carburant.

Contraintes internes	Contraintes externes
Automatismes et sécurités. Electrovannes, purges, pressostats, thermostats indicateurs de passage, niveau, température. Déséquilibrage et charges anormales.	Qualité du gaz (hydrates, condensats). Qualité de l'huile.

Tableau. A.5 : Les contraintes internes et externes de circuits annexes.

A.4 Contrôle commande et régulation

Contraintes internes	Contraintes externes
Contrôle des paramètres interdépendants et variables (température -vitesse), sécurités. Fonctionnement des séquences et des sécurités, Réglage, Châssis et mesure.	Température ambiante, Humidité, Perturbation par circuits voisins, Qualité d'alimentation.

Tableau. A.6 : Les contraintes internes et externes de la contrôles commande et régulation.

ANNEXE _B_

B. Equipement auxiliaire essentiel de la turbine à gaz V94.3A:

B.1 Enveloppe du compresseur et de la turbine:

L'enveloppe externe sous pression comprend quatre parties:

- Le corps d'admission du compresseur dans laquelle est intégré le corps de palier avant.
- L'enveloppe du compresseur
- Le corps central abritant la chambre de combustion annulaire
- Le corps de la turbine.

B.2 L'alternateur (Générateur) :

C'est l'élément responsable de la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique sous forme de courant alternatif, devant être débité au réseau interconnecté.
L'excitation de l'alternateur s'effectue par une excitatrice statique.



Figure B.2: Alternateur.

B.3 Transformateur:

C'est une machine statique permettant d'assurer la transformation du courant alternatif produit dans l'alternateur, en un autre système d'intensité et de tension en modifiant leur amplitude.
Son fonctionnement se base sur l'emploi de plusieurs bobines sur un même circuit magnétique. Lorsque les bornes primaires sont reliées à une source de courant alternatif, elles

créent dans le noyau du circuit magnétique un flux alternatif dont les variations provoquent, dans les bobines secondaires, une force électromotrice d'induction alternative de même fréquence.



Figure B.3 : Transformateur de la centrale

B.4 Système lavage compresseur:

- Ce système est utilisé pour l'élimination de dépôts de l'aubage du compresseur par un fluide de nettoyage et donc pour un rinçage du compresseur par de l'eau déminéralisée.
- Les résidus sur les palettes réduisent l'efficacité et la production de l'installation.
- Le nettoyage des palettes est nécessaire car les filtres de la structure de prise n'éliminent que les particules grossières.

B.5 Système de drainage:

La solution de nettoyage pulvérisée dans le compresseur de la turbine au cours des opérations de nettoyage est collectée dans plusieurs endroits dans la turbine à gaz. Ce liquide est éliminé par le système de drainage avant le nouvel démarrage de la turbine à gaz.



Figure B.5: outils de drainage

B.6 Poste de gaz :

Ce dispositif permet de garantir une alimentation correcte en gaz naturel des deux turbines à gaz, avec des pression et débits suffisant et courants.

Le gaz naturel arrive à la centrale au moyen d'un gazoduc avec une certaine pression d'entrée. Celui-ci passe par le poste gaz pour aboutir aux séparateurs dans lequel seront éliminés tous les condensats contenus dans ce gaz, qui seront alors conduits à un réservoir de récupération.



Figure B.6: Postes gaz combustibles de la centrale

B.7 système prise d'air pour la turbine à gaz:

Le système de prise d'air fournit de l'air filtré au compresseur de la TAG. En quantité et qualité nécessaires au fonctionnement de cette dernière dans les conditions ambiantes. A l'admission au compresseur, un silencieux réduit le niveau acoustique à la limite requise. Le système est accessible pour les révisions et la maintenance.

