



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des sciences et de la technologie
Département Génie métallurgique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie métallurgique

Spécialité : Métallurgie

Réf. :

Présenté et soutenu par : **Adel AMRANI**

Le : 02 juin 2025

Étude et Analyse des défauts de soudure de la partie chaude d'une turbine à gaz

Devant le jury composé de :

Dr. Mounir DJELLAB
Pr. Hamza BENTRAH
Dr. Abdelhakim BEGAR

MCA
Professeur
MCA

Rapporteur
Président
Examineur

Année universitaire : 2024 – 2025

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je voudrais remercier dieu tout puissant compatissant qui m'a donné la force et la patience pour parvenir ce travail.

*Mes remerciements très particuliers s'adressent à mon
Encadrant Dr. Mounir DJELLAB qui m'a proposé
ce thème de recherche et qui m'a bien orienté durant cette année universitaire.*

*Je remercie les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en
acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Merci à monsieur le directeur de la station de pompage de SONARACHE Biskra (SP2)
, de m'avoir, prises en charge, accueillies et donné l'opportunité d'effectuer mon stage.*

*Je remercie sincèrement Mr Khaled Chenafi et Mr Rachid Djidjekh qui m'ont
généreusement transmis un maximum de son savoir, ont fait preuve d'une grande
patience et m'ont accompagné tout au long de ma période de stage, ainsi que tous les
ingénieurs pour leurs collaborations.*

*Je tenais à saisir cette occasion pour présenter mes profonds à l'ensemble de l'équipe
pédagogique du Département Génie Métallurgique de l'université de Biskra.*

Dédicaces

Je dédie cette thèse à :

L'esprit de mes chers parents, que Dieu ait pitié d'eux

Je le dédie également à ma petite famille, qui a été ma plus grande

motivation

À tous ceux qui s'intéresse et sont heureux de mon succès.

ملخص

تتناول هذه المذكرة دراسة عيوب اللحام في الاجزاء الساخنة من التوربينات الغازية، مع التركيز على المواد المستخدمة في الجزء الساخن من المحرك، بالإضافة إلى تحليل العيوب الأكثر شيوعاً التي يتم ملاحظتها أثناء عمليات الصيانة. كما تسلط الضوء على تقنيات الفحص غير الإتلافي (CND) ، مثل الفحص البصري والكشف بالسوائل المرّة ، والتي تتيح إمكانية الكشف عن التشققات والتشوهات. يهدف هذا العمل إلى المساهمة في الوقاية من الأعطال وضمان أداء التوربينات الغازية أثناء التشغيل.

الكلمات المفتاحية : التوربينات الغازية , الجزء الساخن, الاختبار الغير متلف , اختبار الاختراق.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude des défauts de soudure dans les parties chaudes des turbines à gaz, en mettant l'accent sur les matériaux utilisés dans ces zones critiques ainsi que sur l'analyse des défauts les plus fréquemment rencontrés lors des opérations de maintenance. Il aborde également les principales techniques de contrôle non destructif (CND), telles que le contrôle visuel et le ressuage, qui permettent de détecter efficacement les fissures et les déformations de surface sans altérer l'intégrité des composants. L'objectif de ce travail est de contribuer à la prévention des pannes et à l'amélioration de la fiabilité en service des turbines à gaz, en s'appuyant sur une meilleure compréhension des mécanismes de défaillance et sur l'optimisation des pratiques de maintenance.

Mots clés : turbine à gaz, partie chaude, contrôle non destructif (CND) et le ressuage.

Abstract

This thesis focuses on the study of welding defects in the hot sections of gas turbines, with particular emphasis on the materials used in these critical areas and the analysis of the most frequently encountered defects during maintenance operations. It also discusses the main non-destructive testing (NDT) techniques, such as visual inspection and liquid penetrant testing, which effectively detect cracks and surface deformations without compromising the integrity of the components. The aim of this work is to contribute to the prevention of failures and to the improvement of the operational reliability of gas turbines, by promoting a better understanding of failure mechanisms and optimizing maintenance practices.

Keywords: gas turbine, heat part, non-destructive testing, dry penetrant testing.

SOMMAIRE

Chapitre I : Introduction générale et Revue de la Littérature

Introduction Générale

1	Définition des turbines	9
2	Différents types de turbines	9
2.1	Turbines à vapeur	9
2.2	Turbines hydrauliques	10
2.3	Turbines éoliennes	10
2.4	Turbine a gaz	11
2.4.1	Définition	12
2.4.2	Le principe de fonctionnement.....	13
2.5	Composantes essentiels	15
2.6	Utilisations et domaine d'applications industrielles des turbines a gaz	16
2.7	Classification des turbines à gaz.....	17
2.7.1	Par le mode de construction	18
2.7.2	Par le mode de travail.....	18
2.7.3	Par le mode de fonctionnement thermodynamique.....	19
3	Parties chaudes d'une turbine à gaz	19
3.1	Définition.....	19
3.2	Les principales parties chaudes d'une turbine à gaz :	19
3.3	Matériaux de base de fabrication de parties chaudes d'une turbine à gaz.....	21
3.3.1	Les superalliages a base de nickel.....	22
3.3.2	Les superalliages fer–nickel–chrome :	22
3.3.3	Les aciers.....	23
3.4	Les aciers inoxydables.....	23
3.5	Classification des aciers inoxydables	25
3.5.1	Aciers inoxydables austénitiques	25
3.5.2	Aciers inoxydables ferritiques.....	25
3.5.3	Aciers inoxydables duplex	26
3.5.4	Aciers inoxydables martensitiques.....	26
4	Maintenance Des Turbines A Gaz	27
5	Conclusion	28

SOMMAIRE

Chapitre II : Applications et techniques expérimentales

1	Introduction.....	30
2	Définition du Contrôle Non Destructif	30
3	Principaux domaines d'applications du C.N.D.....	30
4	Principe et objectifs du contrôle non destructif	31
5	Les différents types de contrôle non destructif	32
6	Importance du contrôle non destructif	33
6.1	Le contrôle visuel	33
6.1.1	L'éclairage.....	34
6.1.2	L'œil et ses limitations	34
6.1.3	Outils optiques classiques	35
6.1.4	Appareils optiques spécifiques.....	35
6.2	Contrôle par ressuage	36
6.2.1	Principe de l'inspection par ressuage	36
6.3	Contrôle par magnétoscopie	38
6.3.1	Principe du contrôle par magnétoscopie	39
6.4	Contrôle par Ultrason	41
6.3.2	Principe du contrôle par Ultrason.....	41
6.5	Le contrôle par radiographie	44
6.3.3	Principe du contrôle par radiographie :	44
7	Les défauts courants dans la partie chaude d'une turbine a gaz	45
8	Conclusion	47

Chapitre III : Résultats & Discussion

Introduction	49
1 Matériels utilisés.	49
1.1 Présentation de la turbine LM5000	49
2 Produits Utilises	51
2.1 Le pénétrant Fluxo P125.....	52
2.2 Le révélateur FLUXO R175	52
3 Méthodes D'études Et Conditions expérimentales	53
3.1 Préparation des pièces à contrôler	53
3.2 Méthodologie du contrôle par ressuage	53
4 Résultat Et Discussions.....	56
5 Conclusion	56

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1 : Presente une turbine	10
Figure I. 2 : présente une turbine a vapeur	10
Figure I. 3 : Presente une Turbine hydrauliques.....	10
Figure I. 4 : Turbine Eolienne a axe horizontal.....	11
Figure I. 5 : Eolienne a axe verticale	11
Figure I. 6 : Présente un exemple de turbine a gaz.	12
Figure I. 7 : Cycle théorique de Brayton.	13
Figure I. 8 : Les composants de la turbine à gaz.	14
Figure I. 9 : Schéma présentant le principe de fonctionnement d'une turbine à gaz.	15
Figure I. 10 : Turbine a gaz.	15
Figure I. 11 : Les composantes d'une turbine à gaz	16
Figure I. 12 : Schéma montre le passage du gaz à travers les composants de la turbine.	17
Figure I. 13 : Classification des turbines à gaz	17
Figure I. 14 : Turbines à gaz à un arbre et à deux arbres.	18
Figure I. 15 : Aubes statiques d'un turbine a gaz.....	20
Figure I. 16 : Aubes mobiles d'un turbine a gaz	20
Figure I. 17 : Une roue d'un turbine a gaz	21
Figure I. 18: Structure austénitiques.	25
Figure I. 19 : Structure ferritiques.	25
Figure I. 20: Structure d'un acier inox duplex	26
Figure I. 21: Structure martensitique.....	27
Figure II. 1 : Principe de contrôle non destructif.....	31
Figure II. 2: Classification des méthodes de CND.....	33
Figure II. 3 : Principe de l'examen visuel	34
Figure II. 4 : Un examen visuel avec loupe.....	35
Figure II. 5 : Un examen visuel avec Loupe binoculaire	35
Figure II. 6 : Un examen visuel par appareils optiques spécifiques.....	36
Figure II. 7 : Principe de l'inspection par ressuage.....	37
Figure II. 8: Fissuration détectée par pénétrant coloré.....	37
Figure II. 9 : Contrôle par Ressuage avec pénétrants fluorescents	38
Figure II. 10 :Contrôle par magnétoscopie.....	39
Figure II. 11 : Principe de contrôle par magnétoscopie	40
Figure II. 12 : Contrôle par ultrason.....	41
Figure II. 13 : Principe du Controle Par Ultrason	42
Figure II. 14 : Trois types d' Ondes.	43
Figure II. 15 : Le contrôle par radiographie.	44
Figure II. 16 : Le principe du contrôle par radiographie.....	45
Figure II. 17 : Fissuration et oxidation sur un aube de turbine a gaz.....	46
Figure III. 1 : Turbine type TF39	50
Figure III. 2: Turbine type CF9.....	50
Figure III. 3: Turbine type LM2500.....	50
Figure III. 4: Turbine type LM5000.....	50
Figure III. 5 : Les Produits utilisés dans le contrôle par ressuage.....	52
Figure III. 6 : (a) injecteur avec pénétrant, (b) injecteur avec révélateur.....	54
Figure III. 7 : (a) Stator avec pénétrant, (b) Stator avec révélateur.....	54
Figure III. 8 : (a) Les aubes fix avec pénétrant, (b) les aubes fix avec révélateur	55
Figure III. 9 : (a) Chambre de combustion de LM5000, (b) la roue de LM5000	55

Chapitre I

Introduction générale et Revue de la Littérature

Introduction générales

Dans un contexte énergétique mondial en constante évolution, les turbines à gaz occupent une place stratégique dans la production d'énergie et le transport des hydrocarbures. Leur performance, leur rendement et leur fiabilité dépendent fortement de l'intégrité de leurs composants, en particulier ceux situés dans la partie chaude, soumise à des conditions de service extrêmes. Ces zones critiques doivent résister à des températures élevées, à des pressions importantes et à des sollicitations mécaniques répétées, ce qui en fait des points sensibles dans la structure globale de la turbine.

