



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

GENERAL ELECTRIC



Département Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

---

***Investigation et amélioration de maintenance du système d'admission d'air de la turbine à gaz 9FA de la centrale électrique Boufarik II***

---

*HIMEUR YAHIA*

Présenté et soutenu publiquement le 06/07/2023 :

**Composition du Jury :**

Président	M. BENKOUSSAS Bouzid	Professeur	ENP
Promoteur	M. SAIDI Djamel	MCB	ENP
Co-Promoteur	M. SAHLI Imed	Ingénieur	GE
Examineur	M. BENBRAIKA Mohamed	MAA	ENP





المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

GENERAL ELECTRIC



Département Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

---

***Investigation et amélioration de maintenance du système d'admission d'air de la turbine à gaz 9FA de la centrale électrique Boufarik II***

---

*HIMEUR YAHIA*

Présenté et soutenu publiquement le 06/07/2023 :

**Composition du Jury :**

Président	M. BENKOUSSAS Bouzid	Professeur	ENP
Promoteur	M. SAIDI Djamel	MCB	ENP
Co-Promoteur	M. SAHLI Imed	Ingénieur	GE
Examineur	M. BENBRAIKA Mohamed	MAA	ENP

## ملخص

يهدف هذا المشروع إلى تحديد الأسباب الرئيسية لمشكلة نظام السحب الهوائي في محطة توليد الكهرباء بوفاريك ابي في إطار أكبر عقد في تاريخ جنرال إلكتريك مع شركة سونلغاز. يعد العمل السليم لنظام السحب الهوائي أمرًا بالغ الأهمية لضمان أداء مثالي للتوربينة الغازية. من أجل تحديد أسباب هذه المشكلة، قمنا بإجراء فحص للمحطة واستخدمنا مجموعة متنوعة من أساليب التحليل مثل الـ 5 لماذا، ورسم إيشيكافا، وتحليل أوضاع الفشل وآثارها وأهميتها، بالإضافة إلى تحليل الموثوقية وسهولة الصيانة والتوفر. من خلال هذه الأساليب، تمكنا من تحديد الأسباب الجذرية للمشكلة، مثل أخطاء تركيب الفلاتر ونقص في الفاصل الختم. بالإضافة إلى ذلك، قمنا بتقييم موثوقية النظام، والتي تبين أنها 38%.  
**الكلمات الرئيسية:** توربينات الغاز، نظام الترشيح، مُصْفِي الهواء، الصيانة

## Abstract

This project aims to identify the main causes of the problem in the air intake system of the Boufarik II power plant, as part of the largest contract in the history of General Electric with SPE Sonelgaz.

The proper functioning of the air intake system is crucial for optimal performance of the gas turbine. In order to identify the causes of this problem, we conducted an inspection of the power plant and used various analysis methods such as the 5 Whys, the Ishikawa diagram, the AMDEC, as well as reliability, maintainability, and availability analysis.

Through these methods, we were able to identify the root causes of the problem, such as errors in filter installation and a lack of sealing joints. Additionally, we evaluated the reliability of the system, which was found to be 38%.

**key words :** gas turbine, filtration system, maintenance, air filtre.

## Résumé

Ce projet a pour objectif d'identifier les principales causes du problème du système d'admission d'air de la centrale électrique Boufarik II, dans le cadre de l'exécution du plus grand contrat de l'histoire de General Electric avec SPE Sonelgaz.

Le bon fonctionnement du système d'admission d'air est essentiel pour assurer un rendement optimal de la turbine à gaz. Afin d'identifier les causes de ce problème, nous avons réalisé une inspection de la centrale, ensuite, nous avons utilisé diverses méthodes d'analyse telles que les 5 Whys, le diagramme d'Ishikawa, l'AMDEC, ainsi que l'analyse de la fiabilité, de la maintenabilité et de la disponibilité.

Grâce à ces méthodes, nous avons pu identifier les causes profondes du problème, telles que les erreurs d'installation des filtres et le manque des joints d'étanchéité. De plus, nous avons évalué la fiabilité du système, qui s'est avérée être de 38%.

**Mots clés :** turbine à gaz, système de filtration, maintenance, filtre à air.

# Dédicace

*J'ai dédié ce travail*

*À mes parents qui ont toujours redoublé d'efforts pour me voir réussir, à qui je témoigne ma plus profonde reconnaissance.*

*À ma Sœur et mes frères qui m'ont toujours épaulé, et qui m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.*

*À mes amis Islam, Massyl, Ayoub, Anis et younes, avec qui j'ai passé les meilleurs moments de ma vie.*

*À ma très chère amie Lamia, merci d'être toujours présente et de rendre ma vie plus belle.*

*Aux étudiants de troisième année Génie Mécanique promo 2023, pour tous les moments que nous avons partagés ces trois dernières années, ce fut un plaisir.*

*À moi même.*

*Merci de m'avoir aidé et d'être toujours là pour moi.*

# Remerciements

*J'adresse mes sincères remerciements et ma franche reconnaissance à mon encadrant, M. SAIDI Djamel , pour sa patience, ses conseils avisés, son encadrement, son assistance et son soutien pendant toute la période du stage mais également tout au long de mon cursus au sein du département.*

*Je remercie particulièrement M. BENKOUSSAS Bouzid qui me fait l'honneur de présider ce jury, ainsi que M. BENBRAIKA Mohamed d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Je tiens également à remercier mes encadrants en entreprise, M. SAHLI Imed, M. TERRAB Hocine et Mme. KHAMMAR Wafaa, pour leurs disponibilité, encouragement et bienveillance.*

*J'exprime ma profonde gratitude à mes enseignants du département Génie Mécanique et des classes préparatoires, pour les connaissances qu'ils m'ont inculquées et leur accompagnement tout au long de ma formation, plus particulièrement M. BELKACEMI Yacine, M. GUERGUEB Brahim, M. RECHAK Said et Mme. MAHFOUD Mouna.*

*Je ne saurais oublier l'apport de mes enseignants préuniversitaires et leur faveur, particulièrement M. MEFTI Sofiane, à qui j'adresse mes sincères remerciements.*

*Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles et abréviations

<b>Introduction générale</b>	<b>12</b>
<b>1 Etat des lieux et problématique</b>	<b>14</b>
1.1 Introduction . . . . .	15
1.2 Aperçu général sur General Electric . . . . .	15
1.2.1 General Electric . . . . .	15
1.2.2 GE Power . . . . .	15
1.2.3 General Electric en Algérie . . . . .	16
1.2.4 GE Power Services en Algérie . . . . .	16
1.2.5 Clients de General Electric . . . . .	16
1.3 Aperçu général sur Sonelgaz . . . . .	17
1.3.1 Groupe Sonelgaz . . . . .	17
1.3.2 Société algérienne de Production d'Electricité (SPE) . . . . .	18
1.3.3 Organisation et missions de SPE . . . . .	18
1.4 Aperçu général sur la centrale électrique Boufarik II . . . . .	19
1.4.1 Présentation de la centrale . . . . .	19
1.4.2 Construction et mise en service de la centrale électrique BOUFARIK II . . . . .	20
1.4.3 Missions de la centrale . . . . .	20
1.5 Description et fonctionnement des principaux organes de la centrale . . . . .	21
1.5.1 Système d'admission d'air . . . . .	21
1.5.2 Compresseur . . . . .	21
1.5.3 Système de combustion . . . . .	23
1.5.4 Turbine . . . . .	24
1.5.5 Alternateur . . . . .	25
1.6 Description et fonctionnement des équipements auxiliaires de la centrale . . . . .	28
1.6.1 Aéro-réfrigérant . . . . .	28
1.6.2 Compartiment des auxiliaires turbine . . . . .	28
1.6.3 Poste gaz (AKFEL) . . . . .	30
1.6.4 Transformateur (BEST) . . . . .	31
1.6.5 Diesel de secours . . . . .	33
1.6.6 Distribution électrique . . . . .	33
1.6.7 Poste H.T . . . . .	34
1.6.8 Station de traitement d'eau . . . . .	34
1.7 Formulation de la problématique . . . . .	34

1.8	Conclusion . . . . .	34
<b>2</b>	<b>Le système d'admission d'air et son importance pour une turbine à gaz</b>	<b>35</b>
2.1	Introduction . . . . .	36
2.2	Rôle protecteur du système d'admission d'air pour l'installation . . . . .	36
2.3	Conséquences d'une mauvaise filtration d'entrée . . . . .	37
2.3.1	Les dommages causés par des corps étrangers . . . . .	37
2.3.2	L'érosion . . . . .	37
2.3.3	L'encrassement . . . . .	38
2.3.4	La corrosion . . . . .	38
2.4	Caractéristiques de filtration . . . . .	40
2.4.1	Mécanismes de filtration . . . . .	40
2.4.2	La perte de pression . . . . .	41
2.4.3	Le chargement des filtres . . . . .	41
2.5	Composants d'un système de filtration . . . . .	41
2.5.1	Les hottes anti-intempéries . . . . .	41
2.5.2	Protection anti-givrage . . . . .	42
2.5.3	Séparateurs inertiels . . . . .	43
2.5.4	Coalesceurs d'humidité . . . . .	43
2.5.5	Préfiltres . . . . .	44
2.5.6	Filtres à haute efficacité . . . . .	45
2.5.7	Filtres autonettoyants . . . . .	46
2.5.8	Filtres à bain d'huile . . . . .	47
2.5.9	Filtration par étapes . . . . .	47
2.6	Conclusion . . . . .	48
<b>3</b>	<b>Inspection de la centrale</b>	<b>49</b>
3.1	Introduction . . . . .	50
3.2	Inspection de la centrale . . . . .	50
3.2.1	Composants du système d'admission d'air de la centrale . . . . .	50
3.2.2	Observations relatives aux parties amont des cartouches (coté sale) . . .	50
3.2.3	Observations relatives aux parties aval des cartouches (côté propre) . . .	51
3.2.4	Système de nettoyage automatique des cartouches . . . . .	52
3.3	5 Whys . . . . .	53
3.3.1	Définition . . . . .	53
3.3.2	Principe de la méthode des 5 Whys . . . . .	53
3.3.3	Avantages de la méthode des 5 Whys . . . . .	53
3.3.4	Identification des causes des problèmes . . . . .	55
3.4	Diagramme d'Ishikawa . . . . .	57
3.4.1	Définition . . . . .	57
3.4.2	Principe . . . . .	57
3.4.3	Classification des causes des problèmes . . . . .	58
3.5	AMDEC . . . . .	61
3.5.1	Définition . . . . .	61
3.5.2	AMDEC machine . . . . .	61
3.5.3	Tableau de criticité . . . . .	62
3.5.4	Analyse des modes de défaillance . . . . .	63
3.6	Concept FMD . . . . .	64
3.6.1	La fiabilité du système . . . . .	64
3.6.2	La maintenabilité du système . . . . .	68

3.6.3	La disponibilité de la machine . . . . .	68
3.6.4	Etude de fiabilité du système . . . . .	69
3.6.5	Etude de la maintenabilité de système . . . . .	77
3.6.6	Etude de la disponibilité du système . . . . .	77
3.7	Interprétations des résultats obtenus . . . . .	78
3.8	Conclusion . . . . .	79
	<b>Conclusion générale</b>	<b>80</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>82</b>

# Table des figures

1.1	Organigramme de la filiale SPE . . . . .	19
1.2	La centrale électrique de BOUFARIK II. . . . .	20
1.3	Compartiment du filtre d'admission . . . . .	21
1.4	Ensemble du rotor du compresseur . . . . .	22
1.5	Injecteurs de chambre de combustion . . . . .	23
1.6	Rotor de turbine 9FA . . . . .	24
1.7	Structure du stator . . . . .	25
1.8	Spires terminales de l'enroulement du stator . . . . .	26
1.9	Système de ventilation . . . . .	26
1.10	Rotor assemblé . . . . .	27
1.11	Aéro-réfrigérant . . . . .	28
1.12	Transformateur LCI . . . . .	29
1.13	Pompe de graissage 88QA-1 . . . . .	30
1.14	Pompe de graissage 88QA-2 . . . . .	30
1.15	Poste gaz (AKFEL) . . . . .	30
1.16	Transformateur principale . . . . .	32
1.17	Transformateur de soutirage . . . . .	32
1.18	Transformateur MTBT . . . . .	32
1.19	Diesel de secours . . . . .	33
2.1	Dommmages aux turbines à gaz causés par FOD . . . . .	37
2.2	Erosion sur le bord d'attaque d'une pale de turbine . . . . .	38
2.3	Défaillance due à la corrosion chaude . . . . .	39
2.4	Les mécanismes de filtration . . . . .	40
2.5	Les hottes anti-intempéries . . . . .	42
2.6	Filtres à cartouche à impulsions avec formation de givre . . . . .	43
2.7	Coalesceur d'humidité . . . . .	44
2.8	Filtre à sac . . . . .	44
2.9	Les filtres rectangulaires à haute efficacité . . . . .	45
2.10	Les filtres à cartouche à haute efficacité . . . . .	46
2.11	Fonctionnement d'un filtre autonettoyant . . . . .	47
2.12	Système de filtration à plusieurs étages . . . . .	48
3.1	Les vides entre les coalesceurs . . . . .	50
3.2	Des impuretés déposées sur les surfaces de filtres . . . . .	51
3.3	Les dépôts de poussière observés sur les faces des cartouches . . . . .	51
3.4	Les impuretés présentes sur le côté propre . . . . .	52
3.5	Les gouttelettes d'eau présentes dans le côté propre . . . . .	52
3.6	Les gouttelettes d'huile déposées sur les filtres . . . . .	52
3.7	Diagramme d'Ishikawa . . . . .	58
3.8	Les problèmes liés à la main d'œuvre . . . . .	58

3.9	Les problèmes liés à la méthode . . . . .	59
3.10	Les problèmes liés au milieu . . . . .	59
3.11	Les problèmes liés à la matière . . . . .	60
3.12	Les problèmes liés au matériel . . . . .	60
3.13	Papier de Weibull . . . . .	65
3.14	La variation de taux de défaillance en fonction de temps et de paramètre de forme	66
3.15	La variation de taux de défaillance en fonction de temps . . . . .	66
3.16	Tableau des paramètres de weibull . . . . .	67
3.17	Nuage des points . . . . .	70
3.18	La droite de Weibull . . . . .	70
3.19	La variation de la fiabilité en fonction du temps . . . . .	73
3.20	Nuage des points . . . . .	73
3.21	La droite de Weibull . . . . .	74
3.22	Détermination des paramètres de la loi . . . . .	74
3.23	La variation de la fiabilité en fonction du temps . . . . .	76

# Liste des tableaux

3.1	Application de la méthode des 5 Whys . . . . .	55
3.2	Les grilles de cotation de F, G et N . . . . .	62
3.3	Niveau de criticité . . . . .	63
3.4	Application de la méthode AMDEC . . . . .	63
3.5	Les TBF du système . . . . .	69
3.6	Les TBF du système classés par ordre croissant . . . . .	69
3.7	Les TTR du système . . . . .	77
3.8	Principaux résultats . . . . .	78

# Liste des symboles et abréviations

## Lettres grecques

$\beta$	Paramètre de forme
$\eta$	Paramètre d'échelle
$\gamma$	Paramètre de position
$\lambda$	Taux de défaillance
$\sigma$	L'écart type
$\mu$	Taux de réparation

## Abréviations

ALGESCO	Algerian Engineering Services Company
APE	Amélioration des Performances de l'Elément
CSA	Contractual Service Agreement
CT	Contrat Transactionnel
EPA	Efficiency Particulate Air
FOD	Foreign Object Damage
GE	General Electric
GEAT	General Electric Algeria Turbines
GEH	General Electric Hitachi Nuclear Energy
HEPA	High Efficiency Particulate Air
IGV	Inlet Guide Vane
WPP	Integrated Water Power Plant
MMP	Multi-year Maintenance Program
MPS	Maintenance Préventive Systématique
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	Mean Time To Repair
SPE	Société de Production d'Electricité
STAG	Steam And Gas
TBF	Time Between Failures
TG	Turbine à Gaz
TTR	Time To Repair
TV	Turbine à Vapeur
ULPA	Ultra Low Penetration Air

# Introduction générale

Le secteur de l'énergie est d'une importance cruciale pour le développement économique et social de tous les pays. Les centrales électriques jouent un rôle essentiel en fournissant une source d'énergie fiable pour répondre aux besoins croissants de la population. Toutefois, pour assurer un fonctionnement optimal de ces installations, une maintenance régulière et une surveillance constante sont nécessaires.

Dans ce contexte, le système d'admission d'air des centrales électriques revêt une importance particulière. Il est chargé d'acheminer une quantité importante d'air ambiant vers les turbines à gaz, qui constituent le cœur du processus de production d'électricité. Cependant, l'air ambiant peut contenir divers contaminants qui peuvent compromettre les performances et la durabilité du système.

Les filtres jouent donc un rôle crucial dans la protection des composants des turbines à gaz des centrales électriques. Ils sont conçus pour éliminer efficacement les contaminants présents dans l'air ambiant, garantissant ainsi un air propre et de qualité pour les turbines à gaz. La sélection, l'installation et l'entretien adéquats des filtres sont donc essentiels pour assurer un fonctionnement optimal du système d'admission d'air.

Dans ce mémoire, nous nous concentrons spécifiquement sur le système d'admission d'air de la centrale électrique Boufarik II. L'objectif principal est d'identifier les différentes causes et sources des problèmes rencontrés par ce système.

Dans le premier chapitre, nous aborderons un aperçu général de l'entreprise General Electric et de l'entreprise nationale de l'électricité Sonelgaz ainsi qu'un descriptif détaillé de la centrale électrique de Boufarik II et de ses composants. Ensuite, nous allons formuler la problématique et l'objectif de ce projet.

Le deuxième chapitre se concentre sur les filtres en tant que composants clés du système de filtration de l'air d'admission. Il examine le rôle protecteur de ces filtres pour l'installation, les conséquences d'une mauvaise filtration et les différents composants d'un système de filtration.

Le troisième chapitre présente une inspection du système d'admission d'air de la centrale ainsi que la théorie et l'application des méthodes des 5 Whys, le diagramme d'Ishikawa et l'AMDEC, ainsi que les concepts de la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité. Ces outils nous aident à identifier les causes profondes des problèmes, à évaluer les risques et à mesurer la fiabilité globale du système.

La conclusion de ce mémoire est une synthèse qui met en évidence les principaux éléments et résultats obtenus dans l'étude du système d'admission d'air de la centrale électrique Boufarik II. A travers cette recherche, nous déterminons les différentes causes des problèmes rencontrés par le système en se basant sur les différentes méthodes.

# Chapitre 1

## Etat des lieux et problématique

## 1.1 Introduction

Ce chapitre nous offre une vue d'ensemble sur les entreprises General Electric, Sonelgaz ainsi que la centrale électrique Boufarik II. Tout d'abord, nous explorons l'entreprise multinationale General Electric, en examinant ses services, ses clients et sa présence en Algérie. Ensuite, nous nous tournons vers Sonelgaz, la société énergétique nationale de l'Algérie, en nous intéressant à ses missions et à son rôle dans la production d'électricité. Nous poursuivons en présentant la centrale électrique de Boufarik II, en mettant l'accent sur sa construction, sa mise en service et ses missions ainsi que ses composants principaux et auxiliaires. Enfin, nous formulons la problématique pour mettre en évidence les défis spécifiques auxquels le système d'admission d'air de la centrale est confronté.

## 1.2 Aperçu général sur General Electric

### 1.2.1 General Electric

GE est un conglomérat américain né en 1892 de la fusion de l'Edison General Electric Company et Thomson-Houstons Electric Company. Le conglomérat englobait des entreprises opérant dans différents secteurs à savoir : GE Additive, GE Aviation, GE Capital, GE Digital, GE Healthcare, GE Power, GE Renewable Energy et GE Research.

En 2021, GE a décidé de concentrer son activité dans l'aviation, l'électricité, les énergies renouvelables et l'industrie numérique dans l'optique de se diviser en trois sociétés indépendantes qui seront respectivement axées sur l'aviation, l'énergie et le Healthcare. GE est implanté dans 130 pays, employant 225,000 employés et réalise un chiffre d'affaires de 74.2 milliards de dollars en 2021 [1].

### 1.2.2 GE Power

Selon la référence [1], GE Power (anciennement connu sous le nom de GE Energy) est une entreprise américaine de technologie énergétique, détenue par GE. En 2018, les unités produites par GE ont été responsables de la production d'un tiers de l'électricité mondiale. A son tour, GE Power comporte plusieurs divisions à savoir :

- **GE Gas Power** : Cette division fournit des turbines à gaz, assure la fourniture de leurs pièces de rechange ainsi que leurs maintenances. Il s'agit de la seule division de GE Power présente en Algérie.
- **GE Steam Power** : Cette division fournit des turbines à vapeur. GE Steam Power couvre le tiers des capacités installées des turbines à vapeur et la moitié des turbines à vapeur nucléaires à travers le monde.
- **GE Power Conversion** : La division GE Power Conversion contribue à la transformation électrique de l'infrastructure énergétique mondiale. Elle sert des secteurs spécialisés tels que l'énergie et la marine.
- **GE Energy Consulting** : Cette division fournit des services de conseil en énergie afin de contribuer à faire évoluer les systèmes d'énergie électrique vers plus d'accessibilité, de fiabilité et d'efficacité grâce à des solutions technico-économiques.
- **GE Hitachi Nuclear Energy** : GE Hitachi Nuclear Energy (GEH) est un fournisseur de réacteurs avancés et de services nucléaires né d'une alliance entre GE et Hitachi.

### 1.2.3 General Electric en Algérie

Selon la référence [1], En Algérie, GE est présente par ses deux entités : GE Power et GE Healthcare. Pendant sa présence, GE s'est associé avec des partenaires pour la création de :

- **GEAT** : General Electric Algeria Turbines (GEAT) est un partenariat entre GE (49%) et Sonelgaz (51%) pour la fabrication de turbines à gaz, turbines à vapeur, alternateurs et systèmes de contrôle commande. Le complexe industriel est situé à Ain Yagout (Batna) et s'étend sur une superficie de 20 hectares.
- **ALGESCO** : Algesco est un partenariat entre GE, Sonatrach et Sonelgaz. Il s'agit d'un centre de réparation et de maintenance de turbines doté d'un centre de formation. Les capacités de réparation d'ALGESCO couvrent les turbines à gaz, à vapeur, les compresseurs centrifuges et alternatifs ainsi que les turbo-expanders. Le centre est équipé des dernières technologies en matière de revêtement, de systèmes de réparation laser et de la technologie d'usinage. Le complexe résultant d'un investissement de 36 millions de dollar couvre une surface de 18300 m<sup>2</sup> à Boufarik.

En plus de ses opérations dans le domaine de l'énergie, GE Aviation alimente la flotte d'Air Algérie depuis 25 ans et GE Healthcare est le premier fournisseur des technologies de santé avancées à la structure médicale du pays.

### 1.2.4 GE Power Services en Algérie

Selon la référence [1], GE Power Services est présente en Algérie depuis 40 ans, ses activités sont concentrées dans :

- La construction de turbomachines et stations de production d'électricité.
- La fourniture et gestion de pièces de rechanges capitales et non-capitales.
- La maintenance et l'entretien des turbines installées.
- L'assistance technique et services liés à la maintenance des installations.