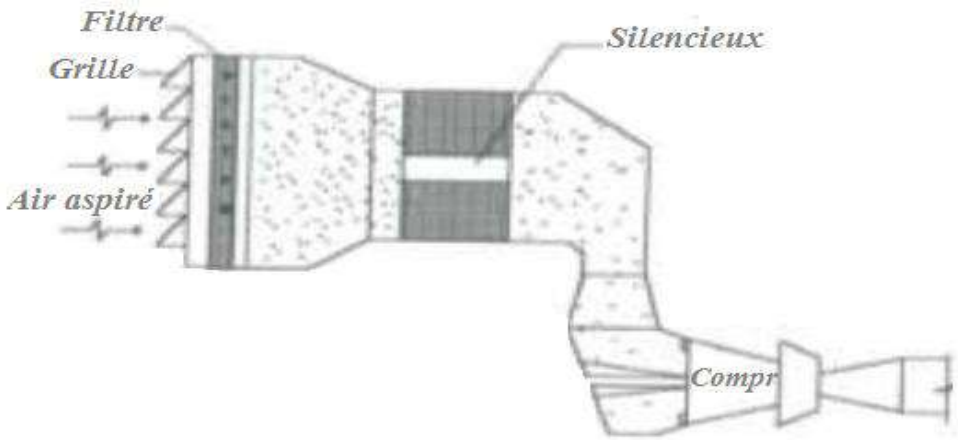


Figure B.7: Système prise d'air

B.8 Système de refroidissement:

Il faut réfrigérer l'aubage de la turbine de manière à empêcher que les matériaux de la turbine ne dépassent pas les niveaux maximums admissibles. L'air de réfrigération n'accomplit pas seulement une fonction de refroidissement, étant utilisée aussi en tant que air de protection prévenant l'entrée des gaz chauds dans les espaces vides à l'intérieur de la chemise.



Figure B.8: système de refroidissement

B.9 Système d'huiles de graissage:

Le circuit d'huile de graissage alimente en huile les paliers de la turbine à gaz, de l'alternateur et le vireur hydraulique. La pompe à huile de graissage principale refoule l'huile de la cuve à la tuyauterie d'alimentation par l'intermédiaire du réfrigérant, de la soupape de réglage de la température et du filtre double. De là l'huile alimente les différents consommateurs avant de retourner sans pression à la cuve.



Figure B.9: Système huiles de graissage

B.10 Système gasoil:

Il est utilisé comme 2éme carburant après le gaz naturel. La fonction du système est transférer le gasoil des réservoirs d'accumulation aux réservoirs journaliers. Il est constitué de 3 parties essentielles :

- ❖ Un moteur thermique équipé des systèmes mécaniques nécessaires.
- ❖ Un compresseur d'air.
- ❖ Le système de commande et de protection.

Ce groupe est utilisé en cas de rupture de tous les systèmes de transformation.

B.11 Système d'échappement:

Le système d'échappement de la TAG comprend quatre ensembles principaux :

- ❖ Le diffuseur.
- ❖ La partie inférieure de la cheminée.
- ❖ La partie supérieure de la cheminée.
- ❖ Le cadre de support.



Figure B.11: Système d'échappement de la centrale

- ✓ **Le diffuseur :** C'est un organe de construction mécano-soudée, il est calorifugé à l'intérieur. Les dilatations thermiques entre la turbine et le diffuseur sont absorbées par un joint de dilatation thermique installée entre l'échappement de la turbine et l'entrée du diffuseur.

- ✓ **Cadre de support:** le cadre de support est une construction métallique supportant la charge de la partie supérieure de la cheminée.

B.12 Système anti-pompage:



Figure B.12: système anti-pompage.

Le compresseur axial de la TAG est conçu pour fonctionner à la vitesse nominale du groupe turboalternateur. Si la vitesse tombe au-dessous de 95% de la vitesse nominale pendant la marche en puissance, ceci entraine l'ouverture complète ou partielle des clapets de décharge provoquent ainsi une baisse de la puissance et du rendement de la TAG.

Le système anti-pompage est activé automatiquement si nécessaire, et des soupapes de purges sont installées dégageant le flux instables à l'échappement de la turbine.

B.13 Système de virage:

En cas de mise à l'arrêt de la turbine, le système contient un moteur hydraulique fixé par bride à l'avant de l'alternateur. Son rôle est de faire tourner le rotor de la turbine à gaz après la mise à l'arrêt, afin d'éviter un refroidissement inégal qui entrainerait une déformation de l'arbre. Une vitesse minimale est requise pour engendrer dans les paliers un coin d'huile capable de supporter la charge du rotor et d'empêcher tout frottement semi fluide. Le vireur fonctionne avec de l'huile de graissage fournie par la pompe de soulèvement.
Un virage de secours est possible en cas d'indisponibilité du vireur.

B.14 Instrumentation de la TAG:

- ✓ **Mesure de la vitesse:**

La TAG est conçu pour fonctionner en régime établi, Au-delà d'une certaine limite, l'arrêt d'urgence est déclenché immédiatement. Pour empêcher cela, des capteurs de vitesse

détectent les changements intervenant dans le champ magnétique, les signaux de sortie sont traités par le système de protection contre la sur vitesse.