Parmi les éléments les plus vulnérables figurent les joints de soudure, qui assurent l'assemblage mécanique et l'étanchéité entre les différentes pièces. La détection et l'analyse des défauts dans ces soudures sont donc indispensables pour prévenir les défaillances, assurer la sécurité des installations, et prolonger la durée de vie des équipements.

C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent mémoire, qui vise à étudier et contrôler les défauts de soudure dans la partie chaude d'une turbine à gaz GE de type LM5000, utilisée à la station de pompage SP2 de Sonatrach à Biskra. Grâce à une approche expérimentale, nous avons appliqué des techniques de contrôle non destructif, notamment le ressuage coloré, afin d'identifier les éventuels défauts de surface présents sur des pièces critiques telles que la roue à basse pression, la directrice et l'injecteur et les aubes.

L'objectif principal de ce travail est de répondre à la question suivante : Quelle est la méthode la plus appropriée pour contrôler efficacement les soudures dans des conditions extrêmes, afin de garantir leur conformité et la fiabilité globale du système ?

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

- ✚ Le premier est consacré à une **revue générale des turbines et** de leur parties chaude.
- ✚ Le second traite des **méthodes de contrôle non destructif**, avec un focus sur le contrôle par ressuage.
- ✚ Enfin, le troisième chapitre présente **l'étude expérimentale menée en station**, ainsi que l'analyse des résultats obtenus.

Dans ce chapitre, nous présenterons un rappel théorique sur les turbines à gaz, on commençant par leur définition, les différents types des turbines à gaz ainsi que leurs principaux composants, et sans oublier d'expliquer leur principe de fonctionnement ; en mettant l'accent sur les différents domaines d'application de ces derniers.

1 Définition des turbines

Les turbines sont des machines rotatives qui exercent une fonction motrice, permettant de faire fonctionner des pompes, des compresseurs ou des générateurs électriques dans le secteur pétrolier.[3]

D'une manière générale, les turbomachines se définissent comme des dispositifs permettant un échange d'énergie entre un fluide et un système mécanique rotatif. Cette énergie peut être soit transmise au fluide (comme dans le cas des pompes et compresseurs), soit extraite du fluide (comme dans le cas des turbines et éoliennes), en fonction du rôle de la machine dans le procédé.

En raison de cette double possibilité de conversion énergétique, les turbomachines occupent une place importante dans de nombreux secteurs industriels et dans notre quotidien. Elles englobent une large gamme d'équipements, parmi lesquels on trouve notamment les ventilateurs, compresseurs, éoliennes, pompes, et turbines.

2 Différents types de turbines

Les turbines peuvent être classées selon plusieurs critères : leur mode de fonctionnement, leur principe thermodynamique, leur domaine d'application, ou encore leur architecture interne. Voici les principales catégories :

2.1 Turbines à vapeur

Fonctionnent selon le cycle de Rankine. La vapeur, produite par une chaudière, entraîne une turbine. Elles sont utilisées dans les centrales thermiques, nucléaires, et certains procédés industriels.



Figure I. 1 : présente une turbine a vapeur

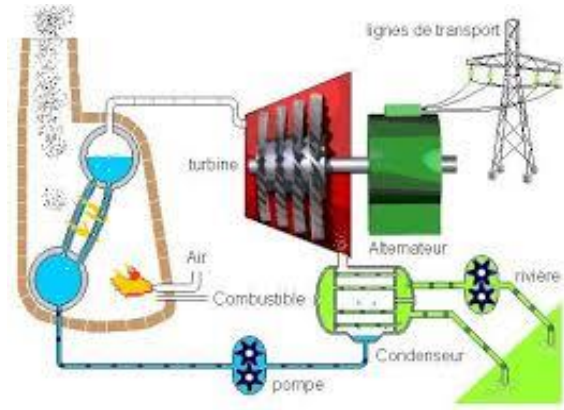


Figure I. 2 : Presente une turbine a vapeur selon le cycle de Rankine

2.2 Turbines hydrauliques

Utilisent l'énergie de l'eau en mouvement (chute ou courant) pour entraîner une roue. types courants : Pelton, Francis, Kaplan. Utilisées dans les barrages hydroélectriques.

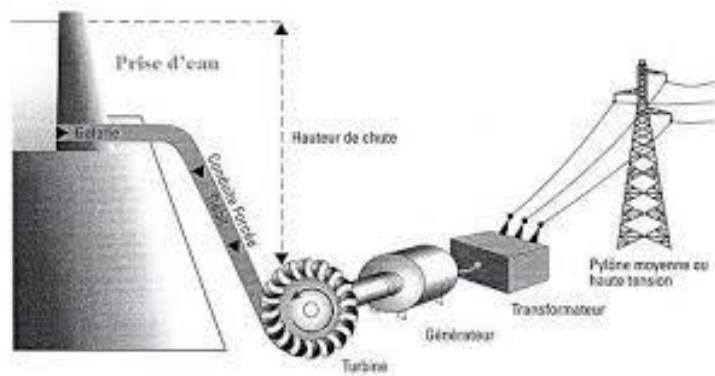


Figure I. 3 : Presente une Turbine hydrauliques

2.3 Turbines éoliennes

Convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité. On distingue les turbines à axe horizontal (les plus répandues) et à axe vertical (Figure I. 4/ Figure I. 5)



Figure I. 4 : Turbine Eolienne a axe horizontal [2]



Figure I. 5 : Eolienne a axe verticale [2]

Ce chapitre est principalement consacré à la turbine à gaz, en mettant l'accent sur son fonctionnement, ses composants et les matériaux utilisés dans ses parties chaudes.

2.4 Turbine a gaz

Les **turbines** à gaz occupent une place essentielle dans le domaine de la production d'énergie et dans les applications industrielles modernes, notamment dans les secteurs de l'aéronautique, de la production d'électricité et de la pétrochimie. Elles sont conçues pour

convertir l'énergie contenue dans un carburant généralement du gaz naturel en énergie mécanique, puis en énergie électrique.

Nous présenterons dans ce chapitre un rappel théorique sur les turbines à gaz, on commençant par leur définition, les différents types des turbines à gaz ainsi que leurs principaux composants et leur principe de fonctionnement ; en mettant l'accent sur les différents domaines d'application de ces derniers.

2.4.1 Définition

La turbine à gaz est une machine thermique qui convertit l'énergie contenue dans un gaz chaud à haute pression en énergie mécanique de rotation. Elle fonctionne en brûlant un combustible (comme le gaz naturel, le kérosène ou un autre carburant) dans une chambre de combustion, produisant ainsi des gaz chauds qui entraînent une turbine reliée à un arbre tournant. Cette énergie mécanique peut ensuite être utilisée pour entraîner un générateur électrique, une pompe, un compresseur, ou pour la propulsion.[2]

Le choix des turbines à gaz pour ces diverses applications repose principalement sur leur souplesse d'utilisation, leur fiabilité, ainsi que leur facilité de maintenance, en comparaison avec leurs concurrents traditionnels tels que les turbines à vapeur et les moteurs alternatifs..



Figure I. 6 : Présente un exemple de turbine a gaz.[3]

2.4.2 Le principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une turbine à gaz repose sur un cycle thermodynamique appelé **cycle de Brayton**.

Ce cycle comprend trois étapes principales :

- Compression de l'air.
- Combustion du mélange air-carburant.
- Détente des gaz chauds dans la turbine, qui entraîne un arbre moteur.

Le fonctionnement thermodynamique d'une turbine à gaz est représenté par le cycle de Brayton, souvent illustré dans Figure I. 7.[4]

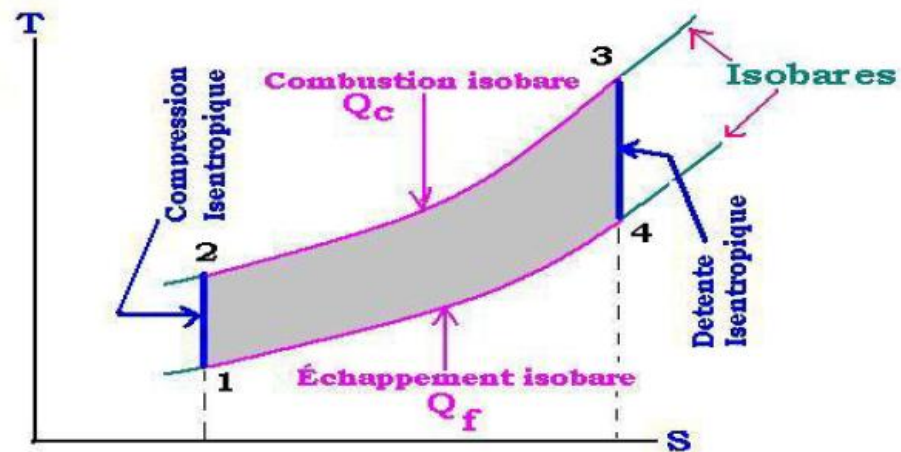


Figure I. 7 : Cycle théorique de Brayton. [1]

- Le processus 1-2 représente la compression isentropique.
- Le processus 2-3 représente la combustion isobare.
- Le processus 3-4 représente la détente isentropique.
- Le processus 4-1 représente l'échappement isobare.[1]

Une turbine à gaz comporte plusieurs composants essentiels : un compresseur qui comprime l'air aspiré ; une chambre de combustion où la température du mélange air-carburant est fortement augmentée ; une turbine qui récupère l'énergie contenue dans les gaz chauds et comprimés pour produire un travail mécanique ; et enfin, un système d'échappement qui évacue les gaz brûlés.