GE sert ses clients à travers multiples types de contrats de maintenance en fonction du type du besoin exprimé par le client. Les contrats de maintenance peuvent prendre différentes formes. Les types de contrats les plus répandus sont cités ci-dessous :

- Contrat Transactionnel (CT) : Il s'agit d'une prestation ponctuelle en réponse à un besoin singulier exprimé par un client pour la fourniture de pièces ou une prestation de service. Ce type de contrat se distingue par un engagement de court terme.
- Multi-year Maintenance Program (MMP) : Il s'agit d'un engagement à long terme à travers lequel, le prestataire s'engage vis-à-vis du client sur les prix des pièces et des services à fournir ainsi que les délais d'exécution. En contrepartie, le client s'engage sur un volume minimum de commande durant le terme du contrat. Ce type de contrat permet de réduire les efforts administratifs et de simplifier la planification.
- Contractual Service Agreement (CSA) : Il s'agit d'un engagement à long terme où le prestataire s'engage à réaliser la fourniture de pièces et la prestation de services dans le cadre de la maintenance planifiée et non planifiée. Le prestataire prend en charge la gestion de la partie opérationnelle et partage le risque commercial du client en l'aidant à atteindre ses objectifs.

### 1.2.5 Clients de General Electric

Selon la référence [1], de par la forte diversité de ses opérations dans multiples secteurs d'activité, les clients de GE en Algérie sont nombreux. Toutefois, dans ce qui suit, nous nous étalons sur les principaux partenaires de GE dans le secteur de l'énergie, le secteur dans lequel s'inscrit notre présent travail.

## Sonelgaz

La société nationale de l'électricité et du gaz est un groupe industriel algérien. L'activité du groupe est diverse et inclut :

- En amont : l'achat, le transport, la distribution et la commercialisation de gaz naturel.
- En aval : la production, la distribution et la commercialisation de l'électricité.

En 2019, le groupe est classé troisième à l'échelle nationale en réalisant 3,38 milliards de dollars en chiffre d'affaires. En 2020, le groupe comptait 10,595,565 clients abonnés en électricité et 6,450,538 clients abonnés en gaz naturel.

## Sonatrach

Sonatrach est une compagnie pétrolière et gazière classée premier groupe d'hydrocarbures en Afrique. Le groupe a pour mission de valoriser les réserves en hydrocarbures de l'Algérie.

Les activités du groupe sont diversifiées tout au long de la chaîne de valeur. En amont l'entreprise opère des gisements pétroliers dans le Sahara algérien, elle dispose d'un réseau de canalisation qui s'étend de près de 22 000 km sur le territoire national. En aval, l'entreprise effectue le raffinage, la liquéfaction et la séparation des produits pétroliers.

Actuellement, l'entreprise emploie plus de 200000 personnes à l'échelle du groupe et compte 154 filiales et participations, dont l'entreprise Algerian Energy Company qu'elle partage avec le groupe Sonelgaz.

En 2021, l'entreprise est classée première à l'échelle africaine en réalisant 34,5 Milliards de dollars de chiffre d'affaires.

## Kahrama

Kahrama SPA désigne l'entreprise responsable du projet IWPP (Integrated Water Power Plant), complexe de dessalement de l'eau de mer et de production d'électricité se trouvant à Arzew dans la wilaya d'Oran. L'entreprise est détenue par l'Algerian Energy Company, la joint-venture entre Sonelgaz et Sonatrach.

L'unité Kahrama, inaugurée en septembre 2005, est la première installation combinant les deux activités de dessalement des eaux et de production de l'électricité à l'échelle nationale. Elle alimente en eau potable la ville d'Oran ainsi que les complexes industriels de la ville d'Arzew avec une capacité de 90000 m<sup>3</sup> d'eau quotidiennement.

Pour la production d'électricité, la centrale est dotée de trois turbines à gaz de type 9001E/DLN1.

Depuis sa création, Kahrama a étroitement collaboré avec GE. Ainsi, GE Power a fourni les trois turbines à gaz de capacités nominales de 110 MW chacune, ainsi que leurs alternateurs respectifs.

## 1.3 Aperçu général sur Sonelgaz

### 1.3.1 Groupe Sonelgaz

La société nationale de l'électricité et du gaz « Sonelgaz » est classée deuxième après Sonatrach vu sa contribution aux recettes du pays. Elle est l'un des piliers de l'économie nationale et assure les besoins du pays en électricité et en gaz naturel.

Ses missions principales sont la production, le transport et la distribution de l'électricité ainsi que le transport et la distribution du gaz par canalisations. Elle intervient aussi dans d'autres segments d'activités présentant un intérêt pour l'entreprise et notamment dans le domaine de la commercialisation de l'électricité et du gaz à l'étranger.

Depuis la promulgation de la loi sur l'électricité et la distribution du gaz par canalisations, Sonelgaz s'est restructurée pour s'adapter au nouveau contexte. Elle est, aujourd'hui, érigée en Groupe industriel composé de 40 sociétés dont 6 en participation. Elle emploie plus de 60 000 travailleurs.

La contribution de Sonelgaz dans la concrétisation de la politique énergétique nationale est à la mesure des importants programmes de réalisation en matière d'électrification rurale et de distribution publique de gaz, qui ont permis de hisser le taux de couverture national en électricité à près de 98% et le taux de pénétration du gaz à 43%

Après l'adoption de la loi n° 02-01 du 5 février 2002, et conformément aux dispositions prévues, Sonelgaz a été transformée, le 1er juin 2002, en Société par actions dotée d'une Assemblée Générale, d'un Conseil d'Administration et d'un Président Directeur Général.

Elle est devenue par la suite un groupe industriel constitué d'une maison mère et de filiales spécialisées en fonction de ses différents segments d'activité. Cette démarche a abouti à la création, depuis le 1er janvier 2004, de plusieurs filiales au sein du groupe Sonelgaz dont SPE [2].

### **1.3.2 Société algérienne de Production d'Electricité (SPE)**

La Société algérienne de Production de l'Electricité (SPE) a pour mission la production et la commercialisation de l'électricité.

Créée en Janvier 2004, elle dispose d'un parc de production d'une capacité qui totalise une puissance installée de 25GW, et emploie 3383 agents.

Elle a réalisé un chiffre d'affaires de 33,7 Milliards DA en 2009 [2].

### **1.3.3 Organisation et missions de SPE**

#### **Organisation**

La filiale est constituée d'une direction générale, de comités et de plusieurs directions, ainsi que quatre pôles chargés chacun de la gestion, la maintenance et l'exploitation d'un ensemble régional de centrales, à savoir : pôle 1 (le centre), pôle 2 (l'est) et pôle 3 (l'ouest) pour le réseau interconnecté et, pôle 4, pour les réseaux isolés sud, comme indiqué dans la figure 1.2 [2].

#### **Mission principale**

La mission principale de SPE est de produire l'électricité à partir de sources thermiques, hydrauliques, et diesel répondant aux exigences de disponibilité, fiabilité, sécurité et protection de l'environnement. Elle est également chargée de commercialiser l'électricité produite [2].

#### **Attributions**

Selon la référence [2], ses principales attributions sont :

- Décliner la stratégie du groupe pour définir les méthodes et politiques et veiller à leur application.
- Gérer les problèmes d'arbitrage entre la demande de l'opérateur système et les contraintes des pôles.
- Piloter la dynamique de progrès et d'amélioration de la compétitivité des pôles.
- Proposer des avant-projets aux comités investissements et infrastructure pour ce qui concerne le choix des sites, la consistance et la technologie des ouvrages, les coûts et les modes de paiement.
- Veiller à l'application des consignes et des normes en matière de prévention ; hygiène, sécurité et qualité sur les chantiers.

- Participer à l'élaboration du plan de développement, animé par l'Opérateur Système, en lien avec l'Exploitation.
- Veiller à l'application stricte des règles de gestion des investissements, des commandes et des marchés et contrats

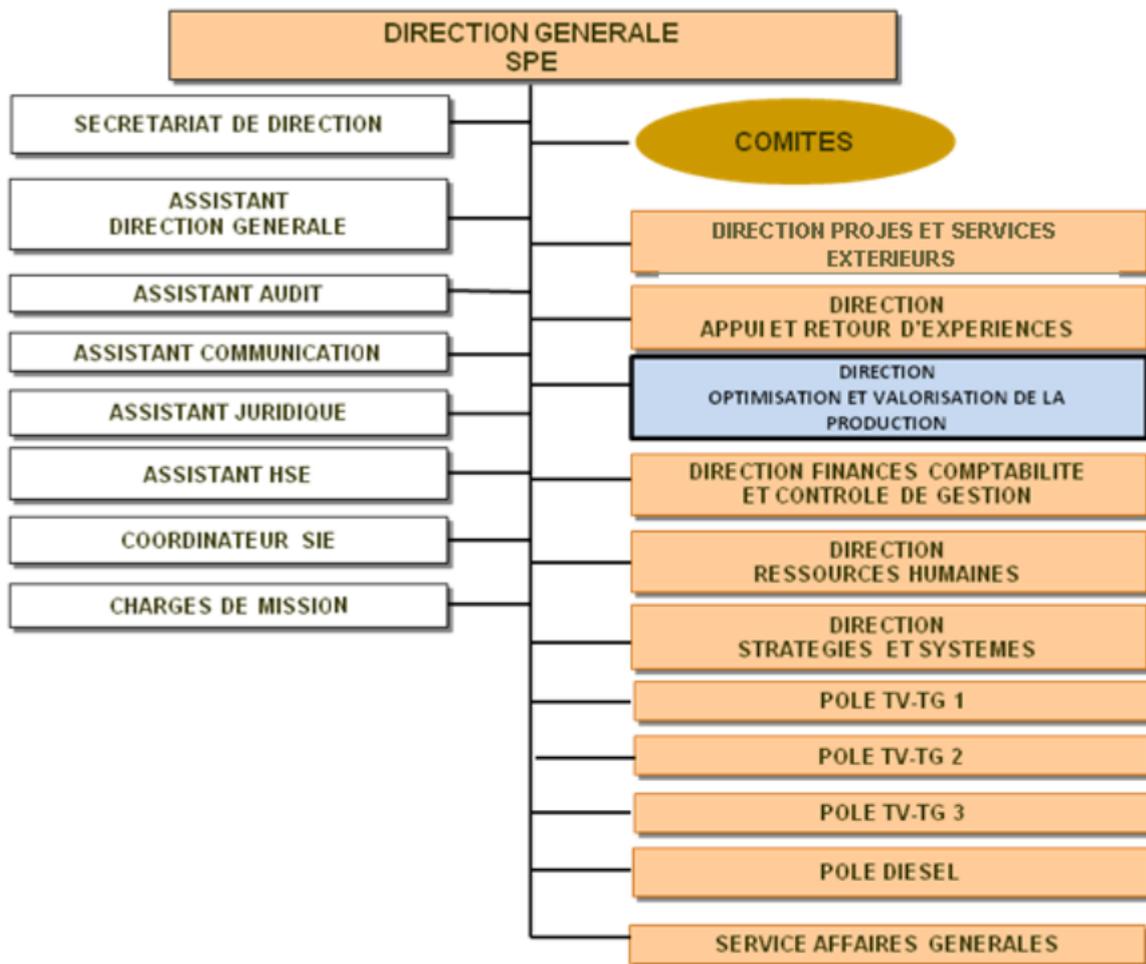


FIGURE 1.1 – Organigramme de la filiale SPE [2].

## 1.4 Aperçu général sur la centrale électrique Boufarik II

### 1.4.1 Présentation de la centrale

La centrale est construite sur une parcelle de 15 hectares, située à 30 km d'Alger, 4 km de Boufarik et 3 km de la centrale actuelle de Boufarik 1 de 100 MW, juste après l'intersection menant de l'autoroute Alger Blida vers Ben Chaâbane.

Le Projet Boufarik (wilaya de Blida), construit une centrale de turbines à gaz à cycle simple (TG) basées sur la combustion du gaz naturel dans de l'air sous pression et sur la détente des gaz chauds brûlés dans une turbine couplée à un alternateur avec une puissance globale de 704,129 MW aux bornes usine et condition du site, qui fournira de l'électricité sur le réseau algérien.

La centrale de turbines à gaz à cycle simple Boufarik est composée de trois turbines à gaz à arbre unique MS-9001FA conçue pour fonctionner dans une installation configurée en unité à cycle simple ou cycle combiné à la vapeur et au gaz (STAG) qui sont fournies par GE.



FIGURE 1.2 – La centrale électrique de BOUFARIK II.

### 1.4.2 Construction et mise en service de la centrale électrique BOUFARIK II

La centrale a été construite par le constructeur Power Engineering And Contracting GAMA (Turquie) qui a été chargé des prestations suivantes :

- La conception, l'ingénierie, l'acquisition des équipements et matériaux.
- Les travaux de génie civil.
- Le montage des équipements.
- Transports maritimes ou aériens, terrestre.
- Les essais et la mise en service.

La principale date de la mise en vigueur été le 20 octobre 2013. Et la mise en service des groupes s'est effectuée comme suit :

- Groupe 1 : couplage sur le réseau le 19/06/2016.
- Groupe 2 : couplage sur le réseau le 20/03/2016.
- Groupe 3 : couplage sur le réseau le 04/02/2016.

### 1.4.3 Missions de la centrale

La centrale de BOUFARIK de 704 MW est destinée à répondre aux impératifs suivants :

- Faire face à la demande des populations en énergie électrique et de sécuriser l'alimentation du pays à moyen et long terme.
- Assurer la fiabilité et la continuité de la qualité de service.
- Assurer la sécurité de l'alimentation en énergie électrique de la région.
- Assurer un appoint au réseau inter-connecté.

## 1.5 Description et fonctionnement des principaux organes de la centrale

### 1.5.1 Système d'admission d'air

Le compartiment des filtres d'admission d'air de la turbine à gaz sert à fournir un air propre à la turbine à gaz pour le processus de combustion. Le compartiment d'admission d'air aspire l'air de l'environnement et sa principale tâche est d'assurer que les particules de poussière importantes ne pénètrent pas dans la section d'air propre. L'air est ensuite filtré au fur et à mesure qu'il avance dans les cartouches de filtre qui sont montées à l'intérieur du compartiment. L'air propre est canalisé dans la section de transition et quitte le compartiment d'admission d'air à travers une bride de transition qui mène au système de gaine d'admission. L'air s'écoule à partir de la gaine d'admission dans le caisson d'admission et dans la turbine à gaz.



FIGURE 1.3 – Compartiment du filtre d'admission

### 1.5.2 Compresseur

#### Description du compresseur

Le compresseur est de type axial à 17 étages, le flux d'air le traverse dans le sens axial. Il aspire l'air ambiant à travers un système de filtration et le comprime successivement dans ces étages pour donner une pression finale de 10 bars. L'air fourni par le compresseur est utilisé dans le système de combustion de la turbine. Le compresseur se compose d'une partie fixe appelée stator, et d'une autre mobile appelée rotor. Un étage se compose d'un jeu d'ailettes fixes et d'un jeu d'ailettes mobiles.

#### Composants du compresseur

##### 1. Aubes variables

Le système des aubes variables a pour fonction de limiter le débit air d'entrée du compresseur au démarrage. Durant cette phase, les aubes variables sont fermées à  $21^\circ$  afin d'éliminer les vibrations qui peuvent être engendrées par les turbulences d'air du compresseur.

Ces aubes variables restent fermées pendant toute la phase de démarrage et s'ouvrent

à 95% de la vitesse nominale ( $U_N$  3000tr/min). L'ensemble du système des aubes variables est actionné par un vérin hydraulique qui est commandé automatiquement par la speed-tronic (commande électronique de la turbine).

## 2. Rotor

C'est la partie tournante du compresseur. Il est constitué d'un arbre comprenant plusieurs ensembles de roues et aubes ainsi qu'une partie de l'arbre servant de palier. Les ensembles des aubes et des roues ainsi que la partie d'arbre servant de palier sont emboîtés et boulonnés concentriquement autour de l'axe du rotor. La partie d'arbre est usinée afin de réaliser les faces d'appui avant et arrière, les surfaces d'étanchéité à l'huile du palier et l'étanchéité du compresseur. L'ensemble est équilibré dynamiquement avant d'être monté sur l'ensemble rotor-turbine.

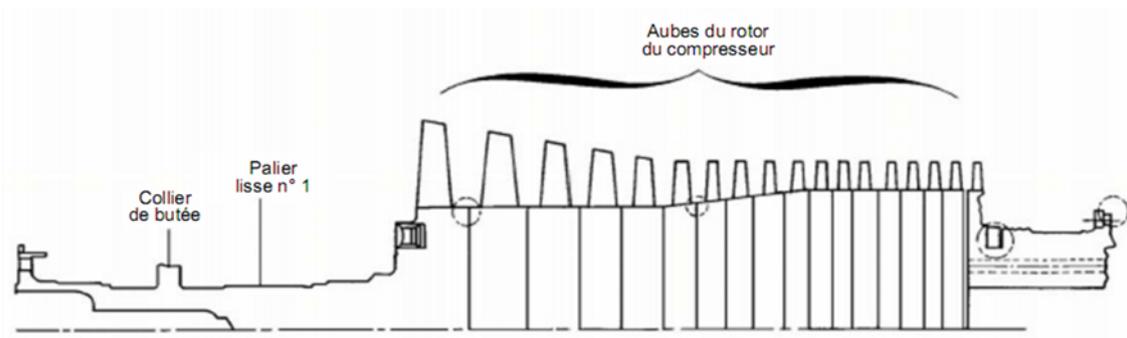


FIGURE 1.4 – Ensemble du rotor du compresseur

## 3. Corps du compresseur

Le corps du compresseur est divisé en quatre (04) parties :

- Le corps d'admission : il dirige vers les aubes variables du compresseur le flux d'air aspiré à l'entrée. Il maintient le palier et les étanchéités d'air à basse pression.
- La partie avant : située en aval de la section d'admission, elle contient les aubes du stator des étages 0 à 4. De l'air de soutirage du quatrième étage du rotor est extrait à travers quatre lumières autour de la section arrière du corps.
- La section arrière : elle est située en aval de la section avant, contient les aubes du stator des étages 5 à 12.
- La section de refoulement : elle est située en aval de la section arrière et contient les aubes du stator des étages 13 à 17.

## 4. Vannes anti-pompage

Elles sont au nombre de deux et sont disposées sur un anneau entourant la circonférence du compresseur et raccordées au soutirage du 13ème étage. Elles ont pour rôle :

- Pendant la phase de démarrage, elles sont ouvertes et évacuent une quantité d'air du compresseur à l'air libre afin d'éviter les turbulences de l'air dans le compresseur et qui peuvent générer des vibrations indésirables pour la machine (phénomène anti pompage).
- Durant la phase d'allumage, éviter le soufflage de la flamme dans les chambres de combustion en évacuant à l'atmosphère l'excès d'air dans le compresseur.

## 5. Stator

Le stator est une pièce stationnaire, fixée à l'intérieur du boîtier du compresseur. Son rôle principal est de guider et de rediriger le fluide compressé ou l'air en mouvement. Il est composé de plusieurs aubes fixes, généralement en forme de profils aérodynamiques, qui sont positionnées de manière à optimiser le flux du fluide.

Lorsque le rotor, qui est la partie mobile, tourne, il entraîne le fluide à travers les aubes

du stator. Les aubes du stator redirigent ensuite le flux de fluide ou d'air vers le rotor pour être comprimé davantage.

### 1.5.3 Système de combustion

#### Description du système de combustion

Le circuit de combustible gazeux est constitué d'un débitmètre de gaz, du compartiment de gaz combustible et de l'équipement de base de la turbine à gaz. Le compartiment de gaz combustible abrite le circuit de combustible gazeux et le système de purge du gaz.

Le rôle du système de combustible gazeux est d'assurer un débit précis et constant de combustible gazeux ainsi que le contrôle de la répartition des débits vers le système DLN-2,6+ d'injection à plusieurs flux. Il offre également une isolation sûre et fiable par rapport à la source de gaz combustible.

#### Organes de système de combustion

##### 1. Injecteur

Cinq ensembles d'injecteurs de carburant extérieurs entourent un ensemble d'injecteur de carburant central dans chaque chambre de combustion. Les injecteurs de carburant extérieurs sont équipés de passages pour le gaz de diffusion et le gaz pré-mélangé alors que l'injecteur de carburant central n'utilise que le gaz pré-mélangé.

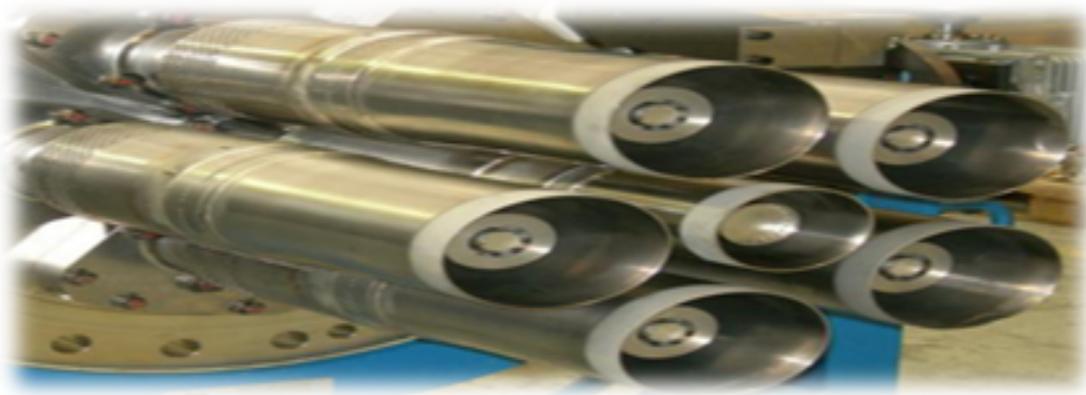


FIGURE 1.5 – Injecteurs de chambre de combustion

##### 2. Bougie d'allumage

La combustion est déclenchée par l'arc de bougies d'allumage, qui sont vissées sur les brides des chemises de combustion et centrées entre le tube de flamme et l'enveloppe intermédiaire des chambres de combustion adjacentes.

##### 3. Détecteur de flamme

Pendant la séquence de démarrage, il est essentiel qu'une indication de la présence ou de l'absence de flamme soit transmise au système de commande. Le détecteur de flamme aux ultraviolets contient un détecteur rempli de gaz. Le gaz de ce détecteur est sensible à la présence de radiations ultraviolettes émises par une flamme d'hydrocarbure.

##### 4. Tube d'interconnexion

Toutes les chambres de combustion sont interconnectées à l'aide des tubes d'interconnexion. Les chambres externes sont connectées à l'aide d'un tube d'interconnexion externe et les zones principales du tube de flamme de combustion sont connectées à l'aide de tubes d'interconnexion internes.

## 1.5.4 Turbine

### Description de la turbine

C'est au niveau de la section turbine que les gaz à haute température issus des chambres de combustion viennent se détendre produisant la puissance mécanique nécessaire pour entraîner le compresseur axial et l'alternateur. La turbine est composée d'une partie fixe (stator) et d'une partie mobile (rotor).

### Constituants de la turbine

#### 1. Rotor

le rotor est composé de 3 étages.