- ✓ **Mesure des vibrations des corps:**

  Les vibrations du corps sont mesurées sur les paliers de la TAG et du compresseur par des capteurs de vibration. Elle est calculée à partir de chaque signal enregistré par les capteurs, alors que le mouvement vibratoire effectif est calculé par une unité de traitement des signaux.

- ✓ **Surveillance des flammes:**

Les flammes de combustion sont surveillées par deux système comprenant chacun plusieurs détecteurs de flamme et un module analogique associé. Les rayonnements émis par les flammes sont détectés par des détecteurs, qui sont placés en léger décalage les uns par rapport aux autres sur le périmètre de la chambre de combustion.

- ✓ **Températures des gaz d'échappement de la turbine:**

Les signaux de températures ont deux fonctions différentes:

- Une fonction de régulation de la température dans la zone de réaction de la chambre de combustion.
- une fonction de protection.

En cas de défaillance du système de régulation de la température, le système de protection déclenche l'arrêt d'urgence de la turbine, empêchant ainsi un fonctionnement à des températures trop élevées, qui serait susceptible d'endommager la turbine.

Bibliographie

Bibliographie

[1] ENSPM Formation Industrie - IFP Training. Machines Tournantes : turbines à gaz technologie et fonctionnement. 2005.

[2] https://www.techno-science.net/definition/262.html.

[3] KAKI Mohammed, Etude des vannes de gaz de turbine à gaz MS5002C, Mémoire MASTER PROFESSIONNEL, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2016.

[4] Cla, Les compresseurs [en ligne] (page consultée le 22/05/2019) http://cla.vidal.free.fr/compr.htm.

[5] https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/chambres-combustion.html

[6] GE oil & gas - Nuovo Pignone. Manuel de formation pour la conduite et l'entretien d'une turbine a gaz MS 5002 C.

[7] Total. Exploration et Production Les Équipements Les Turbines. 2007.

[8] Manuel de constructeur : station de compression et de réinjection sud.

[9] Documentation SONATRACH : formation et maintenance.

[10] https://books-library.online/free-357149405-download.

[11] BENIDIR ABEDLAALI, Calcul énergétique de l'installation hybride thermique pour la production d'électricité, Mémoire MASTER, Université de Biskra, Juin 2013.

[12] HATHAT Abdelkader et DEBLAOUI Hicham, Etude analytique FMD d'une turbine DR990, Mémoire MASTER PROFESSIONNEL, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 07/06/2015.

[13] André LALLEMAND, 1195, "Production d'énergie électrique par centrales thermiques", Techniques de l'Ingénieur, D 4 002, pp.1-11.

[14] B.Walid, « Etude de l'influence de l'injection de la vapeur d'eau et du refroidissement de l'air d'admission dans une turbine à gaz ».mémoire de fin d'étude de master en département mécanique, Université de Blida, (2017).

[15] BELHADJ Abdelhak, Simulation numérique de la combustion dans une chambre de combustion d'une turbine à gaz MS 5002 C, Mémoire MASTER, Université de Biskra, 2014.

[16] TadjerAmira « contribution a l'amélioration des performances de la turbine à gaz», Mémoire de mise en situation professionnel 2017, Institut Algérien de Pétrole.

[**17]** Aissani, A. (1992) Modèles stochastiques de la théorie de la fiabilité, OPU, Alger.

[18] Pages, A., Gondran, M. (1980) Fiabilité des systèmes, Eyrolles, Paris.

[19] Cours : sureté de fonctionnement, Université Kasdi Merbah Ourgla.

[20] Chahboune, S. et Hammou, R. **«**Etude de la fiabilité et de la disponibilité des équipements au niveau de l'entreprise MAC-SOUM **»**Thèse de Master, Université Abderrahmane MIRA - Bejaïa, 2016.

[21] BENNECIB SOFIANE « étude analytique FMD d'un BANC d'épreuve 500 » mémoire de master de génie mécanique, université BADJI MOKHTAR ANNABA, 14/06/2017.

[22] https://www.umc.edu.dz/images/cours/polycopi%20FMD%202013.pdf.

[23] http://www.jybaudot.fr/Stats/fiabilite.html.