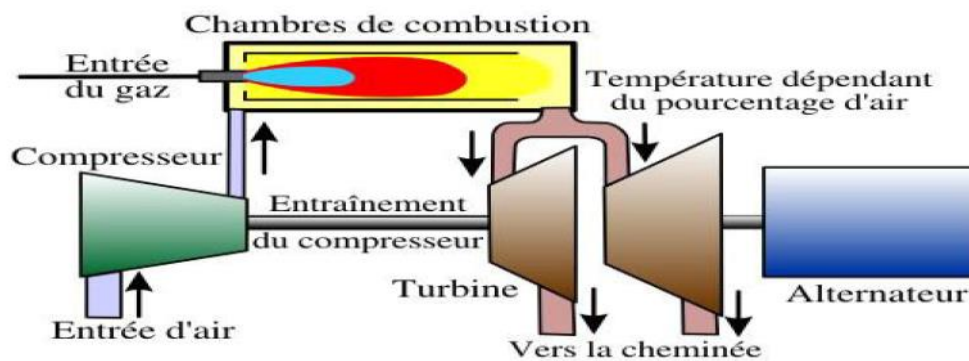


Figure I. 8 : Les composants de la turbine à gaz.[5]

L'air est aspiré de l'atmosphère filtré, puis éventuellement refroidi par un procédé adiabatique avant d'être comprimé. Une partie de cet air comprimé est ensuite mélangée avec le combustible dans la chambre de combustion, en présence d'un léger excès d'air afin d'assurer une combustion complète et de limiter la température maximale. La température des gaz à l'entrée du rotor de la turbine est ajustée pour rester inférieure ou égale à la limite admissible des matériaux. Les gaz de combustion en se détendant dans la turbine, fournissent d'abord l'énergie nécessaire au fonctionnement du compresseur, puis la puissance nette utile, par exemple pour entraîner un générateur électrique.

Si la détente des gaz est complète à l'intérieur de la turbine, les gaz d'échappement sont évacués à pression atmosphérique, ce qui simplifie la modélisation théorique du cycle, car les pertes de charge en sortie (contre-pression) peuvent alors être négligées.[5]

La turbine à gaz (ou à combustion) fonctionne schématiquement comme l'indique la Figure I. 9 et Figure I. 10

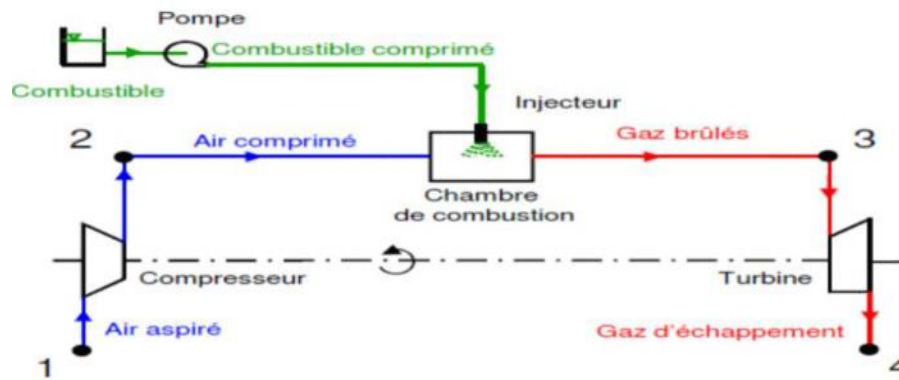


Figure I. 9 : Schéma présentant le principe de fonctionnement d'une turbine à gaz.[5]

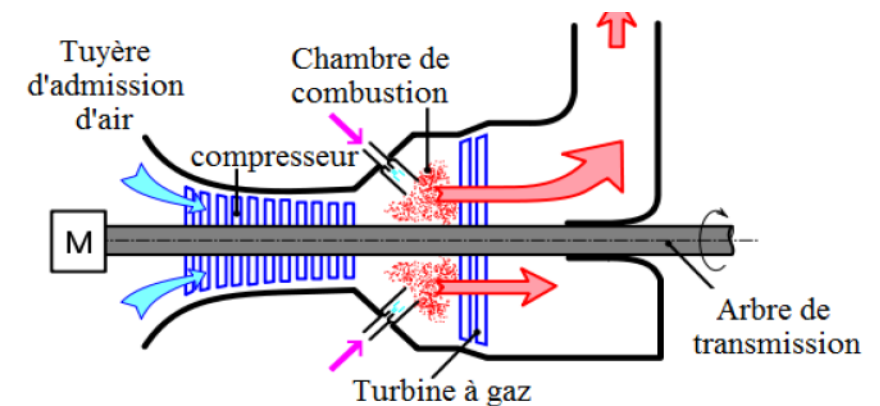


Figure I. 10 : Turbine a gaz.

2.5 Composantes essentiels

Une turbine à gaz est constituée de trois composantes essentielles :

Un compresseur, centrifuge ou axial, dont la fonction est de comprimer l'air ambiant à une pression généralement comprise entre 10 et 30 bars.

Une chambre de combustion, où un combustible gazeux ou liquide est injecté sous pression, puis brûlé avec de l'air comprimé, en présence d'un important excès d'air afin de limiter la température des gaz d'échappement.

La roue de turbine, généralement axiale, dans laquelle les gaz issus de la chambre de combustion se détendent, produisant ainsi un travail mécanique.[6]

Figure I. 11 illustre les composantes d'une turbine à gaz.

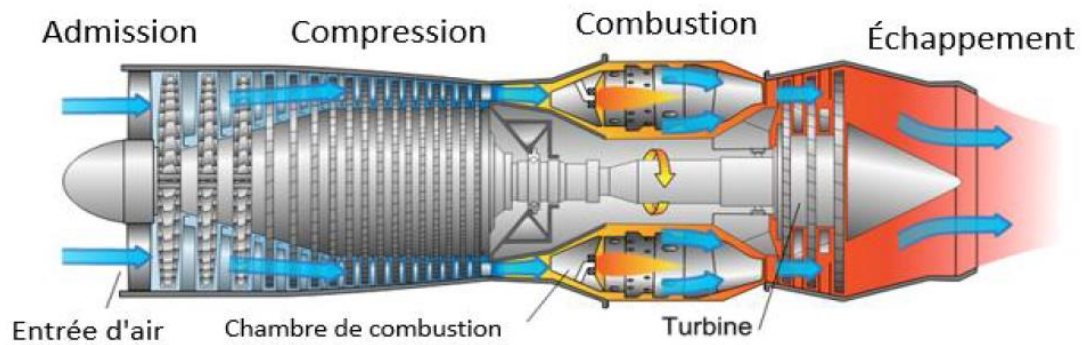


Figure I. 11 : Les composantes d'une turbine à gaz [13].

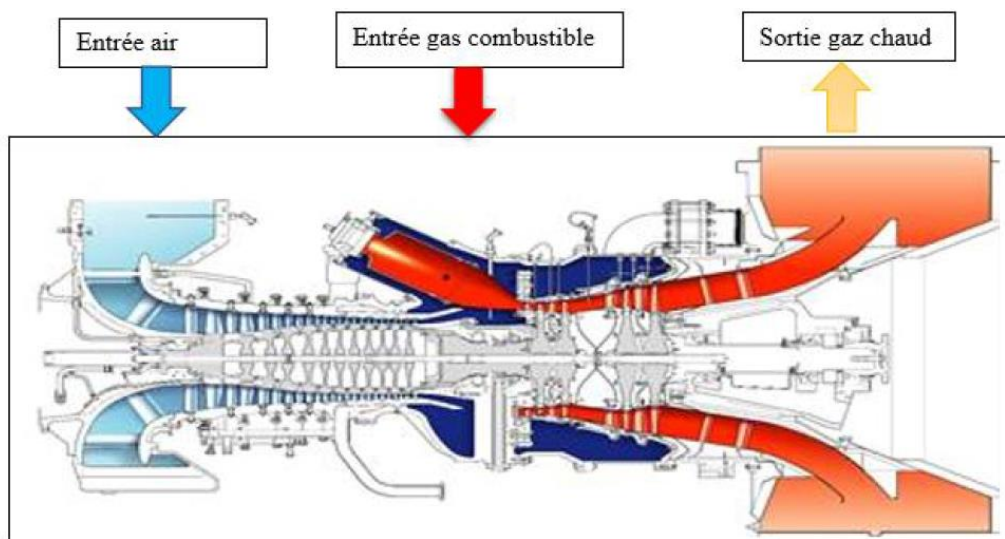


Figure I. 12 : Schéma montre le passage du gaz à travers les composants de la turbine.[5]

2.6 Utilisations et domaine d'applications industrielles des turbines a gaz

Les turbines à gaz sont conçues pour répondre à différents besoins. On les retrouve notamment dans l'industrie pétrolière et énergétique, où elles sont généralement utilisées pour entraîner :

- Des compresseurs, permettant le transport ou la réinjection du gaz vers les puits.
- Des générateurs pour la production d'électricité.
- Des pompes pour le transport du pétrole brut ou du condensat.[2]

Dans les stations de compression relais pour une activité transport gaz par canalisation.