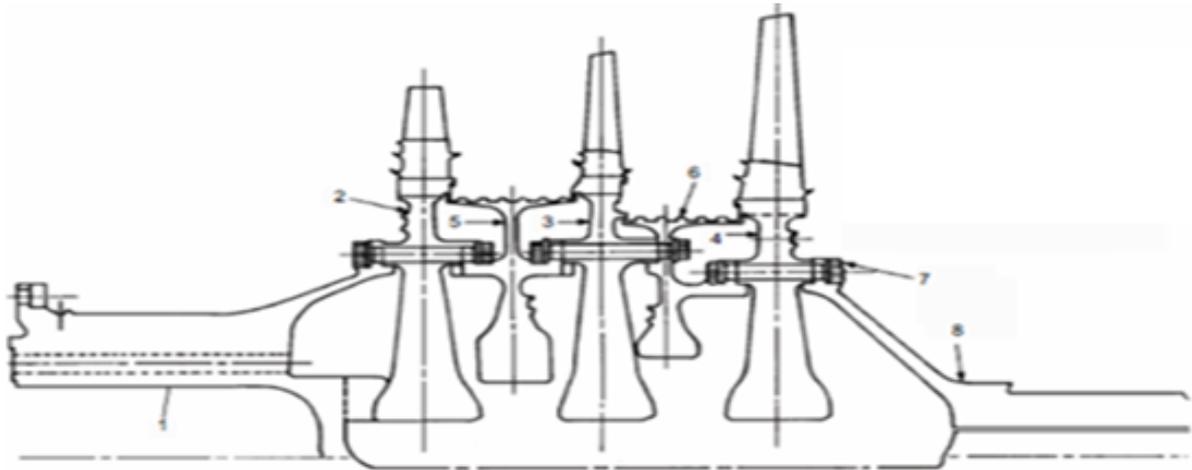


FIGURE 1.6 – Rotor de turbine 9FA

#### 2. Refroidissement

Le rotor de turbine est refroidi pour maintenir des températures de fonctionnement raisonnables et donc pour assurer une longue durée de vie à la turbine. Le refroidissement est effectué par un flux positif d'air froid prélevé sur le compresseur et déchargé radialement vers l'extérieur par un espace entre la roue de la turbine et le stator, dans le flux principal de gaz. Cette zone est appelée espace inter roues.

#### 3. Paliers

La turbine à gaz MS9001FA a deux paliers à patins oscillants en quatre éléments qui supportent le rotor de la turbine. L'unité inclut également un palier de butée pour maintenir la position axiale rotor stator. La poussée est absorbée par une butée à patins oscillants avec huit patins sur chaque côté de la butée. Les paliers et les joints sont installés dans deux logements de paliers : un au niveau du carter d'entrée et un au niveau du cadre d'échappement. Ces paliers principaux sont lubrifiés par pression à partir de l'huile fournie par le système d'huile de lubrification principal. L'huile s'écoule à travers des tubulures de dérivation vers une entrée dans chaque logement de palier.

#### 4. Accouplement de charge

Un couplage rigide, creux, relie l'arbre à l'avant du rotor du compresseur à l'alternateur. Une connexion à bride boulonnée forme le joint à chaque extrémité du couplage.

## 1.5.5 Alternateur

### Description de l'alternateur

Le turbo-alternateur refroidi à l'hydrogène est entièrement fermé pour fonctionner en utilisant l'hydrogène gazeux comme milieu de refroidissement. Le système de ventilation est une unité autonome comprenant les réfrigérants gazeux et les ventilateurs. Le champ rotatif excité séparé, actionné par la turbine, tourne à l'intérieur de l'induit stationnaire et est soutenu par des paliers situés dans les flasques montés sur le châssis de l'alternateur.

L'appareil est conçu pour fonctionner en continu, en fournissant de la puissance aux bornes d'induit, avec des dispositifs pour maintenir la pression et la pureté de l'hydrogène et fournir une alimentation en eau de refroidissement et en huile de lubrification. Les sondes de température et les autres dispositifs sont installés dans la machine et connectés à celle-ci pour permettre de mesurer les températures de l'enroulement et de l'hydrogène, ainsi que la pression et la pureté de l'hydrogène. L'alternateur est conçu pour supporter toutes les conditions normales de fonctionnement sans nuisance. Le carter du stator est conçu pour limiter les effets destructeurs d'une explosion interne d'hydrogène.

### Constitution de l'alternateur

#### 1. Structure du stator

C'est une carcasse cylindrique étanche au gaz, construit par des tôles soudées et rigidifiées à l'intérieur dans la direction radiale par des méplats et dans la direction axiale par des barres et transverses.

L'armature du stator est suspendue à la structure par des barres soudées aux plaques de la structure.

Les disques du noyau du stator sont maintenus sous pression axiale par des ailes vissées aux extrémités des barres.

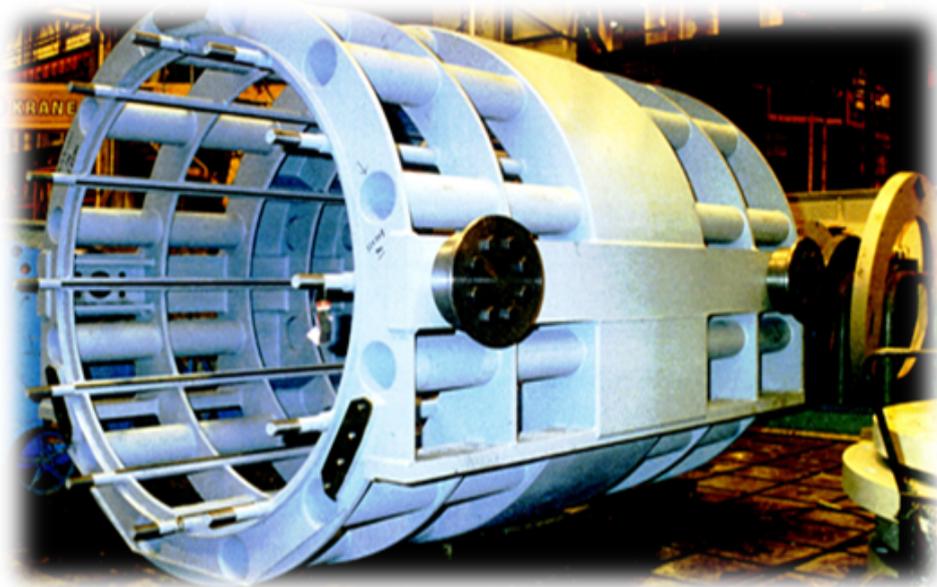


FIGURE 1.7 – Structure du stator

#### 2. Noyau du stator

Le noyau du stator est réalisé à partir de disques isolés, segmentés, recuits de direction préférentielle, orientés selon le grain, en acier à silice de haute qualité pour minimiser les pertes électriques.

Ces disques s'assemblent et sont séparés en paquets à travers des blocs écarteurs pour avoir des passages de ventilation.

### 3. Enroulement du stator

L'enroulement du stator est composé de barres isolées assemblées dans les encoches du stator, aux extrémités jointes afin de former des bobines et connectées aux bobinages de phase appropriés à l'aide des bagues de raccord. Chaque phase est divisée en groupes de bobines séparées de  $180^\circ$ .



FIGURE 1.8 – Spires terminales de l'enroulement du stator

### 4. Ventilation du stator

Les ventilateurs du rotor fournissent l'augmentation de pression nécessaire pour la ventilation de l'alternateur. Les ventilateurs sont à flux radial avec aubes individuelles montées sur les moyeux de l'hélice près des extrémités du rotor. Des buses d'entrées peuvent être utilisées afin de contrôler les conditions d'entrée du gaz dans les ventilateurs.

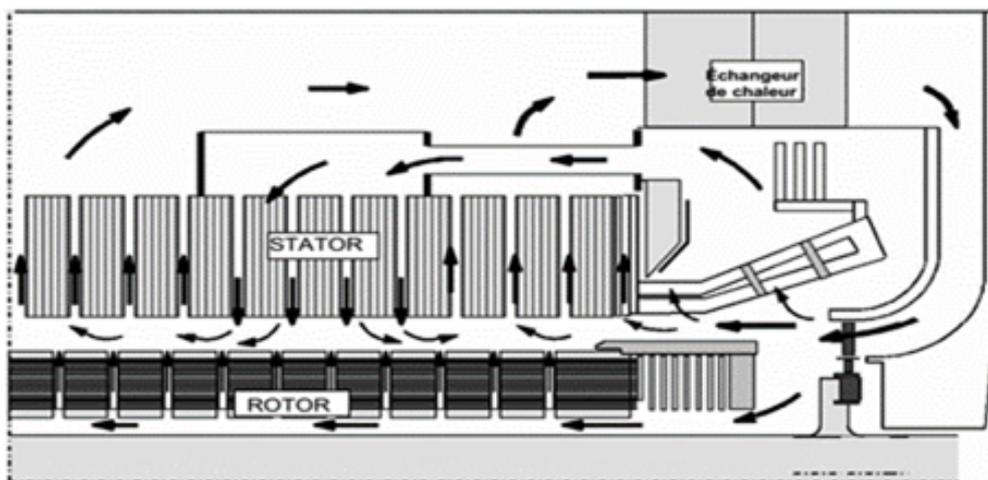


FIGURE 1.9 – Système de ventilation

### 5. Rotor

Le rotor se compose d'un axe tournant et de groupes d'enroulement de cuivre fixés à cet axe formant les enroulements de champ de l'Alternateur.

Le rotor est usiné à partir d'acier forgé allié simple qui a passé des tests étendus pour s'assurer que la forge répond aux propriétés métallurgiques et physiques requises.



FIGURE 1.10 – Rotor assemblé

## 6. Système d'excitation

Le contrôleur d'excitation EX2100e produit le courant d'excitation de champ permettant de contrôler la tension CA aux bornes de l'alternateur et/ou les voltampères réactifs (VAR). Il s'agit d'un système à thyristors conçu pour les alternateurs des turbines à vapeur, à gaz et hydrauliques neuves ou mises à niveau. Le contrôleur d'excitation EX2100e prend en charge à la fois les systèmes d'excitation statiques et les excitateurs rotatifs de type sans balai et Alterrex.

L'excitateur est un système modulaire flexible qui peut être assemblé pour fournir une plage de courants de sortie et plusieurs niveaux de redondance du système.

## 7. Système de refroidissement par hydrogène

L'hydrogène est utilisé pour le refroidissement dans la plupart des grands turboalternateurs plutôt que l'air, pour plusieurs raisons :

- Caractéristiques de transfert de chaleur intrinsèquement meilleures (environ 14 fois).
- Augmentation des performances de transfert de chaleur avec une pression d'hydrogène plus élevée.
- Moins de pertes dues à la ventilation et au frottement.
- Suppression des décharges partielles avec augmentation de la pression d'hydrogène.
- Augmentation significative de la tension de claquage des composants de la machine.

Bien que l'hydrogène soit un moyen très utile pour refroidir les composants internes de l'alternateur, il est très dangereux s'il n'est pas manipulé correctement. Afin d'éviter la production accidentelle du mélange explosif hydrogène-air dans l'alternateur, lorsque ce dernier est rempli d'hydrogène avant sa mise en route, ou lorsque l'hydrogène est retiré de l'alternateur avant l'ouverture de celui-ci en cas de contrôle ou maintenance, un gaz inerte est utilisé pour purger l'air ou l'hydrogène restant dans l'alternateur. Le dioxyde de carbone est généralement utilisé comme agent d'épuration, livré dans des conteneurs cylindriques pourvus d'un collecteur.

## 1.6 Description et fonctionnement des équipements auxiliaires de la centrale

### 1.6.1 Aéro-réfrigérant

Un aéro-réfrigérant est un dispositif permettant de transférer de l'énergie thermique du fluide interne vers l'air extérieur, il est constitué de 3 équipements principaux :

#### Pompe

Il y a 2 pompes (redondant) de moteur AC pour circuler l'eau de refroidissement dans tout le circuit de refroidissement.

- La puissance du moteur est 15 KW.
- La pression du travail est 8 bar.

#### Ventilateur

Le rôle du ventilateur est créer un flux d'air pour refroidir les radiateurs.

- La station d'aéro-réfrigérant contient 72 moto-ventilateur (18 x 4).
- La puissance du moto ventilateur est 6 KW.

#### Radiateur

Le rôle du radiateur est d'échanger de la chaleur (absorption de la chaleur).



FIGURE 1.11 – Aéro-réfrigérant

### 1.6.2 Compartiment des auxiliaires turbine

#### Dispositif de lancement

La puissance nécessaire au démarrage de la turbine à gaz est délivrée par le système de démarrage statique. Le système de démarrage statique délivre une tension et un courant à fréquence variable à l'alternateur, afin que celui-ci fasse office de démarreur indispensable au démarrage la turbine à gaz. Le système de démarrage statique est constitué des composants principaux suivants :

- Un onduleur à commutation par la charge (LCI).
- Un transformateur de séparation.

- Un sectionneur de LCI.
- Un moteur à basse vitesse.

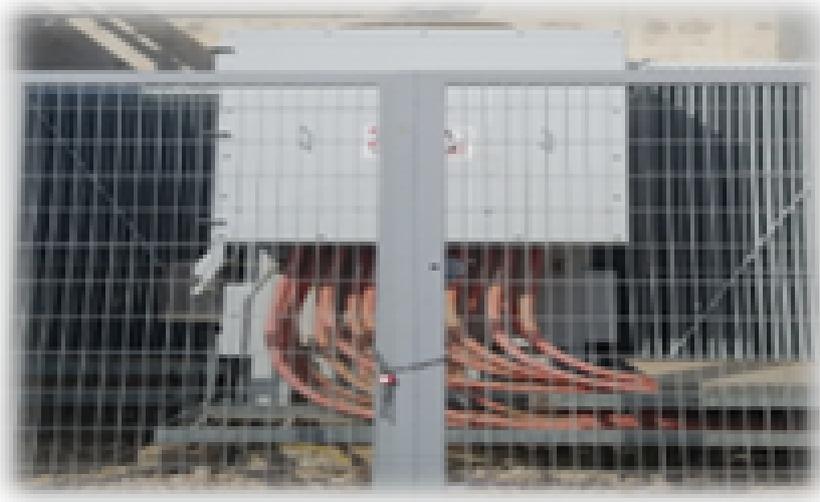


FIGURE 1.12 – Transformateur LCI

### Vibreur

Le vibreur délivre la puissance nécessaire au désaccouplement et à la rotation de la turbine avant le démarrage de la turbine, ainsi qu'à la rotation de la ligne d'arbres après arrêt de la turbine, afin d'éviter une déformation de ses arbres.

Le système consiste en un moteur asynchrone, des réducteurs, un embrayage SSS, une isolation électrique et un accouplement flexible.

### Cuve à l'huile

Les exigences relatives à l'huile hydraulique et l'huile de graissage pour la centrale électrique à turbine à gaz 9FA, sont fournies par un module de lubrification sous pression, fermé et séparé. Ce module de lubrification est équipé :

- D'un réservoir
- De pompes
- De refroidisseurs
- De filtres
- De vannes et de divers dispositifs de protection et de commande

### Pompes à l'huile

#### 1. Pompe de graissage

Il y a 02 pompes, 88QA-1 et 88QA-2 (redondante), de moteur AC pour assurer le graissage de paliers. En cas de l'absence d'électricité, la pompe 88QE assure le minimum du graissage pour éviter l'endommagement des paliers.



FIGURE 1.13 – Pompe de graissage 88QA-1      FIGURE 1.14 – Pompe de graissage 88QA-2

## 2. Pompe d'étanchéité

En cas de l'endommagement des pompes de graissage 88QA, l'étanchéité d'Hydrogène s'assurer par la pompe 88QS (courant alternatif), et par la pompe d'urgence 88ES s'il y a une coupure d'électricité.

## 3. Pompe de soulèvement

Les pompes de soulèvement 88HQ-(1 et 2) assurent la pression nécessaire (190 bar) pour soulever le rotor turbo-alternateur.

### 1.6.3 Poste gaz (AKFEL)

#### Rôle

Le rôle du poste Gaz est le conditionnement (qualité/Température/Pression) du Gaz pour alimenter les turbines à Gaz.



FIGURE 1.15 – Poste gaz (AKFEL)

#### Fonctionnement

Le fonctionnement contient quatre étapes principales :

1. **Séparateur & filtre** : Cette étape consiste en l'augmentation de qualité du carburant. On trouve deux éléments principaux :
  - Séparateur (cyclones) : on utilise pour la séparation entre le gazoline (liquide) et le Gaz.
  - Filtres : on utilise les filtres pour bloquer les particules solides.

2. **Mesure & By-pass** : Faire le comptage pour comptabiliser la consommation du gaz, en utilisant la technique Ultra-son pour mesurer la quantité à consommer.  
Utiliser la ligne de By-pass dans le cas de maintenance.
3. **Chaufferie Gaz**  
On réchauffe pour éviter le phénomène de givrage du gaz dans les conduites, à une température de 47 °C.
4. **Détendeurs**  
On fait la détente (60bars vers 30 bars) pour donner la pression du travail de la turbine, il y a 4 lignes de détente :
  - Deux lignes de service (50% + 50%).
  - Troisième ligne secours automatique.
  - La quatrième ligne secours manuel.

### 1.6.4 Transformateur (BEST)

#### Description et rôle

Un transformateur électrique (parfois abrégé en transfo) est une machine électrique permettant de modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement. Il est analogue à un engrenage en mécanique.

#### Organes du transformateur

- Circuit magnétique
- Enroulement
- Changeur de prise
- Cuve principale / Couvercle / conservateur
- Huile du transformateur
- Système de refroidissement

#### Type de transformateur

Dans la centrale de Boufarik, il existe trois types de transformateur :

1. **Transformateur de puissance**

Le rôle de ce transformateur est l'adaptation de tension entre le générateur 15 KV et le réseau 220 KV (élevateur) pour l'évacuation d'énergie.



FIGURE 1.16 – Transformateur principal

**2. Transformateur de soutirage**

Le rôle de ce transformateur est l'alimentation du jeu de barre MT des auxiliaires turbine à gaz. Il baisse la tension du réseau de 220 KV à 6.6 KV.



FIGURE 1.17 – Transformateur de soutirage

**3. Transformateurs MTBT**

Le rôle de ce transformateur est l'alimentation du jeu de barre BT des auxiliaires turbine à gaz. Il baisse la tension de la barre MT de 6.6 KV à 400 V (BT).



FIGURE 1.18 – Transformateur MTBT

### 1.6.5 Diesel de secours

Le rôle de diesel de secours est l'alimentation autonome (jeu de barre 6.6 KV) de la centrale en cas de la Black star.

Il y a sept groupes diesel (7 x 2300 KVA) pour fournir la puissance nécessaire de jeu de barre qui est de 6.6 KV.



FIGURE 1.19 – Diesel de secours

#### Principaux équipements

##### 1. Moteur diesel

Le rôle principal du moteur est de fournir la puissance mécanique nécessaire pour tourner l'alternateur du diesel.

##### 2. Générateur

La machine synchrone est une machine à courant alternatif, sans bague ni balais. La machine est refroidie par circulation d'air.

Le système d'excitation est composé de deux ensembles : L'induit d'excitateur, générant un courant triphasé, associé avec le pont redresseur triphasé (constitué de six diodes) fournit le courant d'excitation à la roue polaire de l'alternateur. L'induit de l'excitateur et le pont redresseur sont montés sur l'arbre de l'alternateur et sont électriquement interconnectés avec la roue polaire de la machine.

### 1.6.6 Distribution électrique

#### Les alimentations sans interruption (ASI) Distribution MT 6.6 kV

Assurer l'alimentation des charges dont la valeur de tension nominal est de 6.6 kV.

#### Distribution BT 400 V

Assurer l'alimentation pour les charges dont la valeur de tension nominal est de 400 V de toute la centrale.

#### Les alimentations sans interruption (ASI)

Les ASI sont utilisées d'une manière générale pour deux raisons principales :

- Assurer la continuité de l'énergie électrique en cas de coupure électrique au niveau du réseau

- Améliorer la qualité de l'énergie électrique consommée afin de minimiser la consommation en énergie électrique, (une ASI est capable de fournir une tension sinusoïdale et de bonne qualité). Une ASI peut être monophasée ou triphasée selon la puissance et l'application utilisée.

### 1.6.7 Poste H.T

Le rôle du poste HT est le raccordement de la centrale au réseau électrique pour évacuer l'énergie dans la phase de production, ou bien la réception d'énergie dans la phase de consommation.

### 1.6.8 Station de traitement d'eau

La station de traitement d'eau de BFC2 sert à produire une eau filtrée (eau de service) d'une capacité de  $50 \text{ m}^3/h$ , en faisant passer l'eau brute par le filtre à sable MMF, l'eau de service est stockée dans 2 réservoir de  $2500 \text{ m}^3$ . Cette eau filtrée est utilisée pour produire une eau déminéralisée avec une capacité de  $17 \text{ m}^3/h$  et une eau potable d'une capacité de  $2 \text{ m}^3/h$ .

Pour la production de l'eau déminéralisé, l'eau filtrée doit être passée par UF, osmose inverse et EDI , ensuite acheminée pour le stockage vers 2 réservoirs d'eau déminéralisée de  $11000 \text{ m}^3$  à l'aide d'une pompe.

Pour la production de l'eau potable, l'eau filtrée doit être passée par un filtre à charbon actif, filtre cartridge, osmose inverse, dolomite et enfin ultraviolet, cette eau sera stockée dans une bache d'eau potable.

## 1.7 Formulation de la problématique

La qualité de l'air à l'entrée de la turbine à gaz est essentielle à la performance de tout le système. Il est donc nécessaire d'utiliser des filtres qui offrent une haute performance de filtration, une faible perte de pression et une longue durée de service.

Dans les conditions de fonctionnement normales et standards, le fabricant recommande de remplacer les cartouches filtrantes toutes les 24000 heures, soit près de 3 ans, et c'est lorsque la perte de pression atteint  $4 \text{ inH}_2\text{O}$  ( $1000\text{Pa}$ ). Cependant, au niveau de la centrale de Boufarik II, la durée de vie de ces filtres ne dépasse pas les 10 mois, ce qui signifie qu'ils doivent être remplacés trois ou quatre fois sur une période de 24000 heures, plutôt qu'une seule fois.

Cependant, ce remplacement a des implications économiques. Tout d'abord, cela entraîne des coûts supplémentaires liés à l'achat plus fréquent de nouveaux filtres. De plus, la fréquence accrue de remplacement engendre des coûts de maintenance supplémentaires, notamment en terme de disponibilité de la machine, de temps et de main-d'œuvre nécessaires pour effectuer les remplacements (soit un total de 168 heures).

L'objectif de ce projet consiste à identifier les différentes sources et causes de problème en question.

## 1.8 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'obtenir un aperçu général sur les entreprises General Electric et SPE Sonelgaz, ainsi qu'une description détaillée de la centrale électrique de Boufarik II et de ses composants. Nous avons également présenté la problématique liée au système d'admission d'air de la centrale.

## **Chapitre 2**

**Le système d'admission d'air et son importance pour une turbine à gaz**

## 2.1 Introduction

Les turbines à gaz aspirent une grande quantité d'air ambiant pendant leur fonctionnement. Pour cette raison, la qualité de l'air entrant dans la turbine est un facteur important pour les performances et la durée de vie de la machine. Un système de filtration est utilisé pour contrôler la qualité de l'air en éliminant les contaminants nocifs qui sont présents. La sélection du système de filtration peut être une tâche ardue, car il y a de nombreux facteurs à prendre en compte. Le système doit être sélectionné en fonction des contaminants présents dans l'air ambiant et des changements attendus dans les contaminants à l'avenir en raison de sources d'émission temporaires ou de changements saisonniers. Dans ce chapitre, nous allons parler des principales considérations pour la sélection et l'installation d'un système de filtration d'entrée de turbine à gaz. Tout d'abord, Le rôle protecteur du système d'admission d'air pour l'installation est décrit, puis les conséquences qui peuvent survenir en raison d'une filtration d'entrée inadéquate sont examinées, ensuite les caractéristiques de filtration, et enfin, les composants d'un système de filtration.