[24] HALIMI DJAMEL « Contribution à l'amélioration de la maintenance préventive des machines dynamiques dans l'industrie des hydrocarbures **»** Thèse Doctorat de Génie Mécanique, université M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, 2013/2014.

[25] Rhazali, K. «Optimisation de la disponibilité des systèmes multi-Etats **»** Ingénieur d'Etat à l'université Moulay Ismail, Maroc. 2015.

[26] ZOUAIRI SAIM « Approche Bayésienne pour la Sûreté de Fonctionnement de la chaudière N°2 du Complexe GNL4Z **»** Thèse de Magister en Sciences des

Risques et Matériaux, université d'Oran, 17/03/2009.

[27] Bradt, D. (1997) Use reliability, availability and maintainability techniques to optimize system operation. *Hydrocarbon Processing,* 63-65.

[28] Ainouche, A. et Smati, A. (2000) Global optimization of the Algerian gas pipeline network. *Proc. 16th WPC*, Calgary, Canada.

[29] AHMED BELLAOUAR et SALIMA BELEULMI « FIABILITE MAINTENABILITE DISPONIBILITE **»** polycopié de génie des transports, université CONSTANTINE 1, décembre 2013.

[30] SEMOUHI Laid et GEURMIDA BOUDJEMAA et FERHAT Ahmed « étude de maintenance d'une turbine à gaz «MS 5002D» **»** mémoire de fin d'études en génie électromécanique université de M'SILA, 2011 / 2012.

[31] https://www.uptime.ac/resources/taux-de-disponibilite/#:~:text=Ainsi%2C%20le%20taux%20de%20disponibilit%C3%A9,o%C3%B9%20il%20est%20en%20panne.

[32] SAIDI, **M.** Etude de la fiabilité et de la maintenance de la station de pompage Beni Mansour « Sonatrach » Thèse de Master en Génie Mécanique, Université A.MIRA de Bejaia, 2015.

[33] Dr. Awad Allah Taifour Ali, fuzzy control Systems, Professeur agrégé Département de génie électrique /Collège d'ingénierie - Université soudanaise des sciences et de la technologie/ e-mail: awadallatayfor@sustech.edu ayha_114@yahoo.com /awadallataifourali@gmail.com / Web page: http://staff.sustech.edu/awadallatayfor/

[34] https://elearn.univ-ouargla.dz/2013 2014/courses/INTRODUCTIONAUXMETHO/document/CH_1.pdf?cidReq=INTRODUCTIONAUXMETHO.

[35] MLLE BENCHARIF FARAH NEZHA, thème : '' Evaluation du risque d'accident vasculaire cérébral à l'aide de la logique floue'', mémoire de master, université ABOU BAKR BELKAID– Tlemcen Faculté des Sciences, 2013-2014

[36] Benoît Potvin _ Équipe de Recherche en Ingénierie des Connaissances (ERICAE) Université Laval décembre 2002.

[37] Mr BELOUFA FAYSSAL, thème : « Conception d'un classifeur à base des règles floues », thèse DOCTORAT, université : ABOU-BEKR BELKAID TLEMCEN, 17/12/2016 à Tlemcen.

[38] http://thesis.univ-biskra.dz/1089/8/Chapitre%2006.pdf

[39] FRANCK DERNONCOURT, thème : La Logique Floue : entre raisonnement humain et intelligence artificielle, CogMaster Mémoire de FCS2, Paris, Janvier 2011.

[40] Mr. BRAHAMI Mohamed et Mr. ZIANE Bilal, Thème : « Commande basée sur la passivité adaptative par la logique flou d'un moteur synchrone à aiment permanents », mémoire de master en électronique, université : Abderrahmane MIRA BEJAIA ,2014.

[41] TALBI NESRINE, Thème : « Conception des Systèmes d'Inférence Floue par des Approches Hybrides : Application pour la Commande et la Modélisation des systèmes Non linéaires », thèse Doctorat en science, université de Constantine 1 ,25 /02 / 2014.

[42] http://www8.umoncton.ca/umcm cormier_gabriel/Asservissements/GELE5313_Notes11.pdf.

[43] FODIL MALIKA, Thème : « Commande par logique floue type -2-appliquée à la machine asynchrone », mémoire de master en électronique, université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, JUIN 2016.

[44] MOKEDDEM DIAB, Thème : « Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base d'Algorithmes Génétiques », thèse de Doctorat En Sciences en Électronique, université FERHAT ABBAS DE SETIF, 11 juillet 2010.