Des compresseurs des stations de compression relais sont entraînés par des turbines à gaz pour faire progresser les gaz dans les gazoducs.[7]

Dans les stations de pompage relais une station de pompage pour rôle de re-comprimer le pétrole pendant son écoulement dans le gazoduc pour compenser la perte de charge le long des milliers de kilomètres qu'il parcourt. La puissance des compresseurs mis en place dépend de la configuration du terrain, accidenté ou non, de la distance entre les deux stations relais et aussi selon la densité et la viscosité du brut.[8]

2.7 Classification des turbines à gaz

On peut classer les turbines selon différents points :

- Par le mode de construction.
- Par le mode de travail.
- Par le mode de fonctionnement thermodynamique. [2]

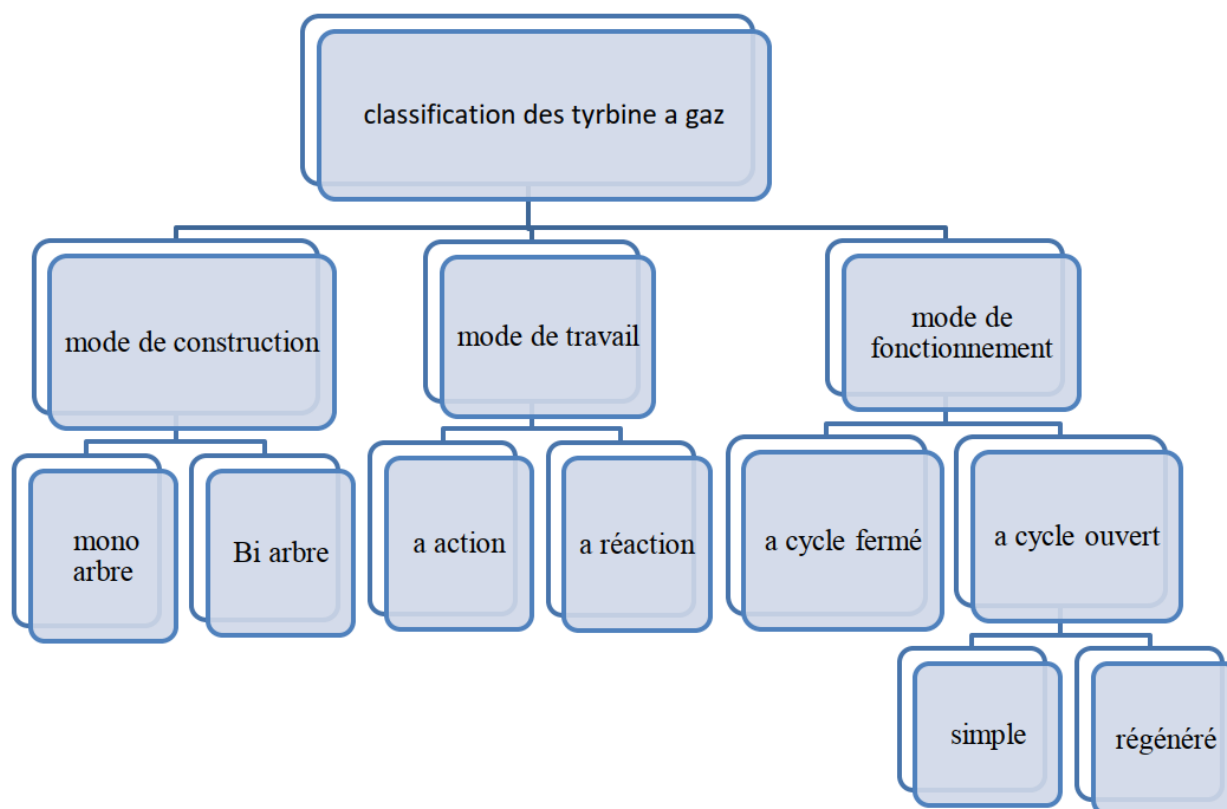


Figure I. 13 : Classification des turbines à gaz[2]

2.7.1 Par le mode de construction

L'objectif pour lequel, on utilise la turbine à gaz définit le type qu'on doit choisir. Dans l'industrie, on trouve :

A. Les turbines à un seul arbre : dites aussi mono-arbre. Elles sont généralement utilisées dans le cas où on cherche un fonctionnement avec une charge constante (pour entraîner les générateurs d'électricité).

B. Les turbines à deux arbres (bi-arbres) : elles ont l'avantage d'entraîner des appareils à charges variables sur l'autonomie de la turbine, la deuxième est liée à la charge.

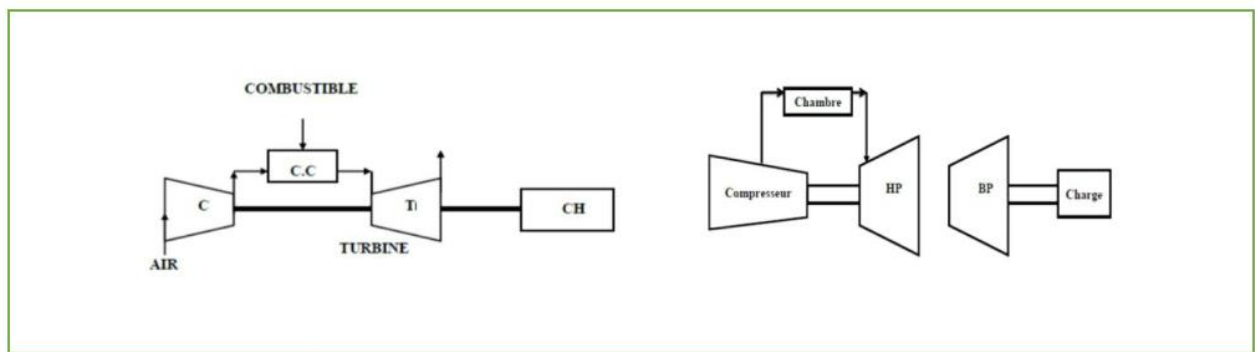


Figure I. 14 : Turbines à gaz à un arbre et à deux arbres.

2.7.2 Par le mode de travail.

On distingue deux types de turbine :

A. Turbine à action : Ou l'énergie est transformée complètement en énergie cinétique dans la directrice, l'évolution des gaz dans la roue se fait sans variation de pression statique.

B. Turbine à réaction : Une partie de l'énergie thermique est transformée dans la roue en énergie cinétique et mécanique, l'évolution des gaz dans la roue se fait avec variation de pression statique.

2.7.3 Par le mode de fonctionnement thermodynamique

Il existe deux cycles thermodynamiques :

A. Turbine à cycle fermé : dans laquelle le même fluide est repris après chaque cycle.

B. Turbine à cycle ouvert : c'est une turbine dont l'aspiration et l'échappement directement dans l'atmosphère. Ce type est divisé en deux classes :

- **Cycle simple** : c'est une turbine utilisant un seul fluide pour la production d'énergie mécanique, après la détente les gaz possédant encore un potentiel énergétique ils sont perdus dans l'atmosphère à travers la cheminée.

- **Cycle régénéré** : c'est une turbine dont le cycle thermodynamique fait intervenir plusieurs fluides moteurs dans le but d'augmenter le rendement de l'installation.

3 Parties chaudes d'une turbine à gaz

3.1 Définition

Dans une turbine à gaz, les « parties chaudes » aussi appelées « hot section » en anglais sont les composants exposés directement aux gaz de combustion à très haute température. Ces éléments sont critiques car ils doivent résister à des conditions thermiques extrêmes, souvent supérieures à 1000 °C.

3.2 Les principales parties chaudes d'une turbine à gaz :

La chambre de combustion (ou chambre de brûleur) C'est la zone où la température est la plus élevée.

- Fonction : où se fait la combustion du carburant avec l'air comprimé.
- Température typique : 1200–1500 °C.

Les aubes statiques de la turbine (nozzles ou distributeurs)

Fonction : dirigent les gaz chauds vers les aubages mobiles avec la bonne incidence.

Fortement sollicitées thermiquement et mécaniquement. (Figure I. 15)

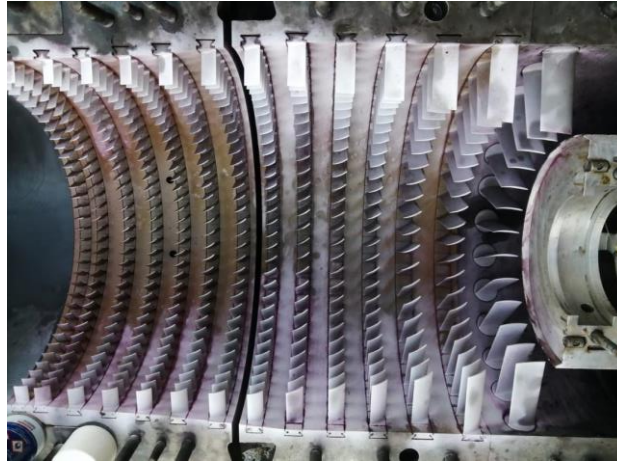


Figure I. 15 : Aubes statiques d'une turbine à gaz

- **Les aubes mobiles** (rotor blades ou rotors)

Fonction : convertissent l'énergie des gaz chauds en énergie mécanique en tournant.

Elles doivent résister à la fois à la température et à la force centrifuge (Figure I. 16)

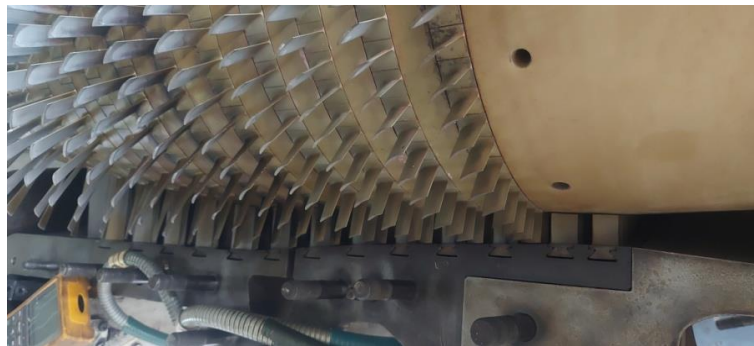


Figure I. 16 : Aubes mobiles d'une turbine à gaz

La roue de turbine (turbine wheel) : c'est un composant rotatif situé dans la section chaude de la turbine à gaz. Elle est fixée sur l'arbre et porte les aubes mobiles (rotor blades) qui convertissent l'énergie des gaz chauds en énergie mécanique. (Figure I. 17)



Figure I. 17 : Une roue d'un turbine a gaz

Elle est située juste après la chambre de combustion et reçoit directement les gaz à très haute température (jusqu'à 1300–1500 °C ou plus dans les turbines modernes).

Elle est donc :

Une partie de la section chaude (comme la chambre de combustion et les aubes fixes), Soumise à des sollicitations thermiques et mécaniques extrêmes. Fabriquée à partir de superalliages à base de nickel ou de cobalt, souvent refroidie par des systèmes internes à air.[2]

- Les écrans thermiques et systèmes de refroidissement internes, Bien que ce ne soient pas des parties « principales », ils sont essentiels pour protéger les matériaux des surchauffes.

3.3 Matériaux de base de fabrication de parties chaudes d'une turbine à gaz

Les matériaux utilisés dans les zones chaudes d'une turbine à gaz sont généralement des superalliages, également appelés alliages à haute performance. Ces alliages métalliques sont spécifiquement conçus pour résister à des contraintes mécaniques et thermiques extrêmes.