## 2.2 Rôle protecteur du système d'admission d'air pour l'installation

Le système d'admission d'air pour une installation de turbine à gaz est un élément crucial pour garantir un fonctionnement sûr et efficace de la turbine. Ce système joue un rôle protecteur important en empêchant les particules indésirables et les contaminants d'entrer dans la turbine, ce qui peut causer des dommages graves au moteur.

Le système d'admission d'air est conçu pour fournir de l'air propre et non contaminé à la turbine à gaz. Il est généralement composé d'un filtre à air, d'un système de refroidissement et d'un système de contrôle de la qualité de l'air. Les filtres à air sont utilisés pour éliminer les particules de poussière et autres contaminants de l'air avant qu'il ne soit aspiré par la turbine. Le système de refroidissement est utilisé pour abaisser la température de l'air avant qu'il ne soit admis dans la turbine, ce qui améliore l'efficacité de la turbine. Enfin, le système de contrôle de la qualité de l'air mesure la teneur en oxygène, en azote et en autres gaz afin de garantir que l'air entrant dans la turbine est propre.

L'objectif principal du système d'admission d'air est de protéger la turbine à gaz contre les dommages causés par les particules et les contaminants qui peuvent entrer dans la turbine. Les particules de poussière et autres contaminants peuvent causer des dommages importants aux pales de la turbine, réduire son efficacité et augmenter la consommation de carburant. De plus, l'accumulation de contaminants dans la turbine peut entraîner des pannes et des temps d'arrêt coûteux.

Un autre rôle important du système d'admission d'air est de maintenir la performance optimale de la turbine à gaz. En maintenant l'air propre et frais, le système d'admission d'air aide à garantir que la turbine fonctionne efficacement et atteint sa puissance nominale. En outre, un système d'admission d'air bien conçu peut réduire les coûts de maintenance en prolongeant la durée de vie de la turbine à gaz.

## 2.3 Conséquences d'une mauvaise filtration d'entrée

Lorsque la qualité de l'air entrant dans la turbine à gaz n'est pas bien contrôlée, plusieurs conséquences peuvent se produire. Certains des mécanismes de dégradation les plus courants sont discutés ci-dessous.

### 2.3.1 Les dommages causés par des corps étrangers

Les dommages causés par des corps étrangers (FOD) peuvent être importants dans une turbine à gaz s'il n'y a pas de protection adéquate. Cela se produit généralement aux premiers étages du compresseur. Les gros objets ou les particules relativement grandes peuvent être capturés ou filtrés pour éviter leur entrée dans le ventilateur ou la section du compresseur. Cette réalisation est un gain significatif, car les FOD ont le plus grand potentiel de dommages secondaires et étendus au compresseur et aux parties ultérieures du flux d'air. Le système de filtration et ses composants sont conçus pour prévenir les FOD. Les systèmes mal conçus, y compris les filtres, le matériel dans la tuyauterie et l'insonorisation, et d'autres aspects, augmentent le risque de dommages FOD et doivent être pris en compte. Souvent, des écrans FOD sont installés en amont des filtres pour la protection. Selon l'emplacement de l'écran et la taille de la maille, la perte de pression à travers ces écrans peut être négligeable ou significative [3].



FIGURE 2.1 – Dommages aux turbines à gaz causés par FOD [3].

### 2.3.2 L'érosion

L'érosion se produit lorsque des particules solides ou liquides d'environ  $10\ \mu\text{m}$  et plus frappent les surfaces rotatives ou stationnaires de la turbine à gaz. Les particules frappent la surface et enlèvent de petites particules de métal qui finissent par entraîner des changements dans la géométrie de la surface. Ce changement de géométrie entraîne des écarts dans le trajet de l'écoulement d'air, une modification des jeux et une réduction des sections transversales des composants métalliques, possiblement dans des régions fortement sollicitées. L'érosion est un processus irréversible ; par conséquent, les composants de la turbine à gaz doivent être remplacés pour retrouver leur état d'origine. Cependant, les particules de  $10\ \mu\text{m}$  et plus sont facilement éliminées par les filtres commerciaux [4].



FIGURE 2.2 – Erosion sur le bord d'attaque d'une pale de turbine [3].

### 2.3.3 L'encrassement

L'encrassement des aubes de compresseur est un mécanisme important qui conduit à la détérioration des performances des turbines à gaz au fil du temps. L'encrassement est causé par l'adhérence de particules aux surfaces des aubes et des anneaux. Ces particules sont généralement plus petites que 2 à 10  $\mu\text{m}$ . Les exemples courants incluent la fumée, les brouillards d'huile, le carbone et le sel de mer. L'encrassement peut être contrôlé par un système de filtration d'air approprié et souvent partiellement inversé par un lavage détergent des composants. L'adhérence est impactée par les brouillards d'huile ou d'eau. Le résultat est une accumulation de matériau qui entraîne une augmentation de la rugosité de surface et, dans une certaine mesure, modifie la forme de l'aube (si l'accumulation de matériau forme des couches de dépôts plus épaisses). Cela entraîne à son tour une diminution des performances de la turbine à gaz [4].

### 2.3.4 La corrosion

Selon la référence [3], si les types de matériaux aspirés dans la machine sont chimiquement réactifs, en particulier en ce qui concerne le métal des pièces de turbine, le résultat est la corrosion. Il existe deux classifications de corrosion dans les turbines à gaz : la corrosion froide et la corrosion chaude. La corrosion froide se produit dans le compresseur en raison de dépôts humides de sels, d'acides, de vapeur, de gaz agressifs tels que le chlore, les sulfures ou peut-être les oxydes. Cela peut entraîner une réduction des propriétés transversales par enlèvement de matière sur une zone ou une corrosion concentrée entraînant la formation de piqûres. Les résultats de la corrosion peuvent être très similaires à ceux de l'érosion, sauf que la corro-

sion peut également pénétrer dans les fissures et les anomalies métallurgiques pour accélérer d'autres mécanismes d'initiation de dommages. Ces effets de corrosion sont irréversibles tout comme l'érosion. La seule façon de ramener les pales à leur état d'origine est de les remplacer. La corrosion à chaud se produit dans la zone de la turbine. Cette section est exposée à des matériaux qui peuvent non seulement provenir de l'air, mais aussi du carburant ou de l'injection d'eau/vapeur, ce qui peut être difficile à filtrer. Il s'agit notamment de métaux tels que le sodium, le potassium, le vanadium et le plomb qui réagissent avec le soufre et/ou l'oxygène lors de la combustion. Après la combustion, ces métaux se déposent sur les doublures de chambre de combustion, les buses, les pales de turbine et les pièces de transition et provoquent une oxydation accélérée de la couche d'oxyde normalement protectrice de ces pièces. L'oxydation est une réaction chimique à haute température entre l'oxygène et le matériau des composants. La corrosion à chaud est une forme d'oxydation accélérée produite par la réaction chimique entre un composant et des sels fondus déposés sur sa surface. La corrosion à chaud comprend une série complexe de réactions chimiques, rendant les taux de corrosion très difficiles à prévoir. La dégradation devient plus sévère avec l'augmentation des niveaux de concentration de contaminants.

Le mécanisme et le taux de corrosion à chaud sont fortement influencés par la température. Les aubes de turbine sont attaquées par une corrosion à température élevée. Il y a un gradient de température à travers l'aube. En raison de ce gradient, la température à la racine est inférieure à celle de l'aube elle-même, de sorte que la racine subira un mécanisme de corrosion à chaud différent de la corrosion de l'aube. La sélection d'alliages et de revêtements appropriés pour les matériaux des composants dans la section chaude de la turbine à gaz peut aider à atténuer les défaillances de corrosion à chaud, mais la méthode préférée pour éviter ce type de défaillance est une filtration adéquate. Si possible, les niveaux de sodium et de potassium devraient être maintenus en dessous de 0,01 ppm avec une filtration pour éviter la corrosion à chaud.

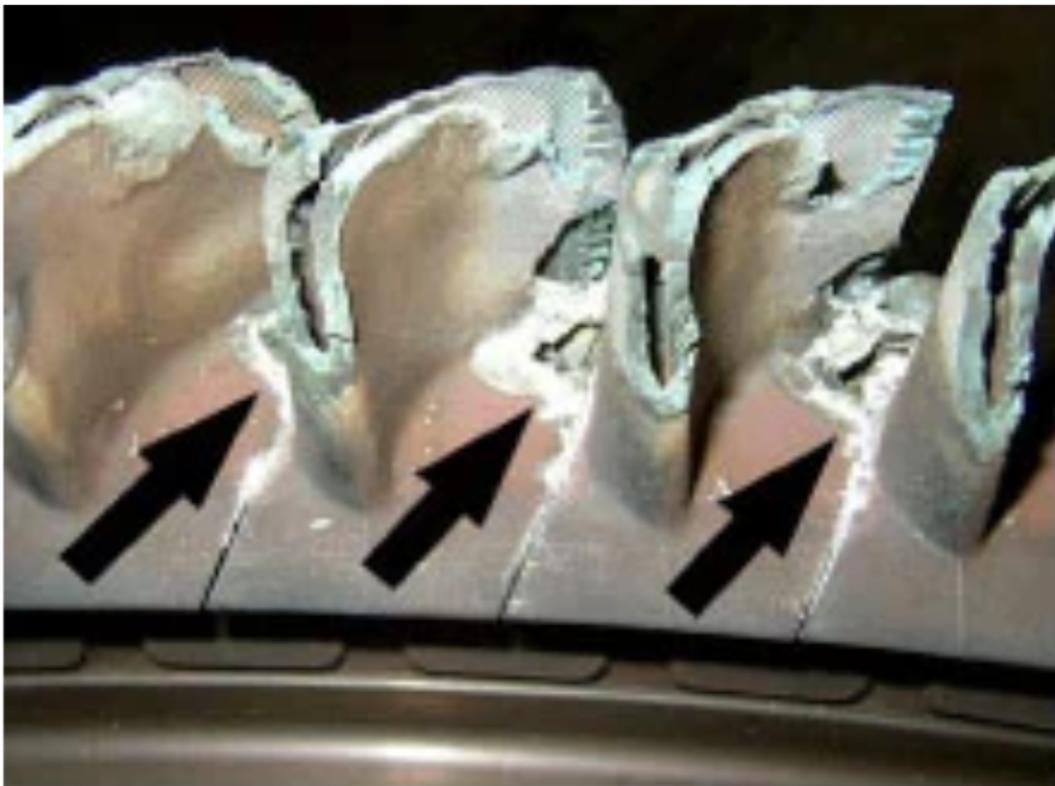


FIGURE 2.3 – Défaillance due à la corrosion chaude [3].

## 2.4 Caractéristiques de filtration

### 2.4.1 Mécanismes de filtration

Les filtres dans le système de filtration utilisent de nombreux mécanismes différents pour éliminer les contaminants de l'air. Le média filtrant, la taille des fibres, la densité de la garniture du média, la taille des particules et la charge électrostatique influencent la façon dont le filtre élimine les contaminants. Chaque filtre a généralement plusieurs mécanismes différents travaillant ensemble pour éliminer les contaminants. Quatre mécanismes de filtration sont présentés dans la Figure 2.4.

Le premier mécanisme de filtration est l'impaction inertielle. Ce type de filtration est applicable aux particules d'un diamètre supérieur à  $1 \mu\text{m}$ . L'inertie des grosses particules dans le flux d'air les fait continuer sur une trajectoire droite lorsque le flux d'air passe autour d'une fibre de filtre. La particule est ensuite impactée et attachée au média filtrant, maintenue en place comme indiqué dans la première image de la Figure 2.4. Ce mécanisme de filtration est efficace dans les systèmes de filtration à haute vitesse.

Le mécanisme de filtration suivant, la diffusion, est efficace pour les particules très petites, typiquement inférieures à  $0,5 \mu\text{m}$ . L'efficacité augmente avec les vitesses d'écoulement plus faibles. Les petites particules interagissent avec les particules environnantes et les molécules de gaz. En particulier dans l'écoulement turbulent, le chemin des petites particules fluctue de manière aléatoire autour de l'écoulement principal. Au fur et à mesure que ces particules diffusent dans l'écoulement, elles entrent en collision avec la fibre et sont capturées. Plus la particule est petite et plus le débit à travers le milieu filtrant est faible, plus la probabilité que la particule soit capturée est élevée.

Les deux mécanismes de filtration suivants sont les plus connus : l'interception et le tamisage. L'interception se produit avec des particules de taille moyenne qui ne sont pas assez grandes pour sortir du chemin d'écoulement en raison de l'inertie ou pas assez petites pour diffuser. Les particules suivent le flux d'écoulement où elles toucheront une fibre dans le milieu filtrant et seront piégées et retenues. Le tamisage est la situation où l'espace entre les fibres de filtre est plus petit que la particule elle-même, ce qui entraîne la capture et la retenue de la particule [3].

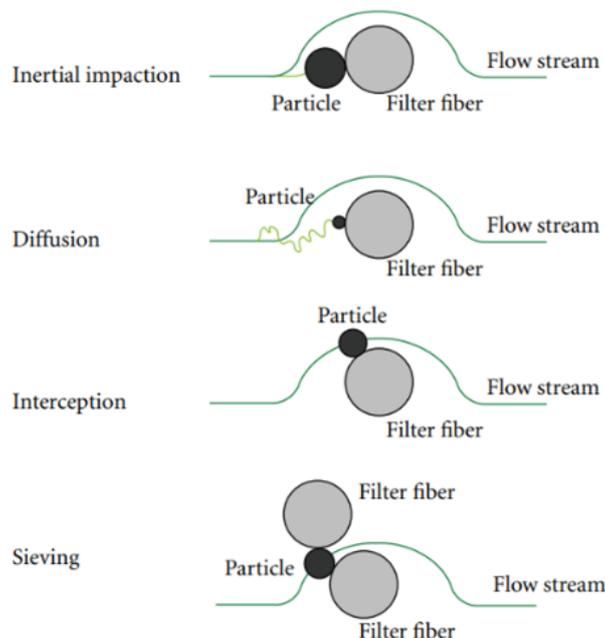


FIGURE 2.4 – Les mécanismes de filtration [4].

### 2.4.2 La perte de pression

Une perte de pression plus élevée se produit avec un filtre plus efficace en raison des restrictions de flux d'air. La perte de pression a un impact direct sur les performances de la turbine à gaz, car elle entraîne une réduction de la pression d'admission du compresseur. Pour que le compresseur surmonte les pertes du système d'admission, la turbine à gaz consommera plus de carburant et aura également une puissance de sortie réduite. À mesure que la perte de pression augmente, la puissance diminue et le taux de chaleur augmente de manière linéaire. Une réduction de 0,2 inH<sub>2</sub>O (50 Pa) de la perte de pression peut entraîner une amélioration de 0,1% de la puissance de sortie. Les pertes de pression typiques sur les systèmes de filtration d'admission peuvent varier de 2 à 6 inH<sub>2</sub>O (500 à 1500 Pa).

La performance du filtre doit être évaluée pour la plage complète de perte de pression sur toute sa durée de vie, et pas seulement lorsqu'il est neuf. La perte de pression augmentera au fil du temps de vie du filtre. Par conséquent, on peut s'attendre à une performance de turbine à gaz inférieure au fil du temps, où les filtres doivent être changés ou nettoyés périodiquement afin de maintenir une faible perte de pression. Le changement de la perte de pression au fil du temps dépend fortement de la sélection du filtre et du type et de la quantité de contaminants rencontrés [3].

### 2.4.3 Le chargement des filtres

Pendant l'opération, lorsque le filtre collecte des particules, il se charge lentement jusqu'à atteindre un état "plein". Cet état est généralement défini comme le filtre atteignant une perte de pression spécifiée, ou à la fin de l'intervalle de maintenance. Les filtres se chargent de deux manières différentes : par chargement en surface ou en profondeur.

Le chargement en profondeur est le type de filtration où les particules sont capturées à l'intérieur du matériau filtrant. Pour retrouver la perte de pression ou l'état d'origine, le filtre doit être remplacé.

Le deuxième type de filtre est un filtre chargé en surface. Avec ce type de chargement, les particules se collectent à la surface du filtre. Quelques particules peuvent pénétrer le matériau des fibres, mais pas suffisamment pour nécessiter le remplacement du filtre. Les filtres chargés en surface sont le plus souvent utilisés dans les systèmes de nettoyage automatique, car la poussière peut facilement être éliminée avec des impulsions d'air une fois que la différence de pression à travers le filtre atteint un certain niveau. Une fois que le filtre est nettoyé, la perte de pression à travers le filtre sera proche de sa condition d'origine. L'efficacité du filtre chargé en surface augmente en réalité lorsque la surface est chargée de poussière, car une croûte de poussière se développe à la surface du matériau filtrant, créant une couche de filtration supplémentaire et réduisant également la quantité de surface disponible pour le flux d'air dans le média filtrant [4].

## 2.5 Composants d'un système de filtration

### 2.5.1 Les hottes anti-intempéries

Les hottes anti-intempéries ou Weather hoods sont les mécanismes de filtration les plus simples, mais ils sont importants pour réduire la quantité de contaminants solides qui entrent dans le système de filtration principal. Bien qu'ils ne soient pas classés comme des filtres, ils font partie du système de filtration et contribuent à l'élimination des gros objets ou contaminants transportés dans le flux d'air.

Les hottes anti-intempéries sont des revêtements en tôle placés à l'entrée du système de filtra-

tion. L'ouverture du capot est dirigée vers le bas de sorte que l'air ambiant doit se tourner vers le haut pour entrer dans le système de filtration d'entrée. La rotation de l'air est efficace pour minimiser la pénétration de la pluie et de la neige. Weather hoods sont utilisés sur la majorité des systèmes de filtration d'entrée, et ils sont essentiels pour les systèmes dans les zones avec de grandes quantités de précipitations ou de neige. Weather hoods ou un autre système de protection comparable sont fortement recommandés pour tous les systèmes avec filtre haute efficacité [4].



FIGURE 2.5 – Les hottes anti-intempéries [4].

### 2.5.2 Protection anti-givrage

La protection anti-givrage est utilisée dans les climats avec des températures de gel. Les climats de gel avec de la pluie ou de la neige peuvent causer le givrage des composants d'entrée, ce qui peut entraîner des dommages physiques aux conduits d'admission ou au compresseur de turbine à gaz. Cette glace peut également affecter les performances de la turbine à gaz. Si de la glace se forme sur les éléments filtrants, alors la glace sur ces filtres bloquera le chemin d'écoulement, ce qui fera augmenter la vitesse aux autres filtres. Cela provoque une diminution de l'efficacité de filtration. De plus, les éléments filtrants avec de la glace peuvent être endommagés. La Figure 2.6 montre un exemple de formation de glace sur les filtres due à la dérive de la tour de refroidissement.

Les réchauffeurs, la prise d'air de compression ou les filtres à autonettoyage sont souvent utilisés dans le système d'admission dans les environnements froids pour éviter l'accumulation de glace sur la bouche d'entrée ou les éléments filtrants. Il convient de noter que tout emplacement dans le système d'admission (même au-delà du système de filtration) qui crée une chute de pression peut potentiellement entraîner la formation de glace. Dans certaines opérations de centrale, les aubes de guidage d'admission (IGV) sont utilisées pour la régulation de débit en charge partielle. Si les IGV sont partiellement fermées, alors sous les bonnes conditions météorologiques, une accumulation de glace peut se produire à cet endroit. Afin d'éviter l'accumulation de glace dans cette situation, il peut être nécessaire de limiter la fermeture des IGV ou de prévoir un chauffage de l'air d'admission pour éviter la formation de glace [4].



FIGURE 2.6 – Filtres à cartouche à impulsions avec formation de givre [4].

### 2.5.3 Séparateurs inertiels

La séparation inertielle exploite les principes physiques de la quantité de mouvement, de la gravité, des forces centrifuges et de l'impact, ainsi que les différences physiques entre les phases pour déplacer les particules hors du flux gazeux de manière à ce qu'elles puissent être emportées ou évacuées. La quantité de mouvement plus élevée des particules de poussière ou d'eau contenues dans le flux d'air les fait avancer, tandis que l'air peut être dévié vers des ports latéraux et sortir par un chemin différent que la poussière. Il existe de nombreux types de séparateurs inertiels, mais les plus couramment utilisés avec la filtration d'entrée des turbines à gaz sont les séparateurs à ailettes et les cyclones [4].

### 2.5.4 Coalesceurs d'humidité

Dans les environnements avec une forte concentration d'humidité liquide dans l'air, des coalesceurs sont nécessaires pour éliminer l'humidité liquide. Le coalesceur fonctionne en capturant les petites gouttelettes d'eau dans ses fibres. Au fur et à mesure que les particules sont capturées, elles se combinent avec d'autres particules pour former de plus grosses gouttelettes d'eau. Les coalesceurs sont conçus pour permettre aux gouttelettes de s'écouler à travers le filtre ou d'être libérées dans le flux. Si les gouttelettes plus grandes sont libérées, elles sont capturées en aval par un séparateur [4].



FIGURE 2.7 – Coalesceur d'humidité [4].

### 2.5.5 Préfiltres

L'air contient un mélange de grosses et de petites particules. Si un filtre haute efficacité à un seul étage est utilisé, l'accumulation de particules solides grandes et petites peut rapidement entraîner une augmentation de la perte de pression et du chargement du filtre. Les préfiltres sont utilisés pour prolonger la durée de vie du filtre haute efficacité en capturant les particules solides plus grandes en amont. Par conséquent, le filtre haute efficacité ne doit éliminer que les plus petites particules de l'air, ce qui augmente la durée de vie du filtre. Les préfiltres capturent normalement les particules solides supérieures à 10  $\mu\text{m}$ , mais certains préfiltres captureront également les particules solides de 2 à 5  $\mu\text{m}$ . Ces filtres sont généralement composés de fibres synthétiques de grand diamètre dans une structure de cadre jetable. Les filtres à sac sont également couramment utilisés pour les préfiltres. Ils offrent une surface plus grande qui réduit la perte de pression à travers le filtre. Dans de nombreuses installations, les préfiltres peuvent être remplacés sans avoir à arrêter le moteur [4].



FIGURE 2.8 – Filtre à sac [3].

### 2.5.6 Filtres à haute efficacité

Selon la référence [4], il existe des filtres pour éliminer les grosses particules solides, qui empêchent l'érosion et les dommages causés par des corps étrangers (FOD). Les plus petites particules qui causent la corrosion, le colmatage des passages de refroidissement et l'encrassement sont éliminées à l'aide de filtres à haute efficacité. Ces types de filtres ont des séparations moyennes supérieures à 80%.

Trois types courants de filtres à haute efficacité sont EPA, HEPA et ULPA. Les filtres EPA et HEPA sont définis comme ayant une efficacité minimale de 85% et 99,95%, respectivement, pour toutes les particules supérieures ou égales à  $0,3 \mu\text{m}$ . Les filtres ULPA ont une efficacité minimale de 99,9995% pour les particules de la même taille ou plus grandes que  $0,12 \mu\text{m}$ . Souvent, ces noms sont utilisés de manière vague dans le cadre de la filtration à haute efficacité. Cependant, la majorité des filtres à haute efficacité utilisés dans la filtration d'entrée de turbine à gaz ne répondent pas à ces exigences.