Ils présentent une excellente tenue au fluage à haute température généralement entre 70 % et 80 % de leur température de fusion, ainsi qu'une bonne stabilité structurale et une

résistance élevée à l'oxydation et à la corrosion. La structure cristalline des superalliages est le plus souvent de type cubique à face centrée, typiquement austénitique. [5]

Les éléments principaux entrant dans leur composition sont le nickel, le cobalt, le fer, ainsi que parfois le titane ou l'aluminium. Le développement des superalliages résulte de nombreuses avancées en métallurgie et en procédés de fabrication, initialement motivées par les exigences de l'industrie aéronautique et énergétique.

Aujourd'hui, ces matériaux sont couramment utilisés dans les aubes de turbine des moteurs d'avion, des turbines à gaz industrielles et des turbines marines. Leur capacité à fonctionner à haute température permet d'augmenter le rendement thermique des moteurs, notamment dans les parties chaudes des turboréacteurs et turbines à gaz.[5]

On peut diviser les superalliages en trois grandes familles, selon l'élément de base qui constitue leur matrice :

3.3.1 Les superalliages a base de nickel

Ce sont les plus utilisés, notamment dans les turbines à gaz et les moteurs d'avion. Ils possèdent une excellente résistance au fluage, à la corrosion et à l'oxydation à haute température. Leur structure est généralement austénitique, renforcée par précipitation (phase γ').

3.3.2 Les superalliages fer–nickel–chrome :

Les superalliages à base de fer-nickel-chrome représentent une famille d'alliages développés à partir des aciers inoxydables austénitiques. Ils combinent une bonne résistance mécanique à haute température, une bonne ductilité, ainsi qu'une bonne tenue à la corrosion et à l'oxydation.

Leur composition typique comprend du fer comme élément principal, enrichi en nickel (pour la stabilité de phase austénitique à haute température) et en chrome (pour la résistance à l'oxydation et à la corrosion).

Ces alliages sont souvent utilisés dans des environnements où les conditions thermiques sont modérées (par rapport aux superalliages à base de nickel pur), notamment dans les composants structurels des turbines à gaz, les boîtiers, les conduits d'échappement et certaines pièces des chambres de combustion.[9]

Parmi ces superalliages, on retrouve la famille des Inconels. Contrairement aux aciers inoxydables, à base de fer allié avec du nickel et du chrome, certains Inconels comme l'Inconel 718 sont principalement à base de nickel, enrichis en chrome et en fer.

La désignation « Incoel » est une marque déposée et regroupe environ 25 alliages métalliques conçus pour résister à des conditions extrêmes de température, de corrosion et de sollicitation mécanique, ce qui en fait des matériaux de choix pour les zones chaudes des turbines à gaz.[5]

Les propriétés de l'inconel

Ses propriétés mécaniques et son aspect sont comparables à ceux de l'acier inoxydable. Sa résistance à la traction varie de 690 à 1 275 MPa (100 000 à 185 000 psi) selon l'alliage.

Ils présentent les mêmes avantages que les aciers inoxydables par rapport aux aciers au carbone, mais en plus prononcés. Leur résistance à la chaleur est bien supérieure ($\pm 900^{\circ}\text{C}$). Bien entendu, leur coût est également beaucoup plus élevé ; leur choix dépend de leur durée de vie prévue et de la rentabilité de l'application.[5]

3.3.3 Les aciers

Les aciers jouent un rôle essentiel dans de nombreux domaines d'application. Ils ont largement contribué à la révolution scientifique et industrielle, grâce à la diversité des traitements thermiques et mécaniques disponibles, qui permettent d'adapter leurs propriétés en fonction des besoins.

L'acier est un alliage métallique largement utilisé en construction métallique et mécanique. Il est principalement composé de fer et de carbone, ce dernier étant présent en proportion de 0,02 % à 2 %. Selon la norme NF EN 10020, un acier est dit inoxydable lorsqu'il contient au moins 10,5 % de chrome et au plus 1,2 % de carbone. C'est la teneur en carbone qui confère à l'acier ses propriétés mécaniques spécifiques.[10]

3.4 Les aciers inoxydables

Les aciers inoxydables, ou inox, sont largement utilisés dans de nombreux domaines tels que l'industrie, les transports, l'agroalimentaire ou la médecine. Ce sont des alliages de fer et de carbone contenant au moins 10,5 % de chrome, formant une couche passive d'oxyde de chrome qui leur confère leur résistance à la corrosion. Des éléments d'alliage comme le

nickel, le molybdène, le titane, le tungstène ou le vanadium sont souvent ajoutés pour améliorer leur ductilité, leur stabilité à haute température ou leur résistance aux environnements extrêmes.[5]

Propriétés physiques

Ces aciers possèdent :

- Une masse volumique de l'ordre de 7850 Kg/m^3
- Une capacité thermique de 0.5 J/g.C° pour $T = 0^\circ$ à 100°C .
- Une conductivité thermique de 16.2 W/m.K à 100°C .
- Une conductivité thermique de 21.4 W /m.K à 500°C .

Propriétés mécaniques

Les aciers inoxydables représentent les propriétés mécaniques suivantes :

- La dureté, Rockwell B est : 79 HRB
- La résistance à la traction est : 558 Mpa
- L'allongement à la rupture est : 50%
- Le module de Young est : 2.10^5 Mpa

Propriétés électrique

La résistivité électrique des aciers inoxydables est : $7.4 .10^{-5} \text{ omh.cm}$.

Propriétés magnétiques

Les aciers inoxydables ferritiques et martensitiques sont ferromagnétiques (prennent à l'aimant) suite à la présence de la ferrite et martensite. En revanche, les aciers inoxydables austénitiques présentent, à température ambiante, une structure austénitique qui leur permet d'être paramagnétiques (amagnétiques). En raison de leur résistance à la corrosion et de leurs finis de surface de tout premier rang, les aciers inoxydables jouent un rôle prépondérant dans l'industrie aéronautique, chimique, pharmaceutique et agroalimentaire, les cuisines professionnelles, l'architecture et même la bijouterie.[5]

3.5 Classification des aciers inoxydables

3.5.1 Aciers inoxydables austénitiques

Les aciers inoxydables austénitiques contiennent généralement entre 0,02% et 0,1% carbone, 17 à 20% de chrome, 7 à 25% de nickel et 2 à 5% molybdène.[5]



Figure I. 18: Structure austénitiques.[5]

3.5.2 Aciers inoxydables ferritiques

Ces aciers ne sont pas trempants, c'est-à-dire qu'ils ne durcissent pas par traitement thermique. Ils appartiennent à la famille des aciers réfractaires à haute teneur en chrome, pouvant contenir jusqu'à 27 % de chrome, ce qui leur confère une excellente résistance à l'oxydation et à la corrosion à haute température, notamment en atmosphère soufrée.



Figure I. 19 : Structure ferritiques.[5]

3.5.3 Aciers inoxydables duplex

Les aciers inoxydables duplex contiennent principalement du chrome (18 à 28 %), du nickel (4 à 10 %) et du molybdène (1,5 à 3 %). Leur nom provient de leur structure biphasée, composée d'environ 50 % de ferrite et 50 % d'austénite



Figure I. 20: Structure d'un acier inox duplex

3.5.4 Aciers inoxydables martensitiques

Du point de vue métallographique, les aciers inoxydables martensitiques au chrome sont proches des aciers au carbone trempés. Grâce à leur teneur relativement élevée en carbone, ils sont durcissables, contrairement aux aciers ferritiques. Moins utilisés dans les constructions soudées, ils sont privilégiés pour des applications nécessitant à la fois une bonne résistance à l'usure et à la corrosion : couteaux, instruments médicaux, pièces de turbines, matrices, etc.

Ces aciers présentent une excellente trempabilité, et leurs propriétés mécaniques peuvent être ajustées par traitement thermique (trempe, revenu, recuit), selon la teneur en carbone. Cependant, l'augmentation des propriétés mécaniques est généralement accompagnée d'une baisse de la résistance à la corrosion.[5]

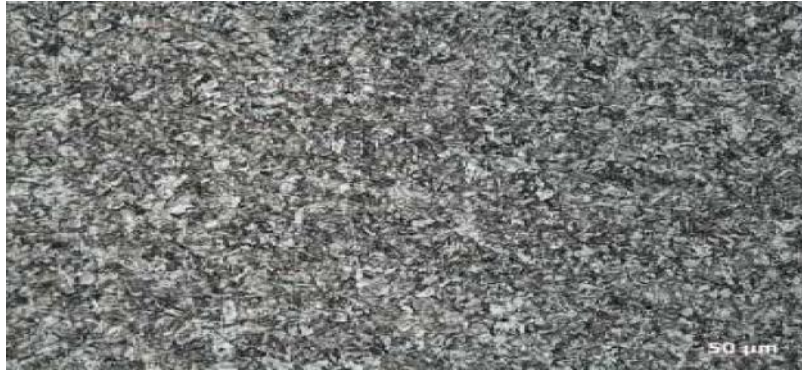


Figure I. 21: Structure martensitique.[5]

4 Maintenance Des Turbines A Gaz

Les normes NF X 60-010 et 60 011 définissent la maintenance comme l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé. La fonction maintenance est un ensemble d'activités regroupées en deux sous-ensembles ; les activités à dominante technique et les activités à dominante gestion.[11]

Les pièces de turbines à gaz qui requièrent la plus grande attention sont celles associées au processus de combustion, ainsi que celles exposées aux gaz chauds dégagés par le système de combustion. Celles-ci sont appelées parties de la section de combustion et du circuit de gaz chaud. Elles comprennent les chemises de combustion, les capuchons d'extrémité, les ensembles de buses de combustible, les tubes à flammes croisées, les pièces de transition, les buses de turbine, les carénages fixes de turbine et les seaux de turbine. La durée de vie du rotor du compresseur, du rotor de la turbine, des carters et du diffuseur d'échappement est un autre domaine à long terme à prendre en compte et à planifier.

La conception de base et la maintenance recommandée des turbines à gaz sont orientées vers :

- Périodes de fonctionnement maximales entre les inspections et révisions ;
- Inspection et maintenance sur place et sur site, Recours aux compétences locales pour désassembler, inspecter et réassembler les composants des turbines à gaz.[12]

5 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les turbines à gaz, leurs principes de fonctionnement, leurs applications ainsi que leurs composants principaux, en mettant l'accent sur les parties chaudes. Ces zones, soumises à des températures et contraintes extrêmes, nécessitent l'utilisation de matériaux spécifiques comme les superalliages, connus pour leur résistance mécanique et leur tenue à la corrosion. Cette base théorique est essentielle pour comprendre l'importance du contrôle des soudures dans ces régions critiques. Le chapitre suivant portera sur les différentes méthodes de contrôle non destructif utilisées pour détecter les défauts présents dans les soudures des parties chaudes des turbines à gaz.

Chapitre II

Applications et Techniques Expérimentales

1 Introduction

Les parties chaudes des turbines à gaz sont soumises à des conditions extrêmes de température et de pression, ce qui rend la qualité des soudures essentielle pour garantir la fiabilité et la sécurité de l'ensemble du système. Afin d'évaluer l'intégrité de ces soudures sans endommager les composants, les méthodes de contrôle non destructif (CND) sont largement utilisées.

Ce chapitre aborde les principales techniques de contrôle non destructif (C.N.D.) utilisées dans l'industrie, avec une attention particulière portée à l'inspection des soudures soumises à des conditions sévères, comme celles présentes dans les parties chaudes des turbines à gaz. L'objectif est de présenter les principes de fonctionnement, les domaines d'application, ainsi que les avantages et les limites de chaque méthode. Une importance particulière sera accordée à la méthode de ressuage, largement utilisée pour détecter les défauts de surface sur les pièces exposées à de hautes températures.

2 Définition du Contrôle Non Destructif

Le Contrôle Non Destructif CND est une technique d'inspection qui permet de détecter, localiser et dimensionner des défauts internes ou de surface sans détériorer l'élément inspecté. Il est utilisé aussi bien durant la fabrication qu'en maintenance pour prévenir tout risque de rupture ou de défaillance prématurée.

3 Principaux domaines d'applications du C.N.D

Le (C.N.D.) est largement utilisé dans de nombreux secteurs industriels où la fiabilité des matériaux et des structures est cruciale. Il joue un rôle essentiel dans l'aéronautique, pour inspecter les éléments critiques comme les ailes, les moteurs et les trains d'atterrissage. Dans le domaine du nucléaire, il permet de surveiller l'intégrité des cuves, des générateurs de vapeur et des soudures. Le secteur pétrolier et gazier y a recours pour contrôler les pipelines, les réservoirs et les plateformes offshore. En construction métallique et génie civil, le CND est utilisé pour vérifier la qualité des soudures et des matériaux des ponts, bâtiments ou barrages. Enfin, dans le secteur ferroviaire et automobile, il permet de garantir la sécurité des essieux, des roues, des châssis et des composants critiques soumis à de fortes contraintes.

L'inspection non destructive (CND) vise principalement à détecter trois grandes catégories de défauts :

Les défauts de surface : ce sont les fissures, porosités ouvertes, piqûres de corrosion, inclusions ou manques de fusion visibles ou accessibles en surface. Ces défauts sont souvent détectés par des méthodes comme le ressuage ou les courants de Foucault

Les défauts sous-jacents ou internes : ils se trouvent à l'intérieur du matériau, comme les soufflures, les inclusions non métalliques, les criques ou les délaminages. L'échographie et la radiographie sont particulièrement adaptées pour ces inspections en profondeur.

Les défauts dimensionnels ou de géométrie : il s'agit de variations inacceptables par rapport aux tolérances prévues, telles que des désalignements, des écarts d'épaisseur ou des ovalisations. Ces défauts peuvent être contrôlés par des mesures ultrasonores ou des instruments optiques.[13]

4 Principe et objectifs du contrôle non destructif

Le Contrôle non destructive des pièces et des appareils est principalement effectuée selon trois principaux phases ; à savoir l'excitation, la perturbation et la révélation.

On apporte une excitation (faisceaux lumineux, vibration, champ magnétique, liquide pénétrant) à une pièce qui va rencontrer, s'il y a une présence de défaut, une perturbation ; et par conséquence, on va ressortir une révélation (d'une façon empirique via un capteur, camera, système d'imagerie...) qui nous permet de détecter ce défaut [21].

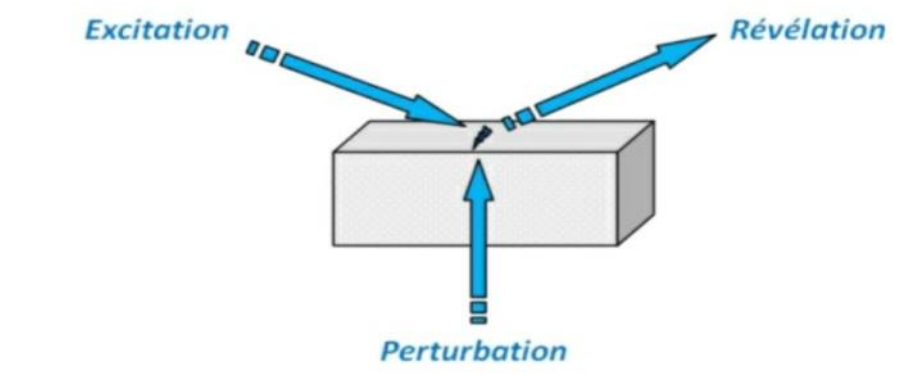


Figure II. 1 : Principe de contrôle non destructif.

Le C.N.D utilise une grande variété d'équipements, industriels et non industriels dans le laboratoire cible, afin de :

- Détecter l'hétérogénéité et les anomalies dans les objets contrôlés.
- Testez si la pièce ou l'appareil peut remplir la fonction requise.
- Amélioration de la conception de l'appareil et des paramètres de fabrication.
- Prévenir les risques industriels et éviter les arrêts de production (image).
- Garantir la satisfaction client.

5 Les différents types de contrôle non destructif

Il existe énormément de techniques mais six d'entre elles sont particulièrement utilisées par l'industrie de nos jours. Ces techniques permettent d'effectuer la majorité des contrôles, mais certaines d'entre elles peuvent s'avérer parfois très coûteuse en matériel.

Les techniques de CND les plus couramment utilisées aujourd'hui se répartissent en deux grandes familles et sont étroitement liées à la localisation des anomalies dans la pièce inspectée. Pour cette raison, ils sont divisés en deux familles à savoir

- La première concerne la méthode de surface ou méthode de surface, où les défauts à détecter se trouvent sur (éventuellement en dessous) la surface externe à inspecter.
- La deuxième méthode implique la méthode globale ou volumique, où les défauts à détecter se situent dans le volume de l'objet étudié

La Figure II. 2 suivante présente un schéma qui résume les principaux techniques du méthode CND.

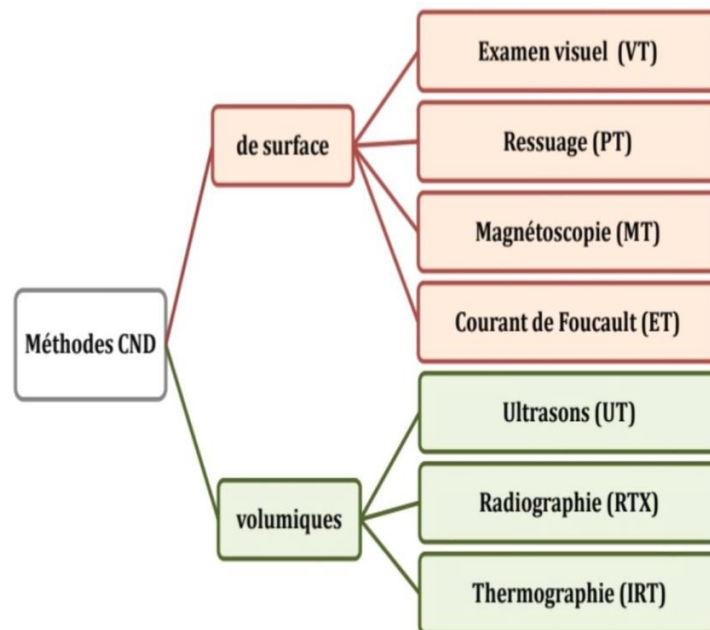


Figure II. 2: Classification des méthodes de CND.

6 Importance du contrôle non destructif

Le contrôle non destructif (CND) regroupe un ensemble de techniques permettant d'évaluer des matériaux ou des produits soumis à différents types de sollicitations sans les endommager. Ces méthodes permettent de garantir la fiabilité du produit pour l'utilisateur final et facilitent considérablement le processus de sélection des matériaux.

Le CND n'altère pas les propriétés du matériau et ne présente pas de danger pour l'opérateur, ce qui en fait une solution sûre et efficace pour la détection des défauts. Même les plus petits défauts peuvent être détectés, ce qui améliore considérablement la qualité du produit et la confiance des clients.

De nombreuses industries manufacturières adoptent ces techniques afin de réduire les coûts et les délais de contrôle, tout en maintenant un haut niveau de qualité.[14]

6.1 Le contrôle visuel

Ce type de contrôle non destructif est mis en œuvre avant toutes les autres techniques CND. Cette technologie de contrôle s'effectue à l'œil nu et permet de détecter d'éventuelles anomalies de surface. Cependant, seul ce contrôle ne nécessite pas de technologie particulière,

puisque'elle est basée sur l'observation, les conditions d'observation doivent être définies et optimisées [22].

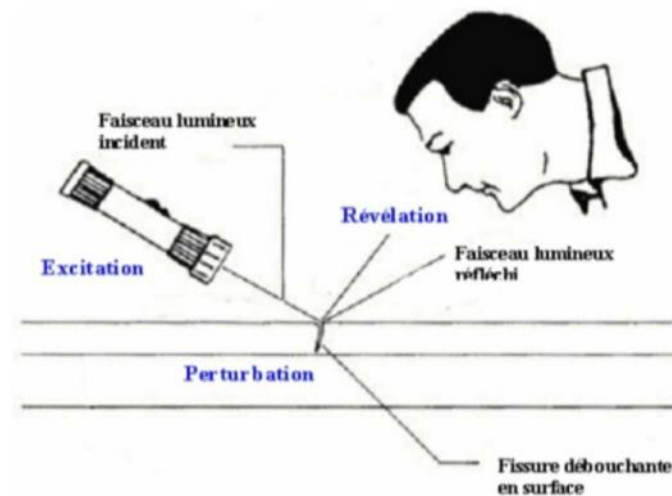


Figure II. 3 : Principe de l'examen visuel [23].