Les filtres à haute efficacité utilisés dans les turbines à gaz ont un média plissé qui augmente la surface de filtration. Pour atteindre une efficacité de filtration élevée, le flux à travers les fibres du filtre est fortement restreint, ce qui crée une perte de pression élevée, à moins que la vitesse de face soit maintenue basse. Les plis aident à réduire cette perte de pression. La perte de pression initiale sur les filtres à haute efficacité peut atteindre 1 inH<sub>2</sub>O (250 Pa), avec une perte de pression finale dans la plage de 2,5 inH<sub>2</sub>O (625 Pa) pour les filtres rectangulaires et 4 inH<sub>2</sub>O (1000 Pa) pour les filtres à cartouche. La durée de vie des filtres est fortement influencée par d'autres formes de filtration en amont. Si des étapes de filtration pour éliminer les particules solides plus grandes et l'humidité liquide sont présentes, alors ces filtres auront une durée de vie plus longue. Une filtration minimale avant les filtres à haute efficacité entraînera un remplacement ou un nettoyage plus fréquent. Les filtres à haute efficacité sont évalués selon différentes normes. La majorité des filtres utilisés dans les turbines à gaz ne sont pas classés comme EPA, HEPA ou ULPA. Les filtres utilisés dans les turbines à gaz sont évalués selon les normes ASHRAE 52.2 :2007 et EN 779 :2002.

Il existe de nombreuses constructions différentes de filtres de type haute efficacité : filtres rectangulaires, filtres cylindriques/cartouches et filtres à sacs.

Les filtres rectangulaires à haute efficacité sont construits en pliant une feuille continue de média en plis étroitement espacés dans un cadre rigide rectangulaire. Les filtres rectangulaires sont chargés en profondeur ; par conséquent, une fois qu'ils atteignent la perte de pression maximale autorisée, ils doivent être remplacés. Deux exemples de filtres rectangulaires à haute efficacité sont présentés sur la figure 2.9. Les filtres à haute efficacité peuvent également être fabriqués à partir de médias qui n'autorisent pas la pénétration de l'eau à travers le média filtrant.

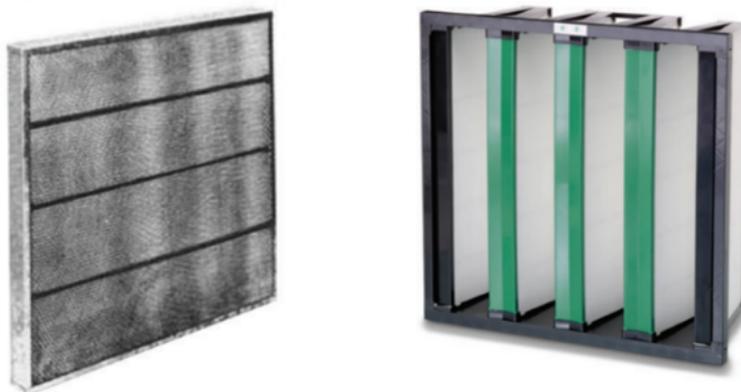


FIGURE 2.9 – Les filtres rectangulaires à haute efficacité [4].

Les filtres à cartouche sont également constitués de plis étroitement espacés, mais ils sont disposés de manière circulaire (Figure 2.10). L'air circule radialement dans la cartouche. Ils sont installés de manière horizontale ou verticale (suspendus vers le bas). Ces types de filtres peuvent être chargés en profondeur ou en surface. Les filtres chargés en surface sont couramment utilisés avec un système de nettoyage automatique, mais tous ne sont pas conçus pour l'autonettoyage. Les filtres à cartouche utilisés dans les systèmes de nettoyage automatique nécessitent une conception structurelle plus robuste afin de protéger les fibres du filtre pendant les impulsions d'air inverse. Le support structurel le plus courant est une cage en fil métallique autour du média plissé à l'intérieur et à l'extérieur du filtre. Les filtres montrés dans la Figure 2.10 ne sont pas conçus pour un système de nettoyage automatique car il n'y a pas de supports structurels à l'extérieur du filtre. Les systèmes de filtration à autonettoyage sont discutés dans la section suivante.

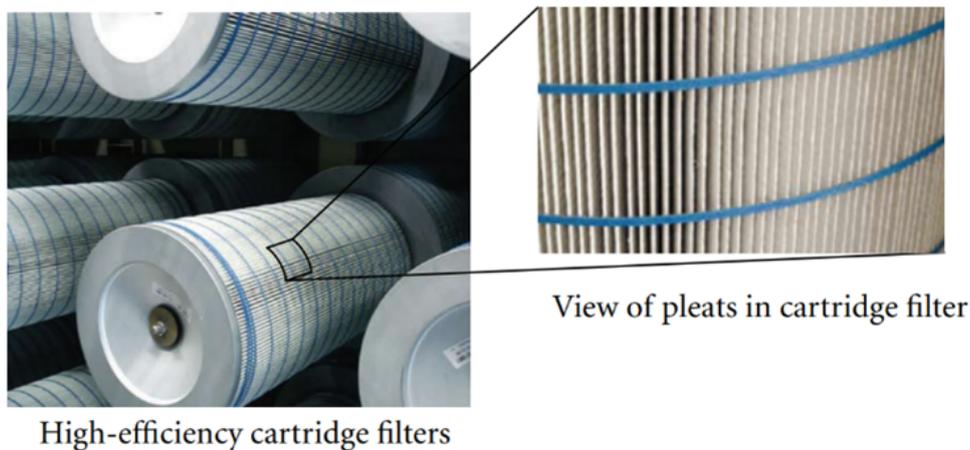


FIGURE 2.10 – Les filtres à cartouche à haute efficacité [4].

### 2.5.7 Filtres autonettoyants

Les filtres à media fibreux précédemment discutés doivent tous être remplacés une fois qu'ils ont atteint la fin de leur durée de vie utile. Dans certains environnements, la quantité de contaminants peut être excessive au point que les filtres précédemment discutés devraient être remplacés fréquemment pour répondre à la demande de filtration. Un exemple typique de ces environnements est un désert avec des tempêtes de sable. Dans les années 1970, le système de filtration autonettoyant a été développé pour le Moyen-Orient où les turbines à gaz sont soumises à des tempêtes de sable fréquentes. Depuis lors, ce système a été continuellement développé et utilisé pour la filtration de l'air d'admission des turbines à gaz.

Le système autonettoyant fonctionne principalement avec des filtres à cartouche à haute efficacité chargés en surface. Le chargement en surface permet un retrait facile de la poussière accumulée grâce à des impulsions d'air inverse (Figure 2.11). La perte de pression à travers chaque filtre est continuellement surveillée. Une fois que la perte de pression atteint un certain niveau, le filtre est nettoyé avec des impulsions d'air. La pression des impulsions d'air varie de 80 à 100 psig (5,5 à 6,9 barg). Le jet inverse d'air comprimé (ou impulsion) dure entre 100 et 200 ms. Pour éviter de perturber l'écoulement et limiter la nécessité d'air comprimé, le système ne pulvérise généralement que 10% des éléments à la fois. Avec ce type de nettoyage, le filtre peut être ramené à l'état proche de l'état initial [4].

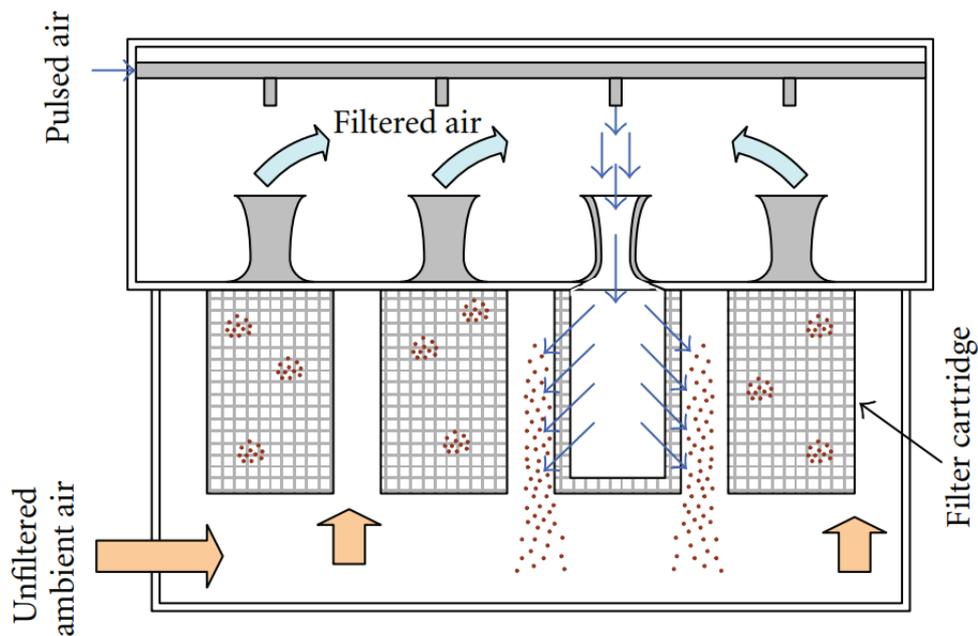


FIGURE 2.11 – Fonctionnement d'un filtre autonettoyant [4].

### 2.5.8 Filtres à bain d'huile

Les filtres à bain d'huile rotatifs sont une autre option de filtration qui, bien qu'efficaces pour éliminer certains contaminants, sont de conception plus ancienne et ne sont pas inclus dans les systèmes de filtration d'air modernes. Ces filtres utilisent de l'huile pour capturer la poussière, créant ainsi une boue qui doit être nettoyée par décantation ou mouvement centrifuge. Le type d'huile doit être adapté au type de poussière. Le transfert d'huile peut être problématique pour la turbine à gaz. Les filtres à rouleaux enduits d'huile consistent en un matériau mobile qui est mouillé par un bain d'huile puis défilé devant l'entrée de la turbine. La poussière adhère au matériau imbibé d'huile. Des problèmes surviennent lorsque l'huile sèche en raison de périodes d'arrêt ou de chaleur excessive. Souvent, des fuites se produisent autour des bords du matériau. Ces filtres peuvent également retenir l'eau et geler, leur efficacité diminue lorsque l'un de ces problèmes survient [3].

### 2.5.9 Filtration par étapes

Toute application de turbine à gaz nécessite généralement plus d'un type de filtre, et il n'y a pas de "filtres universels" qui répondront à tous les besoins. Par conséquent, des systèmes de filtration à deux ou trois étapes sont utilisés. Dans ces conceptions, un préfiltre ou un clapet météo peut être utilisé en premier pour éliminer les contaminants érosifs, la pluie et la neige. Le deuxième peut être un filtre de faible à moyenne performance sélectionné en fonction du type de particules de petite taille présentes ou un coalesceur pour éliminer les liquides. Le troisième filtre est généralement un filtre haute performance pour éliminer les particules plus petites de moins de  $2 \mu\text{m}$  de taille de l'air. La figure 2.12 montre une vue généralisée d'un agencement de filtration. Cet agencement n'est pas correct pour tous les cas en raison du fait que les étapes de filtration sont fortement influencées par l'environnement dans lequel elles fonctionnent [3].

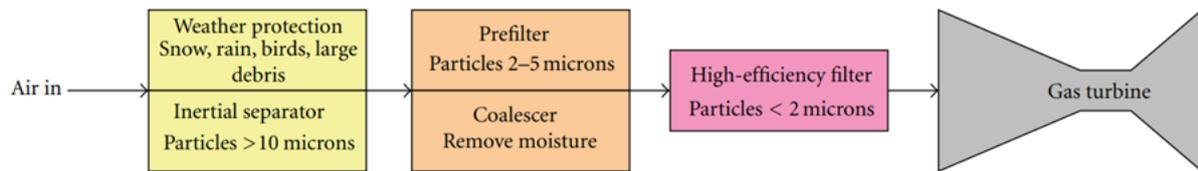


FIGURE 2.12 – Système de filtration à plusieurs étages [3].

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence l'importance cruciale d'un système de filtration d'air efficace pour les turbines à gaz. La sélection et l'installation appropriées de ce système garantissent des performances optimales et une durée de vie prolongée de la turbine. Nous avons examiné les considérations clés telles que la qualité de l'air ambiant et les variations des contaminants présents dans l'air. De plus, nous avons souligné les caractéristiques essentielles de la filtration d'air, en mettant l'accent sur la perte de pression. Comprendre ces aspects est essentiel pour maintenir un fonctionnement optimal de la turbine et protéger l'installation contre les contaminants nocifs. Une filtration d'entrée inadéquate peut avoir des conséquences néfastes, il est donc nécessaire de prendre les bonnes mesures pour assurer une qualité de l'air adéquate. La sélection et l'installation appropriées d'un système de filtration d'entrée de turbine à gaz contribuent à des performances fiables et à long terme, garantissant ainsi l'efficacité et la durabilité de l'installation.

# Chapitre 3

## Inspection de la centrale

## 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons plusieurs aspects importants liés à la gestion de la performance et de la fiabilité du système de la centrale. Nous commencerons par une inspection de la centrale, qui nous permet d'évaluer son état général et d'identifier d'éventuels problèmes. Nous explorerons également les méthodes d'analyse des causes profondes des problèmes à l'aide des "5 Whys" et du diagramme d'Ishikawa. Ensuite, nous aborderons l'approche de l'AMDEC pour évaluer les risques potentiels. Enfin, nous étudierons les concepts de fiabilité, de maintenabilité et de disponibilité du système, qui sont essentiels pour évaluer sa performance globale.

## 3.2 Inspection de la centrale

### 3.2.1 Composants du système d'admission d'air de la centrale

Le système d'admission d'air de la centrale électrique Boufarik II est composé de :

- Hottes anti-intempéries.
- Coalesceurs d'humidité.
- Filtres cartouches à autonettoyage.
- Filtres statiques (filtres rectangulaires à haute efficacité).

### 3.2.2 Observations relatives aux parties amont des cartouches (coté sale)

- L'installation des filtres coalesceurs comporte de vides inutiles susceptibles de laisser passer de l'air qui parvient donc à l'étape de filtration suivante sans avoir subi de filtration dans les coalesceurs.



FIGURE 3.1 – Les vides entre les coalesceurs

- S'il est normal de retrouver ces impuretés déposées sur les surfaces de filtres en attendant leur nettoyage, il est en revanche inadmissible de les laisser s'accumuler sur le sol des chambres de filtration, comme on le voit sur les figures suivantes. Ceci ne peut s'expliquer que par l'insuffisance ou d'absence de la maintenance concernant ces endroits.



FIGURE 3.2 – Des impuretés déposées sur les surfaces de filtres

- Les dépôts de poussière observés sur les faces des cartouches cylindriques est un signe que des fuites d'air contournent les cartouches et accèdent aux filtres statiques sans avoir subi l'étape de filtration précédente.



FIGURE 3.3 – Les dépôts de poussière observés sur les faces des cartouches

### 3.2.3 Observations relatives aux parties aval des cartouches (côté propre)

- La présence des impuretés sur ces parties (figures suivantes) peut être due soit aux fuites d'air à travers des joints inexistantes ou mal ajustés, soit au fait que ces impuretés ont été laissées dans ces endroits depuis les interventions ultérieures sur l'installation.



FIGURE 3.4 – Les impuretés présentes sur le côté propre

- La présence des gouttelettes d'eau indique que de l'eau entre dans le compartiment des filtres sans avoir subi de filtration au niveau des filtres coalesceurs.



FIGURE 3.5 – Les gouttelettes d'eau présentes dans le côté propre

### 3.2.4 Système de nettoyage automatique des cartouches

Le système automatique qui commande la séquence d'autonettoyage des cartouches est opérationnel. Cependant, la capacité du compresseur de l'unité de production pour le nettoyage été jugée insuffisante pour fournir tout l'air nécessaire à cette opération. Il a donc été décidé d'adjoindre un deuxième compresseur pour augmenter la capacité de production d'air comprimé de l'unité. Sauf que ce deuxième compresseur est un compresseur lubrifié, ce qui a provoqué l'entraînement de gouttelettes d'huile et leur dépôt à certains endroits de l'installation.



FIGURE 3.6 – Les gouttelettes d'huile déposées sur les filtres

## 3.3 5 Whys

### 3.3.1 Définition

La méthode des 5 Whys est une technique d'analyse de la cause fondamentale des problèmes. Elle a été développée par Sakichi Toyoda, fondateur de Toyota Industries, et est devenue une partie intégrante de la philosophie de résolution de problèmes de Toyota, connue sous le nom de Toyota Production System.

L'objectif principal de la méthode des 5 Whys est d'identifier les causes profondes d'un problème plutôt que de se concentrer uniquement sur les symptômes apparents. Cela permet d'éviter les solutions superficielles qui ne résolvent pas réellement le problème à sa source. La méthode consiste à poser la question "Pourquoi?" à plusieurs reprises, en approfondissant chaque réponse obtenue, jusqu'à ce que la cause fondamentale soit mise en évidence [5].

### 3.3.2 Principe de la méthode des 5 Whys

Le principe de la méthode des 5 Whys repose sur l'idée fondamentale de poser des questions en profondeur pour comprendre les causes profondes d'un problème. Au lieu de se contenter d'identifier les symptômes ou les causes immédiates d'un problème, la méthode des 5 Whys vise à explorer les relations de cause à effet jusqu'à ce que la cause fondamentale soit mise en évidence [6].

Voici comment fonctionne cette méthode :

- Poser la question "Pourquoi?" : La méthode commence par poser la question "Pourquoi?" concernant le problème ou l'incident observé. Cette question initiale permet d'identifier la cause immédiate ou la première réponse évidente.
- Approfondir chaque réponse : Une fois la première réponse obtenue, il faut continuer à poser la question "Pourquoi?" par rapport à cette réponse. Chaque réponse devient la base de la question suivante, en creusant plus profondément dans les causes sous-jacentes.
- Répéter le processus : Le processus de questionnement itératif est répété jusqu'à ce que vous atteigniez une compréhension approfondie de la cause fondamentale. Cela implique de poser la question "Pourquoi?" plusieurs fois, généralement jusqu'à cinq répétitions, bien que le nombre puisse varier selon la complexité du problème.
- Identifier la cause fondamentale : En creusant en profondeur à travers les questions "Pourquoi?", vous identifiez les causes sous-jacentes et les relations de cause à effet. L'objectif final est d'atteindre la cause fondamentale qui est à l'origine du problème observé.

### 3.3.3 Avantages de la méthode des 5 Whys

La méthode des 5 Whys présente plusieurs avantages qui en font une approche populaire pour l'analyse des problèmes et la recherche de solutions. Voici certains des avantages clés de la méthode des 5 Whys :

- Simplicité : La méthode des 5 Whys est simple à comprendre et à appliquer. Elle ne nécessite pas de compétences techniques ou d'outils complexes, ce qui la rend accessible à tous les niveaux de l'organisation. Même les personnes sans formation spécifique en résolution de problèmes peuvent l'utiliser avec succès.
- Accessibilité : Étant donné sa simplicité, la méthode des 5 Whys peut être utilisée dans divers contextes et industries. Elle peut être appliquée aussi bien dans des environnements de fabrication que dans des domaines tels que les services, les soins de santé, le secteur public, etc. Elle est une méthode polyvalente pour aborder une grande variété de problèmes.

- Coût relativement faible : Par rapport à d'autres méthodes d'analyse de problèmes plus complexes, la méthode des 5 Whys est relativement peu coûteuse à mettre en œuvre. Elle ne nécessite pas d'investissements significatifs en termes de ressources financières, matérielles ou humaines, ce qui en fait une option attrayante pour les organisations ayant des contraintes budgétaires.
- Identification des causes profondes : L'un des principaux avantages de la méthode des 5 Whys est sa capacité à identifier les causes profondes des problèmes. Plutôt que de se limiter à traiter les symptômes ou les causes immédiates, la méthode des 5 Whys permet de creuser en profondeur et de comprendre les causes sous-jacentes qui contribuent au problème. Cela permet de mettre en place des solutions plus efficaces et durables.
- Prévention de la récurrence : En identifiant les causes profondes des problèmes, la méthode des 5 Whys permet de prendre des mesures correctives spécifiques pour éviter la récurrence du problème à l'avenir. En résolvant les problèmes à leur source, les organisations peuvent prévenir les récurrences et améliorer leur performance globale.

### 3.3.4 Identification des causes des problèmes

Appliquons la méthode des 5 Whys sur les problèmes trouvés lors de l'inspection :

TABLEAU 3.1 – Application de la méthode des 5 Whys

	Why #1	Why #2	Why #3	Why #4	Why #5
<b>Problème #1</b>	La présence des gouttelettes d'huile	L'ajout d'un nouveau compresseur lubrifié	L'insuffisance de la quantité d'air comprimé pour les auxiliaires	Un seul compresseur d'air pour les auxiliaires ne suffit pas	Des erreurs de dimensionnement lors de la mise en service de la machine
<b>Problème #2</b>	La présence des gouttelettes d'eau	Des vides inutiles entre les coalesceurs et leur cadres	Absence des joints d'étanchéité	Manque de matériel	L'incompétence de l'équipe responsable de l'installation / maintenance / remplacement des filtres
				Des erreurs lors de l'installation des filtres	
		Des fuites d'eau au niveau de compartiment des filtres	L'absence des joints statiques	Des erreurs lors de la construction de compartiment des filtres	L'incompétence de l'équipe responsable de la construction / maintenance de compartiment des filtres
				Manque de matériel	
		Des erreurs de soudage	L'incompétence de l'équipe responsable de soudage / maintenance de compartiment des filtres		

	<b>Why #1</b>	<b>Why #2</b>	<b>Why #3</b>	<b>Why #4</b>	<b>Why #5</b>
<b>Problème #3</b>	Les impuretés accumulées sur le sol de compartiment et sur les surfaces des filtres	L'absence ou l'insuffisance des opérations de maintenance et de nettoyage dans ces endroits			
		Des fuites d'air au niveau de compartiment de filtres	Des joints inexistantes ou mal ajustés		
			Des erreurs de soudage	L'incompétence de l'équipe responsable de soudage / maintenance de compartiment des filtres	

En utilisant la méthode des 5 Whys, nous avons pu identifier les causes profondes des problèmes en posant la question "pourquoi?" à plusieurs reprises.

Nous avons trouvé des problèmes tels que l'incompétence des opérateurs, le manque de joints d'étanchéité, les erreurs de manipulation et de maintenance, et bien d'autres.

Cette analyse approfondie nous permettra de classer ces problèmes dans différentes catégories en utilisant le diagramme d'Ishikawa.

## 3.4 Diagramme d'Ishikawa

### 3.4.1 Définition

C'est un outil permettant de visualiser et d'identifier de façon ordonnée les causes possibles d'un effet constaté que l'on cherche à analyser, et donc de déterminer les moyens pour y remédier.

Le diagramme « causes / effet » est aussi appelé diagramme en arête de poisson, arbre des causes ou diagramme d'Ishikawa, du nom de son inventeur : le japonais Kaoru Ishikawa. C'est la représentation graphique d'une méthode d'analyse dite méthode des « 5M » (abréviation de Main d'œuvre, Matériel, Matière, Méthodes, Milieu) destinée à mettre en évidence les liens de causalité entre les éléments conduisant à un même effet [7].