Afin de mise en œuvre ce type de contrôle, il nécessite les conditions suivants :

6.1.1 L'éclairage

Les conditions d'éclairage sont très importantes dans toute observation d'objet. Pour la fiabilité du contrôle optique, la première chose à faire est de vous mettre dans ces états énergétiques, la luminosité et la longueur d'onde permettent à l'œil de fonctionner au mieux. Par conséquent, un éclairage de 300 lux ou plus avec une lumière vert-jaune de $0,55 \mu\text{m}$ est optimal.

Il s'agit alors d'adapter le type et l'orientation de l'éclairage au type de défaut afin d'améliorer le contraste [24].

L'éclairage diffus est utilisé, par exemple, lors de la recherche de divers défauts à partir d'un ensemble de sources lumineuses placées derrière un verre dépoli avec des directions indéfinies [24].

6.1.2 L'œil et ses limitations

Bien que l'œil soit un excellent capteur optique, les tests non destructifs ont encore des limites qui doivent être prises en compte. Il besoin d'aides visuelles ; Ce sont des optiques qui améliorent les performances de l'œil et, plus généralement, offrent la possibilité de contrôler la surface [24].

6.1.3 Outils optiques classiques

Ce sont principalement des loupes et des loupes, généralement composées d'une ou deux lentilles, donnant un grossissement d'environ 1,5x à 20x. Une loupe binoculaire, peut-être un microscope, avec un grossissement variable et un éclairage intégré.



Figure II. 4 : Un examen visuel avec loupe



Figure II. 5 : . Un examen visuel avec Loupe binoculaire

6.1.4 Appareils optiques spécifiques

Un dispositif optique spécial a été développé pour les CND. Un endoscope est un appareil permettant de visualiser des surfaces qui ne sont pas directement accessibles à l'œil, telles que les parois des vaisseaux. Ou cavités, alésages, trous borgnes. Développé à l'origine pour les examens liés au diagnostic médical, l'endoscope à lentille traditionnel a été remplacé par un émetteur, imageur à fibre optique.



Figure II. 6 : Un examen visuel par appareils optiques spécifiques

6.2 Contrôle par ressuage

L'inspection par ressuage utilise l'accumulation naturelle d'un liquide autour d'une discontinuité pour créer une indication visible d'une fissure ou d'une autre ouverture de surface. L'action capillaire attire le liquide vers la discontinuité par rapport à son environnement. Afin de localiser la zone contenant l'excès de liquide (zone de défaut), l'arrière-plan doit offrir un contraste suffisant, permettant ainsi une détection claire du défaut à la surface.[15]

6.2.1 Principe de l'inspection par ressuage

L'inspection par ressuage repose sur la capacité d'un liquide pénétrant à s'introduire dans les discontinuités ouvertes à la surface d'une pièce solide, sous l'effet des phénomènes de capillarité et de tension superficielle. La capillarité permet au liquide de s'infiltrer dans les fissures ou porosités, même très fines, tandis que la viscosité du liquide joue un rôle essentiel dans sa capacité de pénétration : un liquide trop visqueux peut ne pas atteindre les défauts les plus étroits.(Figure II. 7)

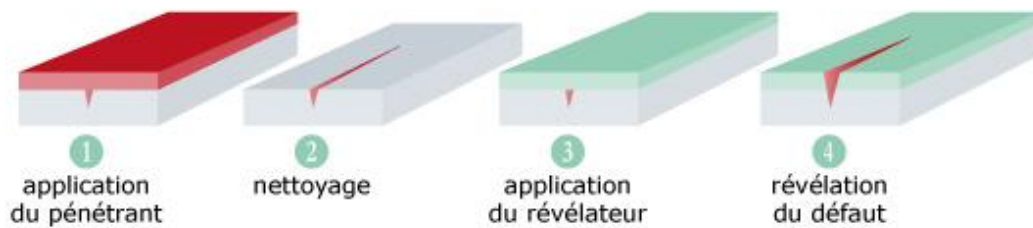


Figure II. 7 : Principe de l'inspection par ressuage

Une fois l'excédent de pénétrant éliminé, l'application d'un révélateur favorise la remontée du produit piégé dans les cavités vers la surface, rendant ainsi les défauts visibles. La détection peut être réalisée sous lumière blanche pour les pénétrants colorés (figure II.9), ou sous lumière ultraviolette (dite lumière noire) dans le cas des pénétrants fluorescents (figure II.10). Ce dernier procédé est particulièrement sensible : les zones contenant du pénétrant fluorescent brillent sous UV, tandis que les surfaces saines restent sombres, facilitant ainsi l'observation de défauts fins.

Des systèmes de détection avancés, comme les balayages laser, peuvent être utilisés pour accroître la sensibilité et la fiabilité de l'inspection. Toutefois, leur usage reste généralement limité aux essais en laboratoire ou à des applications spécialisées.[15]



Figure II. 8 : Fissuration détectée par pénétrant coloré

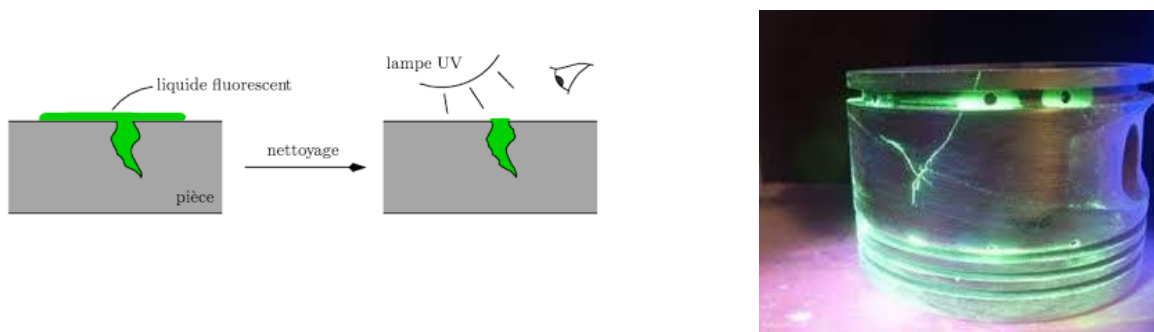


Figure II. 9 : contrôle par Ressuage avec pénétrants fluorescents

Avantages de ressuage

- Méthode simple, rapide et peu coûteuse.
- Très sensible aux défauts de surface, même fins.
- Applicable à de nombreux matériaux : métaux, plastiques, céramiques...
- Convient aux pièces de formes complexes.
- Résultats visuels faciles à interpréter.

Inconvénients de ressuage

- Ne détecte que les défauts ouverts à la surface.
- Nécessite un nettoyage minutieux avant et après l'essai.
- Incompatible avec les matériaux poreux (sauf traitement préalable).
- Nécessite plusieurs étapes et temps de traitement.
- Certains produits chimiques utilisés peuvent être toxiques ou inflammables.

6.3 Contrôle par magnétoscopie

Le contrôle par magnétoscopie est une méthode de contrôle non destructif utilisée pour détecter des discontinuités superficielles ou légèrement sous-surfaciques dans les matériaux ferromagnétiques. Elle repose sur l'aimantation de la pièce à inspecter par l'application d'un champ magnétique. En présence d'un défaut, comme une fissure, les lignes de champ magnétique sont perturbées, créant une fuite de flux magnétique à l'endroit de la discontinuité. Des particules magnétiques, généralement en poudre sèche ou en suspension dans un liquide, sont ensuite appliquées sur la surface. Ces particules s'accumulent au niveau

des fuites de flux, rendant les défauts visibles à l'œil nu ou sous lumière ultraviolette lorsqu'un révélateur fluorescent est utilisé.

Cette méthode est particulièrement adaptée pour inspecter les soudures et les composants soumis à des sollicitations mécaniques élevées, comme les rotors, les aubes ou les corps de turbine. Elle présente l'avantage d'être rapide, sensible et relativement simple à mettre en œuvre, mais elle est limitée aux matériaux ferromagnétiques.



Figure II. 10 : Contrôle par magnétoscopie

6.3.1 Principe du contrôle par magnétoscopie

Aimantation de la pièce : La pièce à tester est soumise à un champ magnétique (généré par un électroaimant, un courant électrique, ou une bobine). Ce champ traverse la pièce.

Présence d'un défaut : Si la pièce contient une fissure ou un défaut à la surface ou proche de la surface, le flux magnétique est perturbé. Cela crée une fuite de flux magnétique au niveau du défaut.

Application de particules magnétiques : Des particules magnétiques (sèches ou en suspension dans un liquide) sont appliquées à la surface de la pièce. Ces particules peuvent être colorées ou fluorescentes.

Attraction des particules : Les particules s'accumulent au niveau des fuites de flux (défauts), formant une indication visible à l'œil nu ou sous lumière UV (en cas de particules fluorescentes). (Figure II. 11)

-

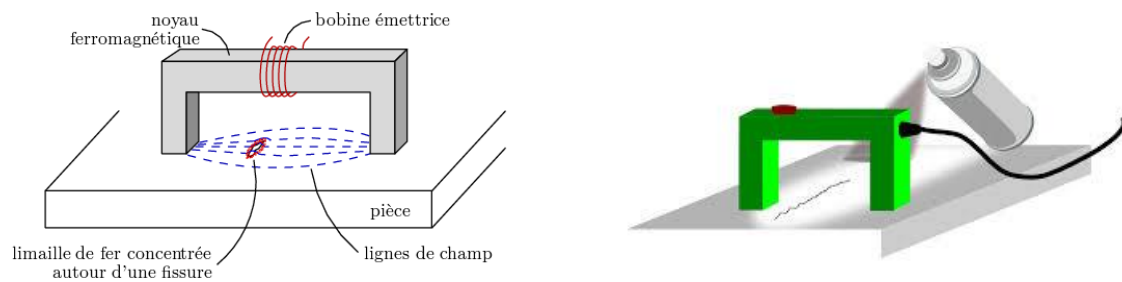


Figure II. 11 : Principe de contrôle par magnétoscopie

Avantages de contrôle par magnétoscopie

- Méthode rapide et simple à mettre en œuvre
Permet une inspection visuelle immédiate.
- Très sensible aux défauts de surface ou proches de la surface
Excellente pour détecter des fissures fines, criques, piqûres, soufflures...
- Coût relativement faible
Moins coûteuse que la radiographie ou les ultrasons.
- Applicable à des formes complexes
Convient aux pièces avec géométrie irrégulière.
- Inspection en production ou sur site
Utilisable facilement en atelier, en chantier ou en maintenance.