### 3.4.2 Principe

1. Définir l'effet : l'effet doit être formulé en termes simples, admis par l'ensemble des participants : que veut-on améliorer, changer, modifier, quel est l'effet attendu ? La transformation doit être mesurable pour apprécier une modification de façon objective. L'effet doit constamment rester visible pour permettre de recentrer la démarche à tout moment.
2. Identifier les causes : c'est la période de recherche d'idées (brainstorming). L'important est de noter, sans classer, les idées venant de toute part. Tout doit être noté de façon visible pendant toute la séance.
3. Les mots-clés : l'émetteur de chaque phrase formulée, doit souligner le ou les mots-clés. Cet état fait souvent resurgir des idées nouvelles qui seront notées à la suite, elles seront traitées à la fin.
4. Les principales familles : pour favoriser la recherche, la méthode des 5M est couramment utilisée. Elle permet d'orienter la réflexion vers les 5 domaines, desquels sont généralement issues les causes. Toute autre organisation mieux adaptée au problème peut, bien entendu, être utilisée.
  - Machines : c'est tout ce qui nécessite un investissement, du matériel, des locaux, du gros outillage.
  - Main d'œuvre : c'est l'ensemble du personnel
  - Méthodes : ce sont les gammes, les modes d'emploi, les notices, les instructions écrites ou non.
  - Matières : c'est tout ce qui est consommable (les matières premières, les fluides, les énergies).
  - Milieu : c'est l'environnement physique et humain. Les conditions de travail, l'ergonomie, les relations, les clients, problèmes de fournisseurs.
5. Tracer le diagramme : le diagramme est tracé en reportant dans l'ordre des idées formulées. Seuls les mots-clés sont indiqués sur les flèches.
6. Choisir : le choix des causes sur lequel va porter l'analyse commence par déterminer les familles (de machine jusqu'à milieu) qui semblent être les plus importantes [7].

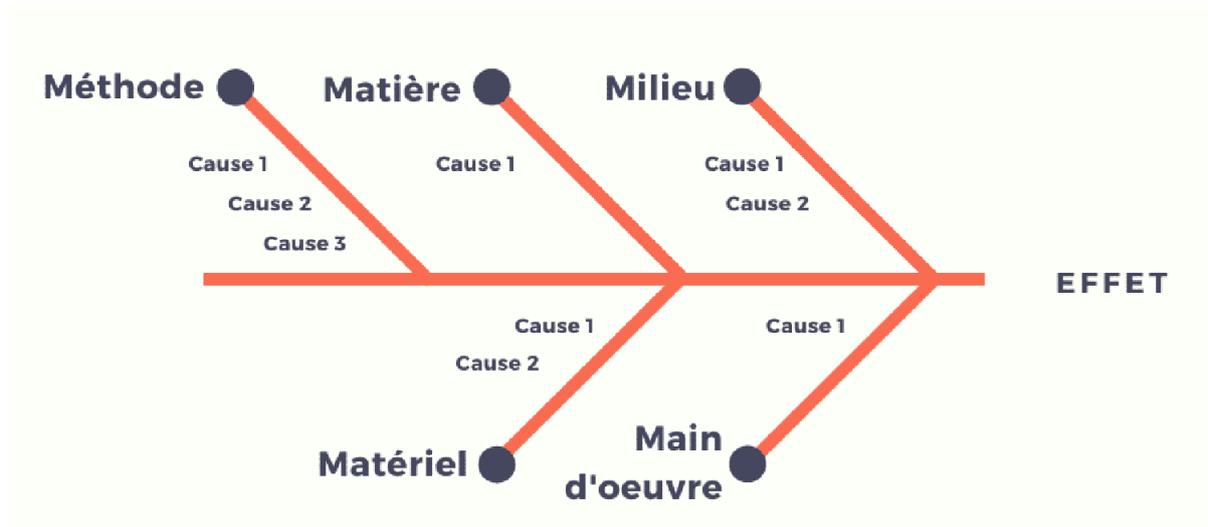


FIGURE 3.7 – Diagramme d'Ishikawa [8].

### 3.4.3 Classification des causes des problèmes

Une fois que nous avons identifié les sources de problèmes à l'aide de la méthode des "5 Whys", nous procéderons à la classification de ces problèmes en utilisant un diagramme d'Ishikawa.

- Les problèmes liés à la main d'œuvre

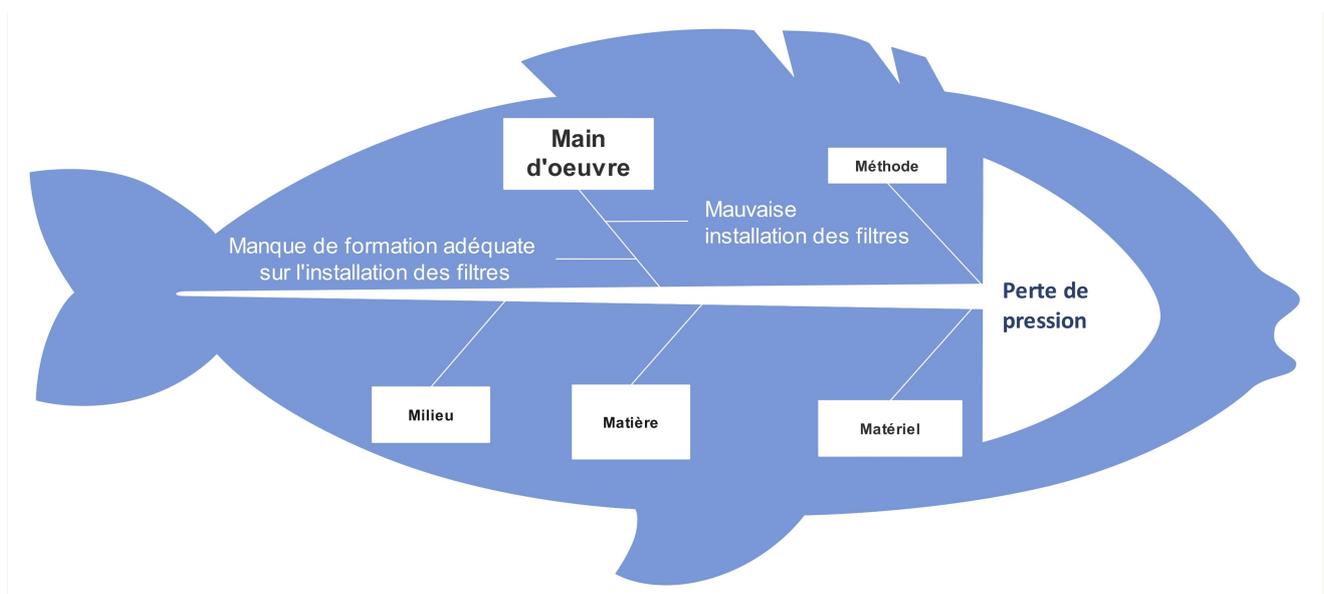


FIGURE 3.8 – Les problèmes liés à la main d'œuvre

## — Les problèmes liés à la méthode

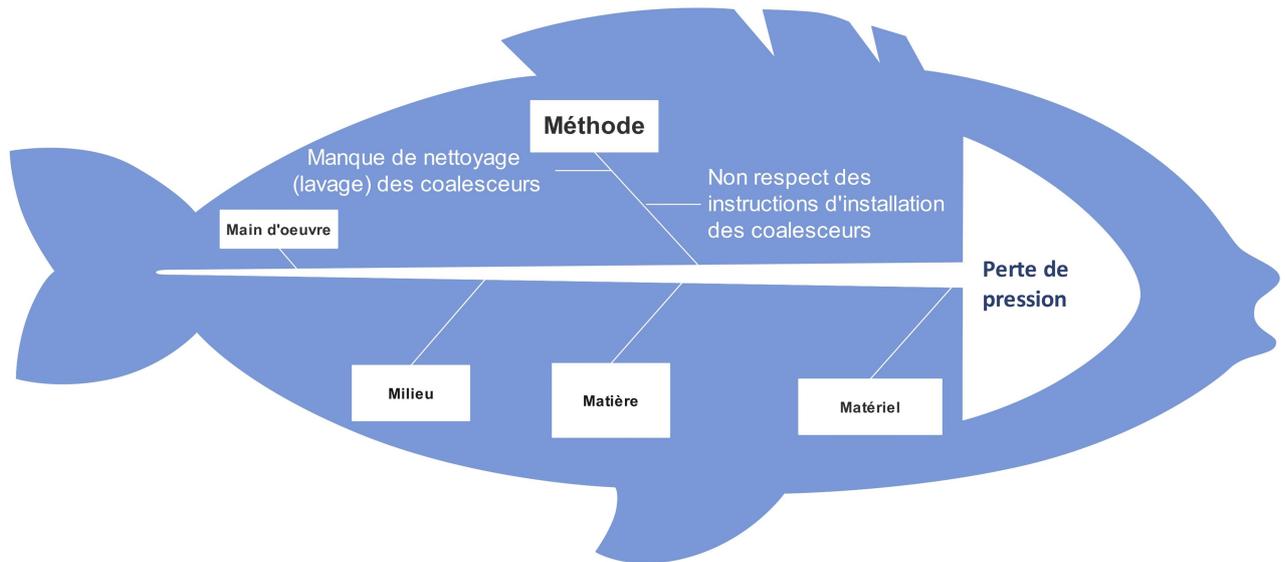


FIGURE 3.9 – Les problèmes liés à la méthode

## — Les problèmes liés au milieu

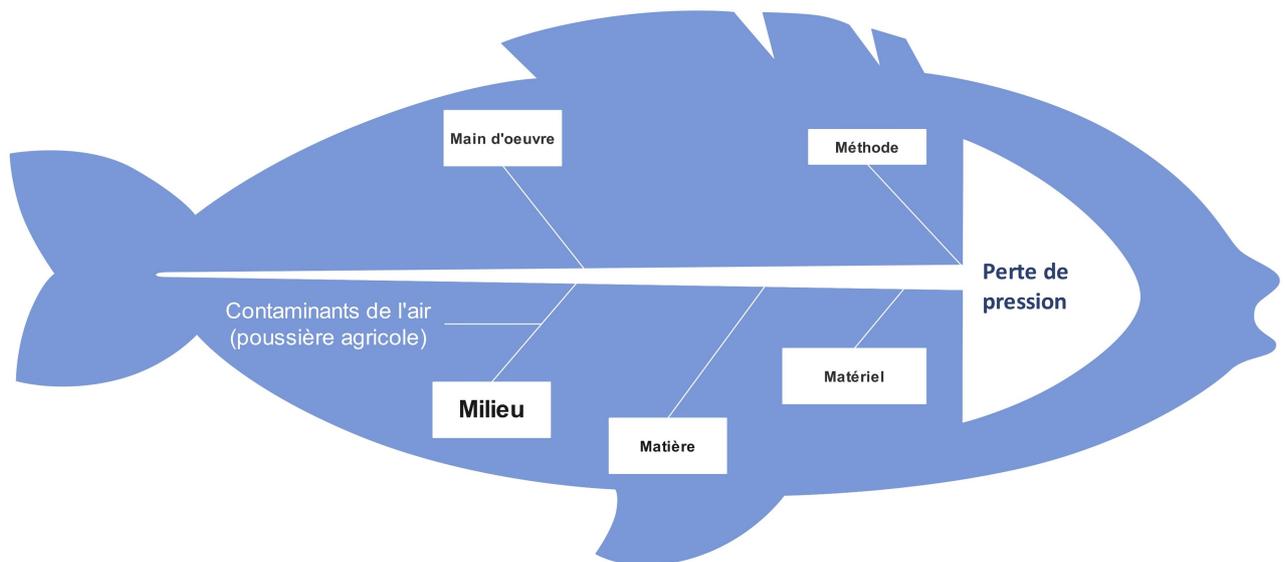


FIGURE 3.10 – Les problèmes liés au milieu

## — Les problèmes liés à la matière

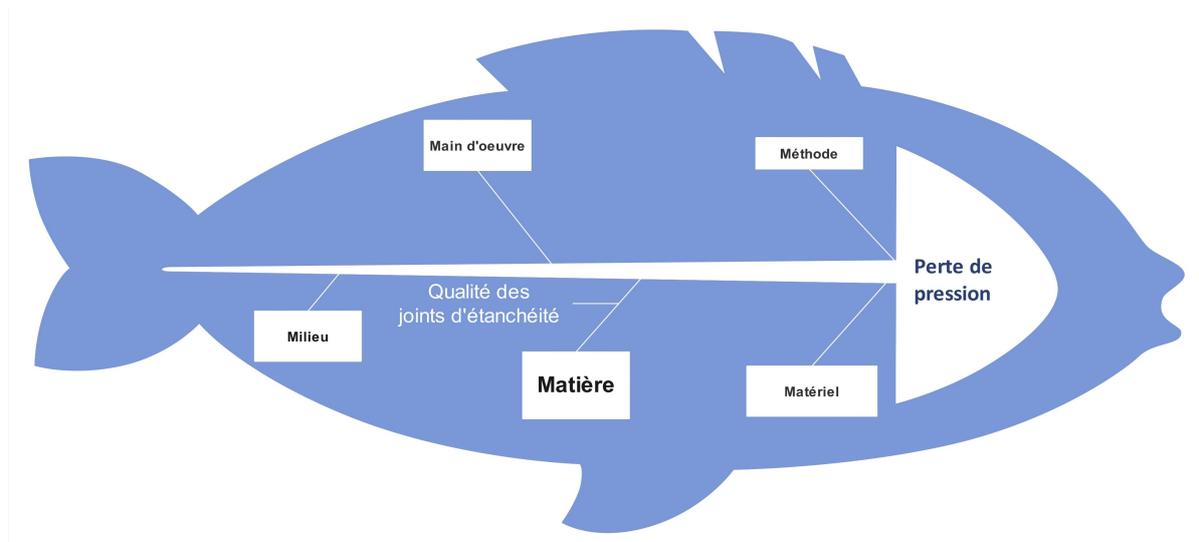


FIGURE 3.11 – Les problèmes liés à la matière

## — Les problèmes liés au matériel

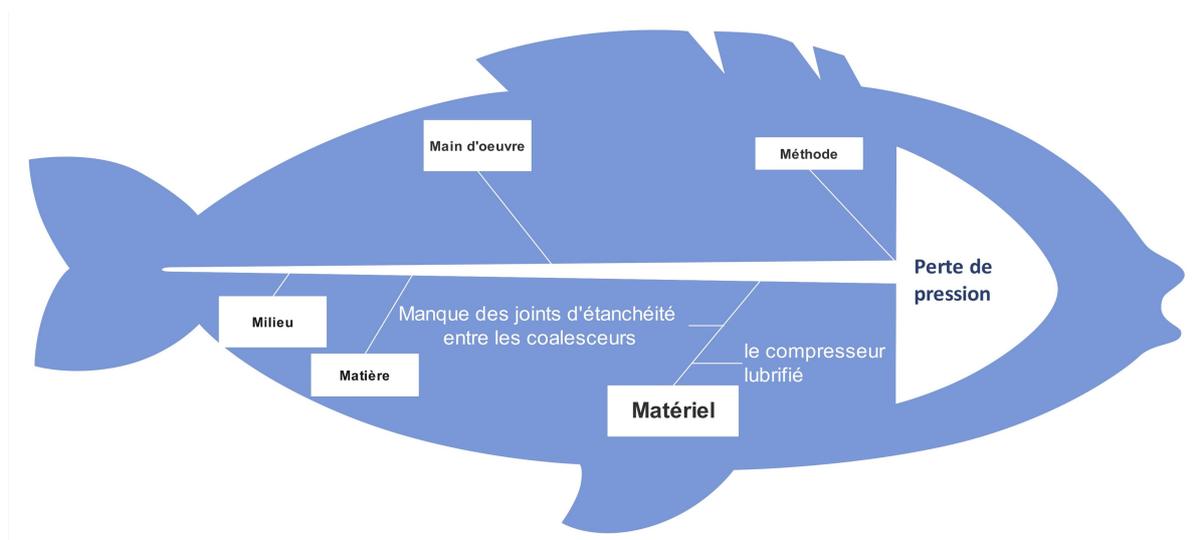


FIGURE 3.12 – Les problèmes liés au matériel

Nous constatons que les problèmes liés à la main d'oeuvre, méthode et matériel représentent 75% de total des problèmes qu'on a indiqué.

Le manque de formation du personnel responsable de l'installation des filtres a un impact négatif sur le système, et les erreurs de l'installation des filtres entraînent des fuites d'air et d'eau, une perte de pression importante et une contamination du système d'admission.

Le manque des opération de nettoyage et de lavage des filtres coalesceurs entraine l'accumulation de la poussière sur la surface des filtres. Il est également important de suivre les instructions et protocoles d'installation des filtres pour garantir un bon fonctionnement.

Le manque de joints d'étanchéité appropriés entre les coalesceurs provoque des fuites d'air et des fuites d'eau, et l'installation d'un compresseur lubrifié pour comprimer l'air du système autonettoyant a provoqué l'entraînement de gouttelettes d'huile et leur dépôt à certains endroits de l'installation.

## 3.5 AMDEC

### 3.5.1 Définition

L'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité est un outil d'analyse qui permet de construire la qualité des produits fabriqués ou des services rendus et favorise la maîtrise de la fiabilité en vue d'abaisser le coût global. Elle est régie par la norme NF X 60-510 [7].

Cette méthode conçue pour l'aéronautique américaine en 1960 : est devenue aujourd'hui :

- Réglementaire dans les études de sûreté des industries « à risque » (aérospatial, nucléaire, chimie).
- Contractuelle (pour les fournisseurs automobiles par exemple).

Etablie en équipe, menée à différents niveaux d'avancement, elle permet de définir les priorités d'actions par la confrontation des opinions. Elle est applicable :

- A un produit : AMDEC produit est l'analyse de la conception d'un produit pour améliorer la qualité et la fiabilité prévisionnelle.
- A un processus : AMDEC processus est l'analyse des opérations de production pour améliorer la qualité de production, par voie de conséquence la qualité du produit ou du service rendu.
- A un système de production : AMDEC moyen de production ou AMDEC machine est l'analyse de fonctionnement du moyen pour améliorer la disponibilité (fiabilité et maintenabilité) et la sécurité. A ce stade est pris en compte la fiabilité opérationnelle (issue des historiques).

### 3.5.2 AMDEC machine

L'étude de l'AMDEC machine vise à [7] :

1. Réduire le nombre de défaillances.
  - Prévention des pannes.
  - Fiabilisation de la conception.
  - Amélioration de la fabrication, du montage, de l'installation.
  - Optimisation de l'utilisation et de la conduite.
  - Amélioration de la surveillance et des tests.
  - Amélioration de la maintenance préventive.
  - Détection précoce des dégradations.
2. Réduire le temps d'indisponibilité après défaillance.
  - Prise en compte de la maintenabilité dès la conception.
  - Amélioration de la testabilité.
  - Aide au diagnostic.
  - Amélioration de la maintenance corrective.
3. Améliorer la sécurité .

### 3.5.3 Tableau de criticité

La démarche qu'il faut suivre est la suivante [7] :

1. Définir la fonction
2. Définir les modes de défaillance : c'est lorsque un système, un processus :
  - ne fonctionne pas
  - ne fonctionne pas au moment prévu
  - ne s'arrête pas au moment prévu
  - fonctionne à un instant non désiré
  - fonctionne, mais les performances requise ne sont pas obtenues
3. Définir les effets de défaillance : sont les effets locaux sur l'élément étudié du système et les effets de la défaillance sur l'utilisateur final du produit ou du service.
4. Définir les causes de défaillances : c'est évidemment ce qui conduit à une défaillance. On définit et on décrit les causes de chaque mode de défaillance considérée comme possible pour pouvoir en estimer la probabilité, en déceler les effets secondaires et prévoir des actions correctives pour la corriger.
5. Déterminer la fréquence, la non détection et la gravité

TABLEAU 3.2 – Les grilles de cotation de F, G et N [7].

<b>FREQUENCE : F</b>	
1	1 défaillance maxi par an
2	1 défaillance maxi par trimestre
3	1 défaillance maxi par mois
4	1 défaillance maxi par semaine
<b>NON DETECTION : N</b>	
1	Visite par opérateur
2	Détection aisée par un agent de maintenance
3	Détection difficile
4	Indécelable
<b>GRAVITE (INDISPONIBILITE) : G</b>	
1	Effet non perceptible par l'utilisateur
2	Gène ou désagrément pour l'utilisateur faible
3	Gène ou désagrément pour l'utilisateur important ou perte partielle de la fonction du produit
4	Perte totale de la fonction du produit

6. Calculer la criticité : la valeur de la criticité est calculée par le produit des niveaux atteints par les critères de cotation.

$$C = F \times N \times G \quad (3.1)$$

TABLEAU 3.3 – Niveau de criticité [7].

NIVEAU DE CRITICITE	ACTIONS CORRECTIVES A ENGAGER
$1 \leq C < 10$ Criticité négligeable	Aucune modification de conception Maintenance corrective
$10 \leq C < 20$ Criticité moyenne	Amélioration des performances de l'élément Maintenance préventive systématique
$20 \leq C < 40$ Criticité élevée	Révision de la conception du sous-ensemble/choix des éléments Surveillance particulière, maintenance préventive conditionnelle
$40 \leq C < 64$ Criticité interdite	Remise en cause complète de la conception

### 3.5.4 Analyse des modes de défaillance

Applicant l'analyse AMDEC :

- Définir les modes, causes et effets des défaillances.
- Définir le mode de détection.
- Calculer la criticité.
- Proposer des actions correctives.
- Calculer la nouvelle criticité.

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

TABLEAU 3.4 – Application de la méthode AMDEC

AMDEC MACHINE – ANALYSE DES MODES DE DÉFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITÉ						Criticité				Action Corrective	Nouvelle criticité			
Élément	Fonction	Mode de défaillance	Cause de la défaillance	Effet de la défaillance	Détection	F	G	N	C		F	G	N	C'
Le compartiment des filtres	Contenir et protéger les filtres	La présence des gouttelettes d'eau	-Fuites d'eau	-Corrosion -Colmatage des filtres (perte de pression)	Contrôle visuel	2	3	3	18	APE : Installation correcte des coalesceurs	1	3	2	6
		L'accumulation de la poussière	-Fuites d'air -Manque de nettoyage	-Colmatage des filtres (perte de pression)	Contrôle visuel	2	3	2	12	MPS : nettoyage du compartiment	1	3	2	6
		La présence des gouttelettes d'huile	-Compresseur lubrifié	-Colmatage des filtres (perte de pression)	Contrôle visuel	2	3	3	18	APE : Remplacer le compresseur lubrifié par un autre non-lubrifié	1	3	2	6

APE : Amélioration des performances de l'élément.

MPS : Maintenance préventive systématique.

Pour conclure notre étude AMDEC sur le système d'admission d'air, nous avons pu identifier différents modes de défaillances propres au système.

Après avoir étudié ces défaillances avec leurs causes et effets, nous avons pu proposer des solutions sous formes d'actions correctives qui ont permis d'abaisser le niveau de criticité de chaque défaillance.

## 3.6 Concept FMD

### 3.6.1 La fiabilité du système

#### Définition

Aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant un temps donné [7].

Caractéristique d'un bien exprimée par la probabilité qu'il accomplisse une fonction requise dans des conditions données pendant un temps donné [7].

#### Mean Time Between Failures

Le MTBF est une mesure qui décrit le temps moyen nécessaire à un composant spécifique pour tomber en panne. Le MTBF ne mesure pas le temps pendant lequel un composant est en attente de réparation ou en cours de réparation ; il mesure plutôt uniquement le temps pendant lequel le composant est en fonctionnement. Il s'agit d'un paramètre important à prendre en compte dans le processus de prise de décision lors de l'investissement dans de nouveaux équipements. Plus le MTBF est élevé, plus la fiabilité du produit est élevée [9].

#### Calcul de MTBF par la méthode numérique

La procédure que nous avons suivie est résumée dans les étapes suivantes :

1. Préparation des données nécessaires pour tracer le nuage de points, qui sont le temps de fonctionnement (TBF) et la fonction de distribution (Fi).
2. Tracer le nuage de points.
3. Tracer la courbe de Weibull.
4. Détermination des équations de la distribution de Weibull.
5. Calcul de MTBF.

#### Calcul de MTBF par la méthode graphique

1. Préparation des données : détermination des couples  $(t_i, F_i)$  par la méthode des rangs médians, des rangs moyens, ou la méthode des rangs bruts.

— Si

$$n \leq 20$$

on utilise la méthode des rangs médians :

$$F_i = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (3.2)$$

— Si

$$20 \leq n \leq 50$$

on utilise la méthode des rangs moyens :

$$F_i = \frac{i}{n + 1} \quad (3.3)$$

— Si

$$n \geq 50$$

on utilise la méthode des rangs bruts :

$$F_i = \frac{i}{n} \quad (3.4)$$

## 2. Tracé du nuage de points sur le papier de Weibull.

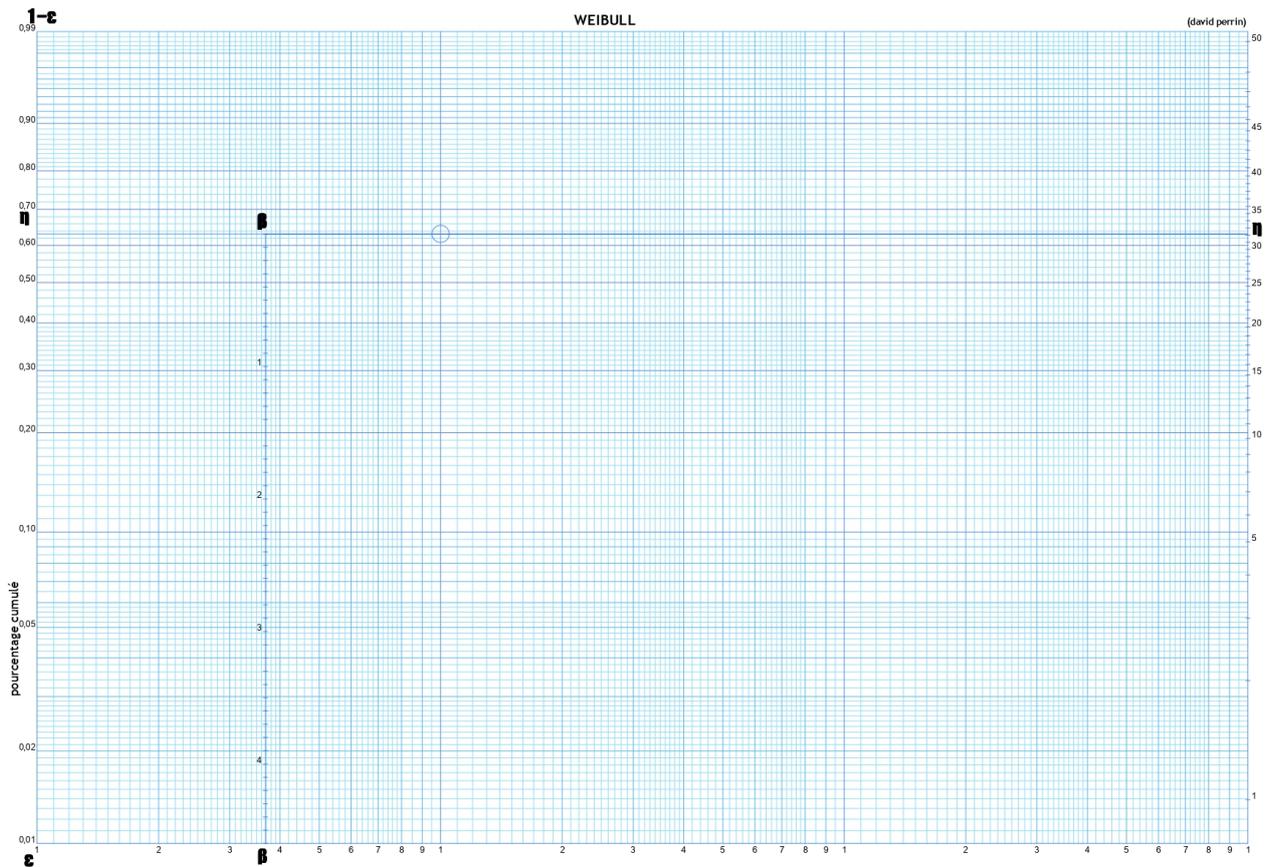


FIGURE 3.13 – Papier de Weibull [7].

## 3. Tracé de la droite de Weibull D1

4. Détermination des paramètres de la loi  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $\gamma$ .

- Le fait d'obtenir directement une droite D1 sans faire de redressements indique que  $\gamma=0$  (paramètre de position)
- La droite D2 // à D1, passant par l'origine coupe l'axe « b » en le point  $\beta$ . C'est la valeur du paramètre de forme.
  - Si  $\beta > 1$ , le taux de défaillance est croissant, caractéristique de la zone de vieillesse.
    - 1.5 <  $\beta$  < 2.5 : Fatigue.
    - 3 <  $\beta$  < 4 : Usure, corrosion.
  - Si  $\beta = 1$ , le taux de défaillance est constant, caractéristique de la zone de maturité.
  - Si  $\beta < 1$ , le taux de défaillance est décroissant, caractéristique de la zone de jeunesse.
- l'intersection de la droite D1 avec l'axe des temps donne la valeur du paramètre d'échelle  $\eta$ .

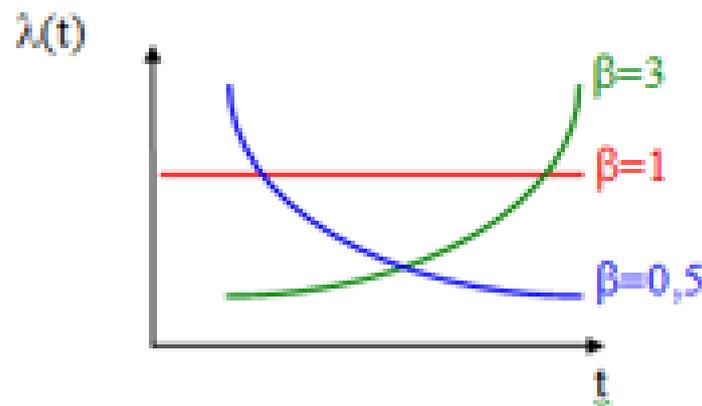


FIGURE 3.14 – La variation de taux de défaillance en fonction de temps et de paramètre de forme [7].

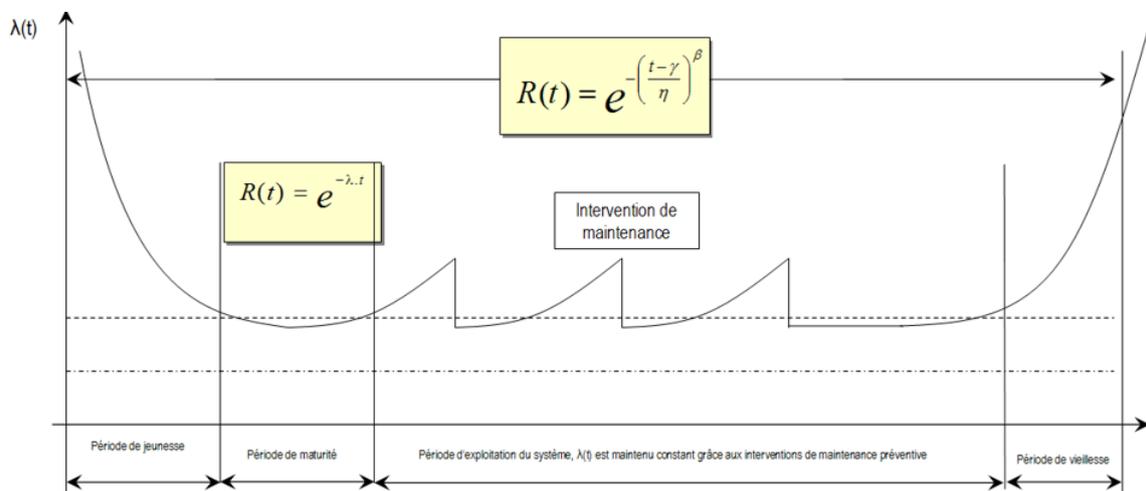


FIGURE 3.15 – La variation de taux de défaillance en fonction de temps [7].

##### 5. Détermination des équations de la loi de Weibull.

Loi de fiabilité :

$$R(t) = \exp \left( - \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right) \quad (3.5)$$

Densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left( - \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right) \quad (3.6)$$

Fonction de répartition :

$$F(t) = 1 - \exp \left( - \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right) \quad (3.7)$$

Taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (3.8)$$

$\eta$ ,  $\gamma$  et  $\beta$  sont respectivement les paramètres d'échelle, de position et de forme.

6. Calcul de la MTBF et l'écart type.

A partir de la valeur de paramètre de forme  $\beta$ , on tire les valeurs de A et B à partir du tableau suivant.

$\beta$	A	B	$\beta$	A	B	$\beta$	A	B
0,20	120	1901	1,50	0,9027	0,613	4	0,9064	0,254
0,25	24	199	1,55	0,8994	0,593	4,1	0,9077	0,249
0,30	9,2605	50,08	1,60	0,8966	0,574	4,2	0,9089	0,244
0,35	5,0291	19,98	1,65	0,8942	0,556	4,3	0,9102	0,239
0,40	3,3234	10,44	1,70	0,8922	0,540	4,4	0,9114	0,235
0,45	2,4786	6,46	1,75	0,8906	0,525	4,5	0,9126	0,230
0,50	2	4,47	1,80	0,8893	0,511	4,6	0,9137	0,226
0,55	1,7024	3,35	1,85	0,8882	0,498	4,7	0,9149	0,222
0,60	1,5046	2,65	1,90	0,8874	0,486	4,8	0,9160	0,218
0,65	1,3663	2,18	1,95	0,8867	0,474	4,9	0,9171	0,214
0,70	1,2638	1,85	2	0,8862	0,463	5	0,9182	0,210
0,75	1,1906	1,61	2,1	0,8857	0,443	5,1	0,9192	0,207
0,80	1,1330	1,43	2,2	0,8856	0,425	5,2	0,9202	0,203
0,85	1,0880	1,29	2,3	0,8859	0,409	5,3	0,9213	0,200
0,90	1,0522	1,17	2,4	0,8865	0,393	5,4	0,9222	0,197
0,95	1,0234	1,08	2,5	0,8873	0,380	5,5	0,9232	0,194
1	1	1	2,6	0,8882	0,367	5,6	0,9241	0,191
1,05	0,9603	0,934	2,7	0,8893	0,355	5,7	0,9251	0,188
1,10	0,9649	0,878	2,8	0,8905	0,344	5,8	0,9260	0,185
1,15	0,9517	0,830	2,9	0,8917	0,334	5,9	0,9269	0,183
1,20	0,9407	0,787	3	0,8930	0,325	6	0,9277	0,180
1,25	0,9314	0,750	3,1	0,8943	0,316	6,1	0,9286	0,177
1,30	0,9236	0,716	3,2	0,8957	0,307	6,2	0,9294	0,175
1,35	0,9170	0,687	3,3	0,8970	0,299	6,3	0,9302	0,172
1,40	0,9114	0,660	3,4	0,8984	0,292	6,4	0,9310	0,170
1,45	0,9067	0,635	3,5	0,8997	0,285	6,5	0,9318	0,168
			3,6	0,9011	0,278	6,6	0,9325	0,166
			3,7	0,9025	0,272	6,7	0,9333	0,163
			3,8	0,9038	0,266	6,8	0,9340	0,161
			3,9	0,9051	0,260	6,9	0,9347	0,160

FIGURE 3.16 – tableau des paramètres de weibull

Le MTBF et l'écart type seront calculés par les formules suivantes :

$$MTBF = A \times \eta + \gamma \quad (3.9)$$

$$\sigma = B \times \eta \quad (3.10)$$

### 3.6.2 La maintenabilité du système

#### Définition

Dans les conditions d'utilisation données pour lesquelles il a été conçu, la maintenabilité est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits [9].

#### Mean time to repair

La maintenabilité peut se caractériser par sa MTTR qui peut être calculée par la formule suivante :

$$MTTR = \frac{\text{Temps total d'intervention pour les pannes}}{\text{Nombre de pannes}}$$

Le taux instantané de réparation :

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

### 3.6.3 La disponibilité de la machine

#### Définition

Aptitude d'un bien, sous les aspects combinés de sa fiabilité, maintenabilité et de l'organisation de maintenance à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions de temps déterminées [9].

C'est une caractéristique d'un système réparable mesurée par la probabilité que le système fonctionne correctement à un instant quelconque, lorsqu'il est utilisé et entretenu dans les conditions spécifiées [9].

#### La disponibilité D

La disponibilité sera calculée par la formule suivante :

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

### 3.6.4 Etude de fiabilité du système

#### Calcul de MTBF par la méthode numérique

Le tableau suivant présente l'historique de fonctionnement du système d'admission d'air de la centrale pendant les années 2020 et 2021.

TABLEAU 3.5 – Les TBF du système

Panne	1	2	3	4	5	6
<b>TBF (heure)</b>	480	3072	3192	3960	1032	4968
<b>TTR (heure)</b>	72	456	96	96	96	192

1. Le choix de la méthode de détermination des couples  $(t_i, F_i)$  dépend du nombre de pannes, dans le cas présent il y a 6 pannes, donc la méthode à suivre est la méthode des rangs médians.

$$F_i = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (3.11)$$

Les couples  $(t_i, F_i)$  sont classés par ordre croissant et représentés dans le tableau ci-dessous :

TABLEAU 3.6 – Les TBF du système classés par ordre croissant

Panne	TBF (heure)	$F_i$
1	480	0.11
2	1032	0.27
3	3072	0.42
4	3192	0.58
5	3960	0.73
6	4968	0.89

2. Tracé du nuage de points : nous utilisons Excel pour présenter le nuage des points. Pour tracer ce nuage de points, nous avons effectué certains développements mathématiques en commençant par la fonction de distribution à trois paramètres  $F(t)$ .

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right) \quad (3.12)$$

$$\ln(1 - F(t)) = -\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta \quad (3.13)$$

Après simplification nous obtenons :

$$\ln(-\ln(1 - F(t))) = \beta \ln(t) - \beta \ln(\eta) \quad (3.14)$$

nous obtenons une équation

$$Y = ax + b \quad (3.15)$$

grâce à laquelle nous avons pu calculer le couple  $(X, Y)$ .

$$X = \ln(TBF) \quad (3.16)$$

$$Y = \ln(-\ln(1 - F(t))) \quad (3.17)$$

Ensuite, nous avons placé le couple (X, Y) dans un fichier Excel, puis nous avons tracé le nuage de points en utilisant les équations (4.13) et (4.14)

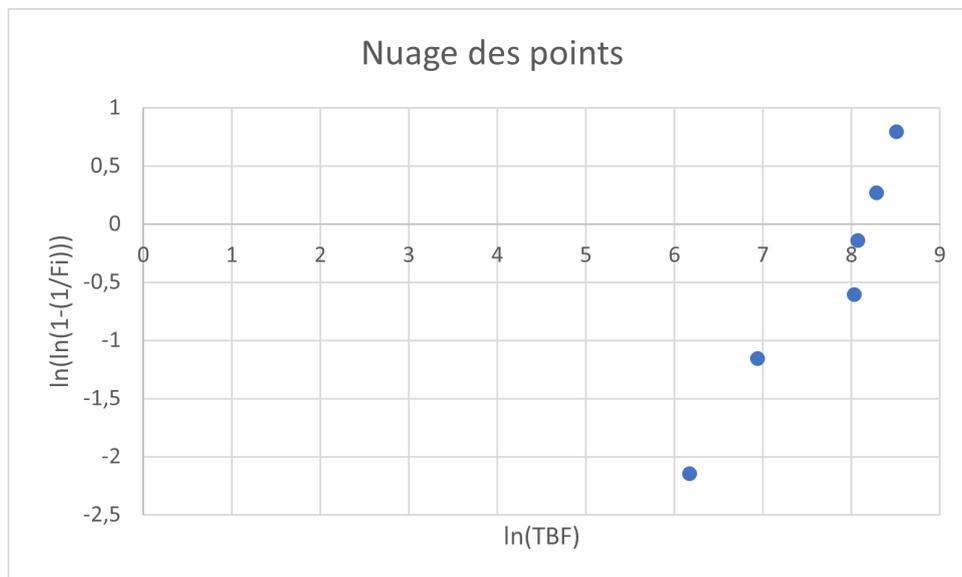


FIGURE 3.17 – Nuage des points

### 3. Tracé de la droite de Weibull

Après avoir tracé le nuage de points, nous avons tracé la courbe de Weibull et nous avons obtenu l'équation suivante :

$$Y = 1.1122x - 9.0271 \quad (3.18)$$

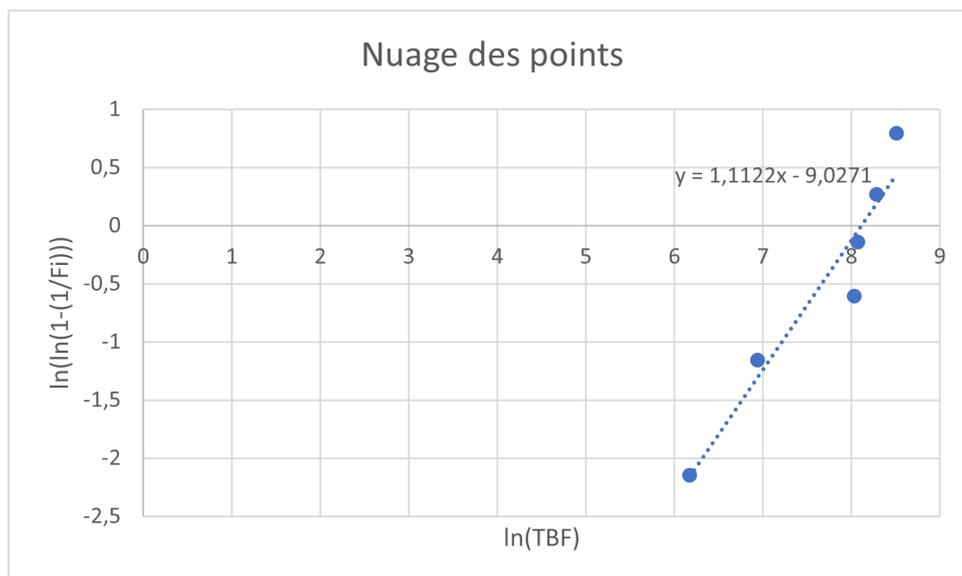


FIGURE 3.18 – La droite de Weibull

En effectuant une identification entre les équations (4.11), (4.14) et (4.15) :

$$\beta \ln(t) - \beta \ln(\eta) = 1.1122x - 9.0271 \quad (3.19)$$

nous avons déterminé le paramètre de forme  $\beta$  :

$$\beta = 1.1122$$

et le paramètre d'échelle  $\eta$

$$\beta \ln(\eta) = -9.0271$$

$$\eta = \exp\left(\frac{9.0271}{1.1122}\right)$$

$$\eta = 3350$$

Les paramètres de la loi de Weibull sont donc :

$$\gamma = 0$$

$$\beta = 1.1122$$

$$\eta = 3350$$

#### 4. Détermination des équations de la loi de Weibull.

Loi de fiabilité :

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right) \quad (3.20)$$

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{3350}\right)^{1.1122}\right) \quad (3.21)$$

Densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right) \quad (3.22)$$

$$f(t) = \frac{1.1122}{3350} \left(\frac{t}{3350}\right)^{0.1122} \exp\left(-\left(\frac{t}{3350}\right)^{1.1122}\right) \quad (3.23)$$

Fonction de répartition :

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right) \quad (3.24)$$

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{3350}\right)^{1.1122}\right) \quad (3.25)$$

Taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (3.26)$$

$$\lambda(t) = \frac{1.1122}{3350} \left(\frac{t}{3350}\right)^{0.1122} \quad (3.27)$$

## 5. Calcul de MTBF et de l'écart type

Pour déterminer la valeur du MTBF, nous avons déterminé les valeurs de A et B par une interpolation linéaire à partir du tableau 3.5 pour la valeur du paramètre de forme  $\beta = 1.1122$  :

$$A = 0.9617$$

$$B = 0.866$$

Le MTBF sera :

$$MTBF = A\eta + \gamma = 0.9617 \times 3350$$

$$MTBF = 3222 \text{ heures} = 134 \text{ jours}$$

Et l'écart type :

$$\sigma = B\eta = 0.866 \times 3350$$

$$\sigma = 2901 \text{ heures} = 121 \text{ jours}$$

Ainsi, nous pouvons calculer pour  $t = MTBF = 3222$  heures.

La fiabilité

$$R(t = MTBF) = \exp\left(-\left(\frac{3222}{3350}\right)^{1.1122}\right)$$

$$R(t = MTBF) = 38,38\%$$

La densité de probabilité

$$f(t = MTBF) = \frac{1.1122}{3350} \left(\frac{3222}{3350}\right)^{0.1122} \exp\left(-\left(\frac{3222}{3350}\right)^{1.1122}\right)$$

$$f(t = MTBF) = 1.27 \times 10^{-4}$$

La fonction de répartition

$$F(t = MTBF) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{3222}{3350}\right)^{1.1122}\right)$$

$$F(t = MTBF) = 61.62\%$$

Le taux de défaillance

$$\lambda(t = MTBF) = \frac{1.1122}{3350} \left(\frac{3222}{3350}\right)^{0.1122}$$

$$\lambda(t = MTBF) = 0.000331 \text{ panne/heure}$$

Nous pouvons également tracer la courbe de la fiabilité en fonction du temps

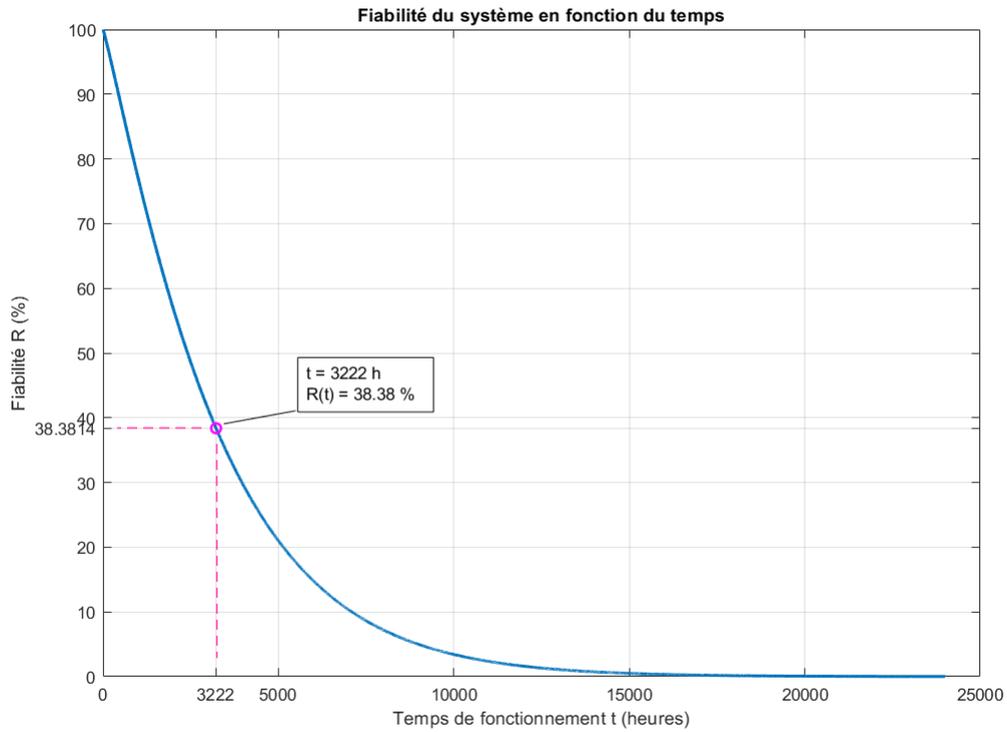


FIGURE 3.19 – La variation de la fiabilité en fonction du temps

### Calcul de MTBF par la méthode graphique

1. Tracé du nuage de points sur le papier de Weibull.

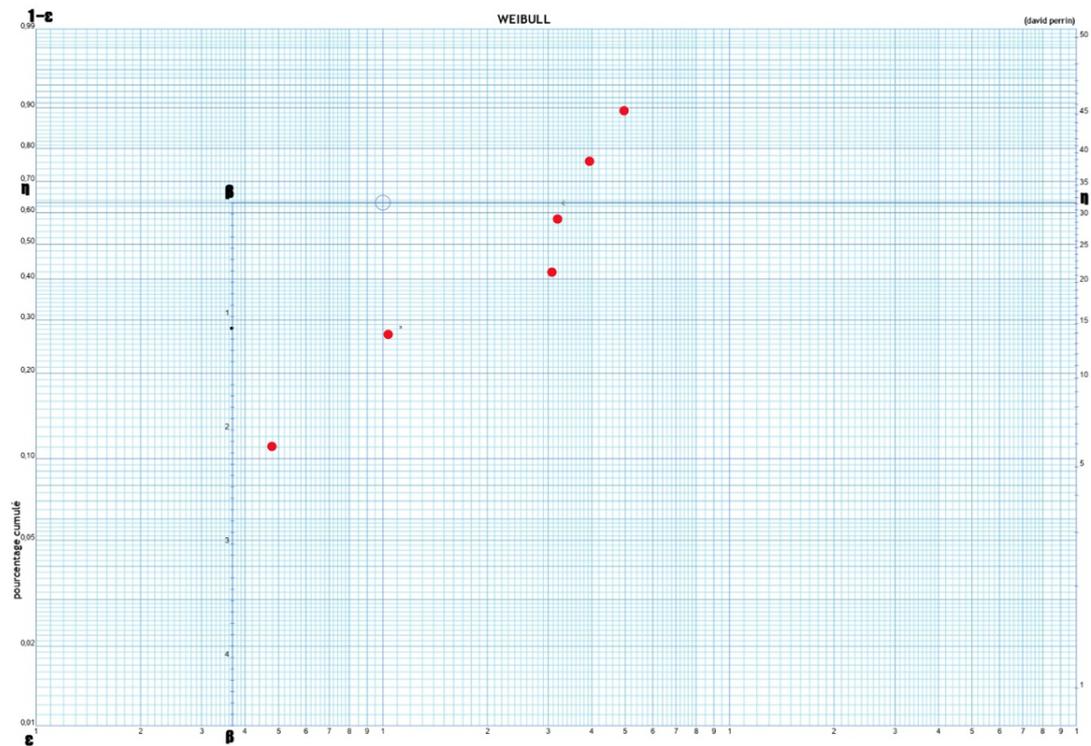


FIGURE 3.20 – Nuage des points

2. Tracé de la droite de Weibull D1

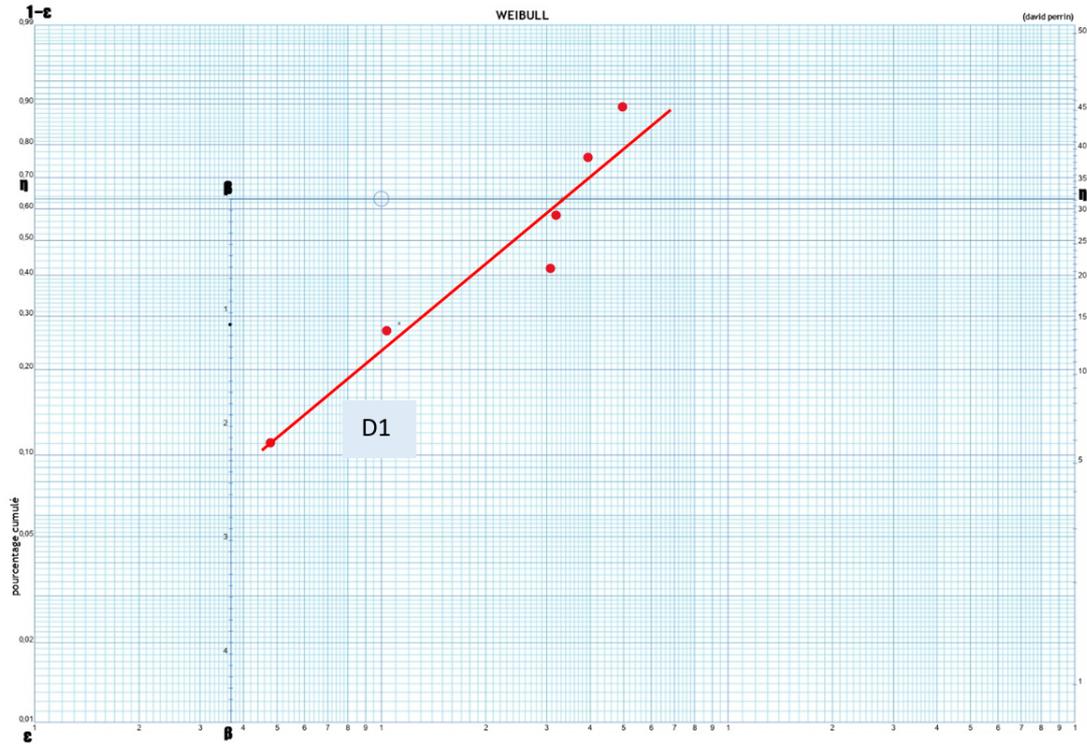


FIGURE 3.21 – La droite de Weibull

3. Détermination des paramètres de la loi  $\beta$ ,  $\eta$  et  $\gamma$ .

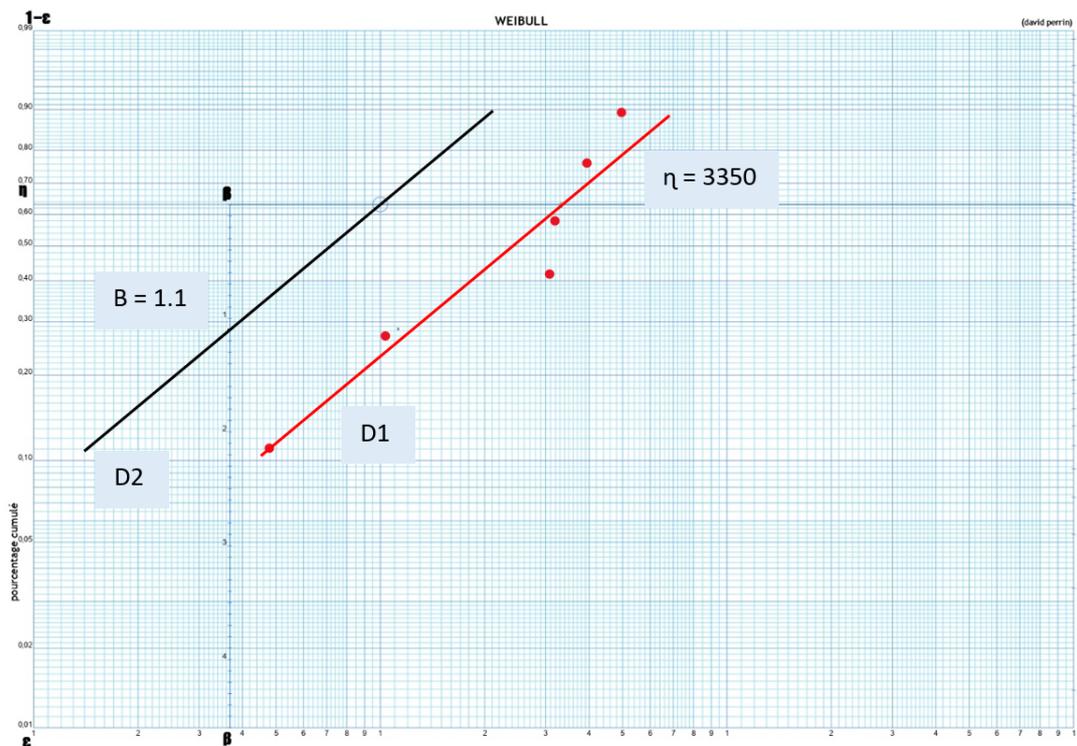


FIGURE 3.22 – Détermination des paramètres de la loi

## 4. Détermination des équations de la loi de Weibull.

Loi de fiabilité :

$$R(t) = \exp \left( - \left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta \right) \quad (3.28)$$

$$R(t) = \exp \left( - \left( \frac{t}{3350} \right)^{1.1} \right) \quad (3.29)$$

Densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left( - \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right) \quad (3.30)$$

$$f(t) = \frac{1.1}{3350} \left( \frac{t}{3350} \right)^{0.1} \exp \left( - \left( \frac{t}{3350} \right)^{1.1} \right) \quad (3.31)$$

Fonction de répartition :

$$F(t) = 1 - \exp \left( - \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right) \quad (3.32)$$

$$F(t) = 1 - \exp \left( - \left( \frac{t}{3350} \right)^{1.1} \right) \quad (3.33)$$

Taux de défaillance

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (3.34)$$

$$\lambda(t) = \frac{1.1}{3350} \left( \frac{t}{3350} \right)^{0.1} \quad (3.35)$$

## 5. Calcul de MTBF et de l'écart type

Pour déterminer la valeur du MTBF, nous avons déterminé les valeurs de A et B à partir du tableau pour la valeur du paramètre de forme  $\beta = 1.1$  :

$$A = 0.9649$$

$$B = 0.878$$

Le MTBF sera :

$$MTBF = A\eta + \gamma = 0.9469 \times 3350$$

$$MTBF = 3232 \text{ heures} = 135 \text{ jours}$$

Et l'écart type :

$$\sigma = B\eta = 0.878 \times 3350$$

$$\sigma = 2941 \text{ heures} = 123 \text{ jours}$$

Ainsi, nous pouvons calculer pour :  $t = MTBF = 3232$  heures.

La fiabilité

$$R(t = MTBF) = \exp \left( - \left( \frac{3232}{3350} \right)^{1.1} \right)$$

$$R(t = MTBF) = 38,24\%$$

La densité de probabilité

$$f(t = MTBF) = \frac{1.1}{3350} \left( \frac{3232}{3350} \right)^{0.1} \exp \left( - \left( \frac{3232}{3350} \right)^{1.1} \right)$$

$$f(t = MTBF) = 1.25 \times 10^{-4}$$

La fonction de répartition

$$F(t = MTBF) = 1 - \exp \left( - \left( \frac{3232}{3350} \right)^{1.1} \right)$$

$$F(t = MTBF) = 61.76\%$$

Le taux de défaillance

$$\lambda(t = MTBF) = \frac{1.1}{3350} \left( \frac{3232}{3350} \right)^{0.1}$$

$$\lambda(t = MTBF) = 0.0003272 \text{ panne/heure}$$

Nous pouvons également tracer la courbe de la fiabilité en fonction du temps

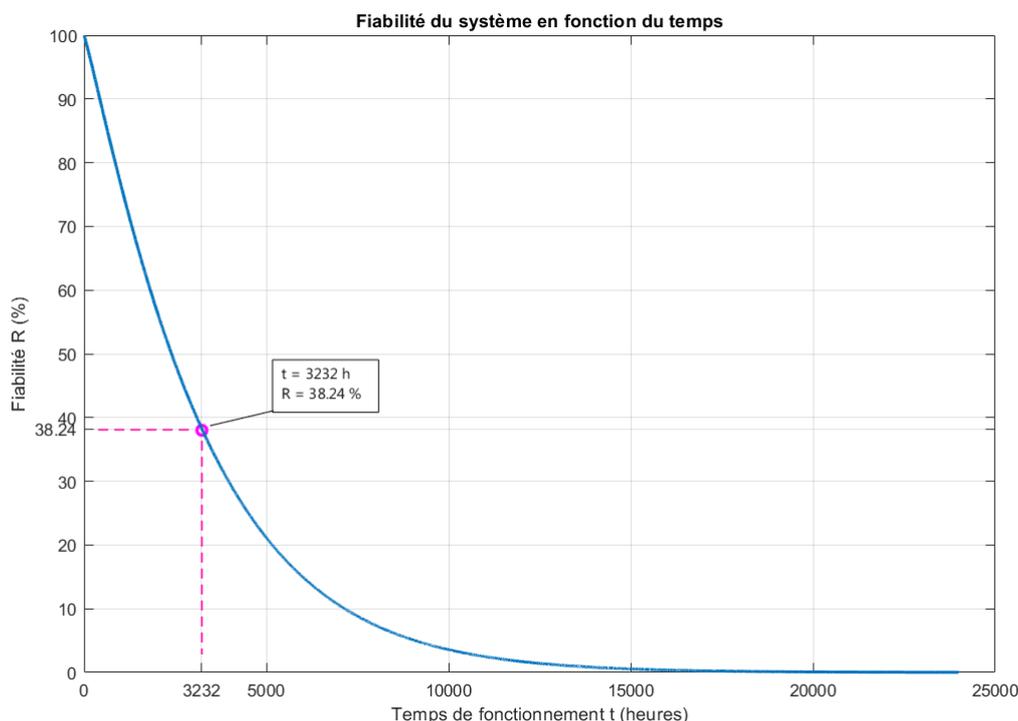


FIGURE 3.23 – La variation de la fiabilité en fonction du temps

La méthode graphique et la méthode numérique nous donnent pratiquement des résultats similaires.

### 3.6.5 Etude de la maintenabilité de système

Les TTR sont représentés dans le tableau suivant :

TABLEAU 3.7 – Les TTR du système

Panne	1	2	3	4	5	6
TTR (heure)	72	456	96	96	96	192

Le MTTR est

$$MTTR = \frac{72 + 456 + 96 + 96 + 96 + 192}{6}$$

$$MTTR = 168 \text{ heures} = 7 \text{ jours}$$

Le taux de réparation est :

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

$$\mu = 0.00056 \text{ réparation/heure}$$

### 3.6.6 Etude de la disponibilité du système

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

Nous remplaçons dans la formule par le MTBF que nous avons déterminé numériquement :

$$D = \frac{3222}{3222 + 168}$$

$$D = 95.04\%$$

Nous remplaçons dans la formule par le MTBF que nous avons déterminé graphiquement :

$$D = \frac{3232}{3232 + 168}$$

$$D = 95.06\%$$

### 3.7 Interprétations des résultats obtenus

Les principaux résultats sont représentés dans le tableau suivant :

TABLEAU 3.8 – Principaux résultats

MTBF (hrs)	MTTR (hrs)	$\beta$	$\eta$ (hrs)	R(t)(%)	D (%)
3232	168	1.1	3350	38	95

Un MTBF de 3232 heures signifie qu'en moyenne, notre système fonctionne sans connaître de panne ou de défaillance pendant environ 3232 heures.

Cette période est considérée comme très courte en comparaison avec le MTBF théorique qui est de 24000 heures. cette valeur indique une période courte pendant laquelle le système fonctionne sans interruption majeure. Cela suggère que notre système a une mauvaise résistance aux pannes et offre une certaine instabilité opérationnelle.

Une fiabilité de 38% pour notre système indique que le système fonctionne correctement et sans défaillance pendant environ 38% de sa durée de vie théorique. Cela signifie que le système peut connaître des pannes ou des dysfonctionnements environ 62% du temps.

Une fiabilité de 38% est relativement basse, ce qui suggère que des améliorations significatives sont nécessaires pour assurer un fonctionnement plus fiable et stable du système.

Le MTTR de 168 heures indique qu'il faut en moyenne 168 heures pour réparer le système après une panne ou un dysfonctionnement.

Cette durée correspond à la durée théorique estimée pour le remplacement des filtres, ce qui indique qu'elle est appropriée et conforme aux attentes.

La valeur de beta de 1.1 indique que notre système se situe dans la zone de vieillissement et le début de la zone de fatigue. Cela implique que le système a tendance de se détériorer avec le temps, entraînant une augmentation des défaillances au fur et à mesure qu'il vieillit. Ceci suggère également une diminution de la fiabilité au fil du temps.

La disponibilité de 95% est considérée comme élevée, et si nous la comparons à la disponibilité théorique de la machine qui est de 99.3% (calculée à partir des MTBF et MTTR théoriques de 24000 heures et 168 heures respectivement), nous pouvons constater que la différence est très faible. Cependant, il est important de noter que cette valeur élevée de la disponibilité ne reflète pas les problèmes actuels rencontrés au niveau de la centrale.

D'un point de vue mathématique, même avec un MTBF faible comparant au MTBF théorique (3232 heures et 24000 heures respectivement), la grande différence entre le MTBF calculé et le MTTR conduit à une disponibilité élevée. D'un point de vue pratique, lorsque la perte de pression maximale des filtres cartouches qui est de 1000Pa est atteinte, au lieu de les remplacer immédiatement, la centrale choisit de laisser la machine opérer avec des filtres colmatés mais limiter la production d'électricité à environ 150 MW au lieu des 240 MW habituels. D'un point de vue économique, la limitation de production, des coûts d'achat des filtres et les arrêts de production pendant les périodes des remplacements des filtres ont un impact significatif sur l'économie de l'entreprise.

Donc, tout à fait, la machine est disponible, mais avec une limitation de production d'électricité et avec des coûts supplémentaires.

## 3.8 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de déterminer les causes profondes du problème lié au système d'admission d'air de la centrale électrique Boufark II. Grâce à l'inspection de la centrale, nous avons pu observer directement les composants et identifier les causes potentielles tel que la présence de l'eau et de la poussière.

L'application de la méthode des 5 Whys nous a permis d'identifier les causes profondes du problème, tels que des erreurs de maintenance et le manque de formation de personnels.

Le diagramme d'Ishikawa nous a permis de classer ces causes en catégories spécifiques, et a constater que les problèmes liés à la main d'œuvre, méthode et matériel représentent 75% des causes du problème.

L'analyse AMDEC nous a fourni une évaluation des défaillances, leurs causes et leurs effets. Avec des actions correctives nous pouvons ramener notre système à un bon état en réduisant la criticité des risques à une valeur de 6.

Nous avons également calculé la fiabilité et la disponibilité du système qui sont 38% et 95% respectivement, et nous avons déduit leur effet sur l'économie de l'entreprise en terme de limitation de production, remplacements des filtres et arrêts de la machine.

Ces résultats fournissent des informations essentielles pour prendre des décisions éclairées en vue d'améliorer la performance, la fiabilité et la disponibilité du système d'admission d'air de la centrale électrique Boufarik II. Ils serviront de base solide pour la formulation des recommandations spécifiques et la mise en œuvre de mesures correctives visant à optimiser le fonctionnement du système.

# Conclusion générale

Au terme de ce projet de fin d'études, nous avons exploré en profondeur le système d'admission d'air de la turbine à gaz de la centrale électrique Boufarik II. Notre objectif principal était d'identifier les différentes sources et causes du problème lié au système d'admission d'air de la turbine à gaz.

Dans un premier temps, nous avons réalisé une présentation générale de General Electric, de SPE Sonelgaz et de la centrale électrique Boufarik II. Ensuite, Nous avons formulé la problématique pour mettre en évidence les défis spécifiques auxquels le système d'admission d'air est confronté.

Ensuite, nous avons procédé à une présentation détaillée de système d'admission d'air, mettant en évidence son rôle crucial dans le fonctionnement de la turbine à gaz. Nous avons examiné les caractéristiques de filtration ainsi que les différents composants d'un système de filtration et leur fonctionnement pour assurer une admission d'air de qualité.

L'inspection de la centrale nous a fourni des informations précieuses sur l'état du système. En analysant ces résultats, nous avons identifié des problèmes potentiels, tels que la présence des gouttelettes d'eau et de la poussière, qui peuvent affecter le bon fonctionnement du système d'admission d'air.

Pour approfondir notre analyse, nous avons utilisé des outils tels que la méthode des 5 Whys et le diagramme d'Ishikawa. Ces méthodes nous ont permis d'identifier les causes profondes des problèmes, notamment le manque de formation du personnel, les erreurs d'installation des filtres et les problèmes matériels tels que le manque de joints d'étanchéité.

L'application de l'AMDEC nous a aidé à évaluer les risques associés à ces problèmes, à définir des actions correctives appropriées et à diminuer la criticité de ces risques.

Enfin, nous avons pu déterminer la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité du système. cela nous a aidé à comprendre l'impact significatif de ces problèmes sur la fiabilité du système et sur l'économie de l'entreprise.

**Perspectives :**

De nombreux travaux futurs pourraient être poursuivis et basés sur ce projet. Pour cette raison, les recommandations et perspectives suivantes sont proposées :

- Proposition des solutions pour chaque source de problème identifiée : Pour chaque source de problème relevée dans le système d'admission d'air, une analyse plus approfondie peut être réalisée afin de comprendre ses impacts spécifiques et de développer des solutions ciblées pour les résoudre.
- Etude de l'impact économique des problèmes : Une analyse détaillée de l'impact économique des problèmes identifiés peut être réalisée, en tenant compte des coûts liés à la limitation de production, aux remplacements fréquents des filtres, aux arrêts de production, etc.
- Etude comparative avec d'autres centrales : Une comparaison du système d'admission d'air de la centrale Boufarik II avec d'autres centrales similaires (qui utilisent les mêmes types des filtres) peut être réalisée pour identifier les bonnes pratiques. Cela peut fournir des idées précieuses pour l'amélioration continue du système et la prévention des problèmes similaires dans d'autres installations.

# Bibliographie

- [1] S. Bouaziz, “Amélioration de la gestion des projets de maintenance par la digitalisation de l’exécution opérationnelle des contrats,” Master’s thesis, Ecole Nationale Polytechnique, 2022.
- [2] M. L. BENSERRADJ and M. A. LADJAL, “Elaboration d’un modèle de placement optimal des moyens de production de l’électricité de spe (filiale de sonelgaz),” Master’s thesis, Ecole Nationale Polytechnique, 2010.
- [3] Wilcox, Melissa and Baldwin, Richard and Garcia-Hernandez, Augusto and Brun, Klaus, “Guideline for gas turbine inlet air filtration systems,” tech. rep., Southwest Research, 2010.
- [4] M. Wilcox, R. Kurz, and K. Brun, “Technology review of modern gas turbine inlet filtration systems,” *International Journal of Rotating Machinery*, 2012.
- [5] Kanbanize, “L’origine des 5 pourquoi.” Disponible sur : <https://kanbanize.com/fr/amelioration-continue/5-pourquoi-outil-analyse>, 2023.
- [6] Qualiblog, “La méthode des 5 pourquoi pour éradiquer vos problèmes!” Disponible sur : <https://qualiblog.fr/outils-et-methodes/la-methode-des-5-pourquoi-pour-eradiquer-vos-problemes/>, 2023.
- [7] D. SAIDI, “Les outils d’analyse des défaillances, analyse des modes de défaillance, de leurs effets, de leur criticité - amdec, le concept fmd the rma concept, la maintenance basée sur la fiabilité,” 2022.
- [8] A. Lefebvre, “Le diagramme d’ishikawa.” Disponible sur : <https://www.leblogdudirigeant.com/diagramme-ishikawa/>, 2023.
- [9] K. MADOU, “Maintenance et analyse de fiabilité opérationnelle par le modèle mathématique de weibull,” Master’s thesis, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2013.