Inconvénients de contrôle par magnétoscopie

- Limité aux matériaux ferromagnétiques
Ne fonctionne que sur l'acier, le fer, certains alliages de nickel ou de cobalt.
- Détection uniquement en surface ou très proche de la surface
Ne permet pas de localiser les défauts internes profonds.
- Besoin d'un bon contact magnétique
Nécessite parfois un nettoyage ou une préparation de surface.
- Présence possible de faux positifs
Les indications peuvent être mal interprétées si mal appliquée.
- Nécessite une démagnétisation après contrôle
Certaines pièces doivent être démagnétisées avant leur remise en service.

6.4. Contrôle par Ultrason

Cette technologie permet une inspection non destructive très efficace des pièces. Afin que nous puissions : Vérifiez les fissures, les vides, les inclusions métalliques, les poches de gaz, etc. Les ultrasons sont la vibration mécanique de liquides ou de solides et ont les propriétés suivantes : Plage audible de l'oreille humaine normale (16 Hz à 16KHz).

Confirmation ou mesure de l'épaisseur lorsque les techniques conventionnelles ne sont pas possibles Utilisable (par exemple pour vérifier l'épaisseur de paroi restante du réservoir contenant produits corrosifs

Cette méthode est particulièrement adaptée aux objets aux formes géométriques simples plaques, tubes, etc.



Figure II. 12 : Contrôle par ultrason

6.3.2 Principe du contrôle par Ultrason

Émission d'une onde ultrasonore : Une sonde émettrice génère une onde ultrasonore qui pénètre dans la pièce à inspecter.

Propagation dans le matériau: L'onde se propage à travers la matière à une vitesse connue, propre au matériau.

Réflexion sur les interfaces : Lorsqu'elle rencontre un défaut (fissure, inclusion, porosité...) ou la face opposée de la pièce, l'onde est réfléchie.

Réception du signal : La sonde (ou une seconde sonde) capte l'écho de retour.

Un appareil (oscilloscope, écran d'analyse) affiche un signal (appelé A-scan) représentant les échos.

Interprétation : En analysant la position et l'intensité des échos, l'opérateur peut localiser et dimensionner les défauts.

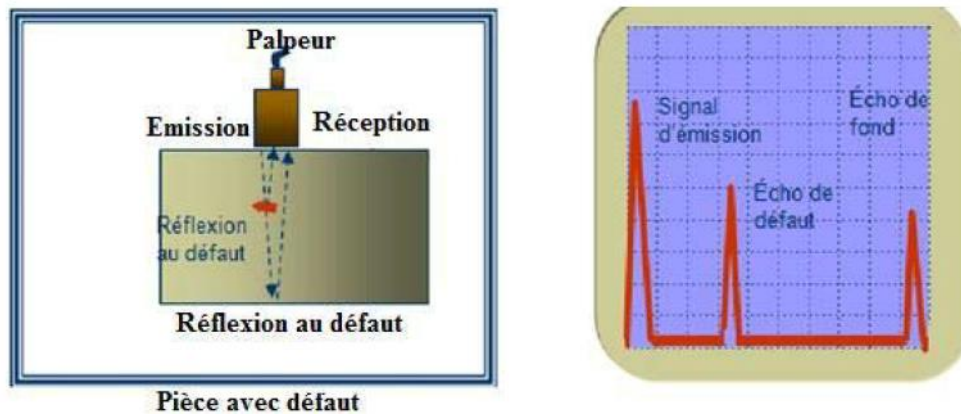


Figure II. 13 : Principe du Contrôle Par Ultrason

Types d'ondes :

On distingue trois types d'onde :

Onde longitudinale ou de compression

La gestion de frisson des particules est correspondante à la gestion de roulement des ondes.

Onde transversale ou onde de cisaillement

La direction de vibration des particules est perpendiculaire à la direction de propagation des ondes.

Onde de surface

Onde générée parallèlement à la surface d'un solide en superposant deux ondes, une onde longitudinale et une onde transversale. Dans (Figure II. 14) suivante, on illustre les trois types d'onde :

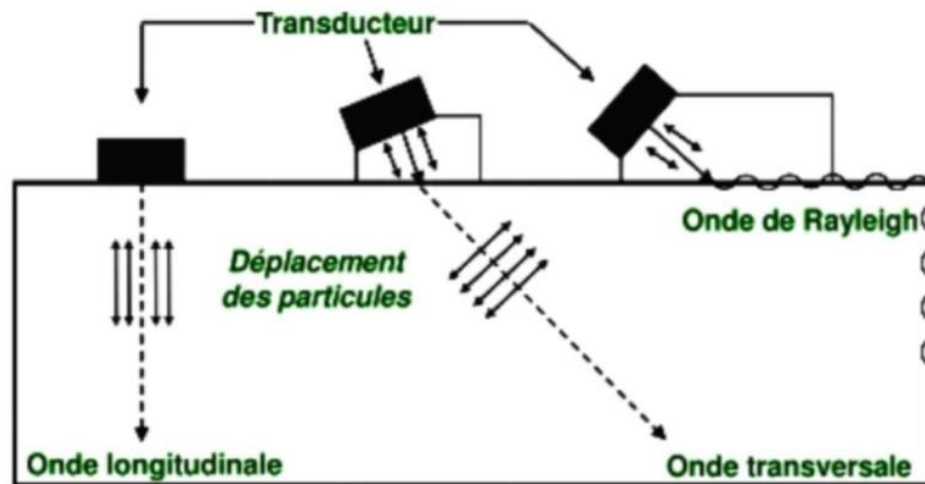


Figure II. 14 : Trois types d' Ondes.[16]

Avantages du contrôle par ultrasons

- Détection des défauts internes : Permet de localiser précisément des fissures, inclusions ou porosités à l'intérieur du matériau.
- Grande précision : Mesure très précise de la position et de la taille des défauts.
- Mesure d'épaisseur possible : Idéale pour évaluer l'épaisseur résiduelle de réservoirs, tuyauteries, etc.
- Résultats immédiats : Analyse possible en temps réel avec affichage sur écran.
- Accessible des deux côtés ou d'un seul côté : En mode écho, un seul côté de la pièce Peut suffire.

Inconvénients du contrôle par ultrasons

- Nécessite un opérateur qualifié : L'interprétation des signaux demande de l'expérience et une onne formation.
- Préparation de la surface nécessaire : La zone d'inspection doit être propre, lisse, et parfois polie.
- Utilisation de couplant obligatoire : Un gel ou un liquide est nécessaire pour assurer la transmission des ondes
- Moins efficace sur pièces rugueuses ou très minces : La rugosité ou l'épaisseur trop faible réduit la fiabilité du signal.
- Matériaux très hétérogènes peu adaptés : Les matériaux composites ou poreux diffusent mal les ultrasons.

6.5. Le contrôle par radiographie

Le contrôle par radiographie est une méthode de Contrôle Non Destructif (CND) qui permet de détecter des défauts internes dans des matériaux solides (métaux, plastiques, composites...) en utilisant des rayonnements ionisants, tels que les rayons X ou les rayons gamma.



Figure II. 15 : Le contrôle par radiographie.

6.3.3 Principe du contrôle par radiographie :

- Une source de rayonnement (tube à rayons X ou isotope radioactif comme l'iridium-192 ou le cobalt-60) émet un faisceau qui traverse la pièce à inspecter.
- Les rayonnements sont partiellement absorbés par la matière , Les zones saines absorbent normalement.

Les zones avec défauts internes (fissures, soufflures, inclusions, porosités, etc.) laissent passer davantage de rayonnement.

- Le rayonnement transmis est capté sur un film radiographique (ou détecteur numérique), ce qui produit une image (radiogramme).
- L'analyse de cette image permet d'identifier et de localiser les défauts.(Figure II. 16)

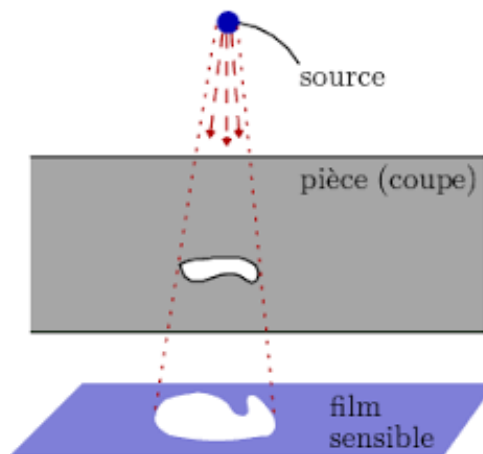


Figure II. 16 : le principe du contrôle par radiographie.

Avantages du contrôle par radiographie

- Permet de détecter des défauts internes de manière très précise.
- Donne une image permanente des défauts.
- S'applique à de nombreuses formes et matériaux.
- Très utilisé pour les soudures, les pièces moulées et les assemblages critiques.

Inconvénients du contrôle par radiographie

- Méthode dangereuse : nécessite une protection contre les radiations et du personnel qualifié.
- Moins efficace pour détecter des défauts plans parallèles au faisceau (ex. : fissures verticales).
- Peut être coûteux (équipements, sécurité, films, développement).
- Moins adapté aux grandes épaisseurs (selon la source utilisée).

7 Les défauts courants dans la partie chaude d'une turbine a gaz

La partie chaude d'une turbine à gaz est soumise à des conditions de fonctionnement extrêmes, caractérisées par des températures très élevées (souvent supérieures à 1000 °C), des pressions importantes, ainsi que des sollicitations thermomécaniques cycliques. Ces conditions favorisent l'apparition de plusieurs types de défauts, tant au niveau des matériaux que des soudures. Parmi les plus fréquents, on peut citer les Fissures oxydation et fluage. (Figure II. 17)

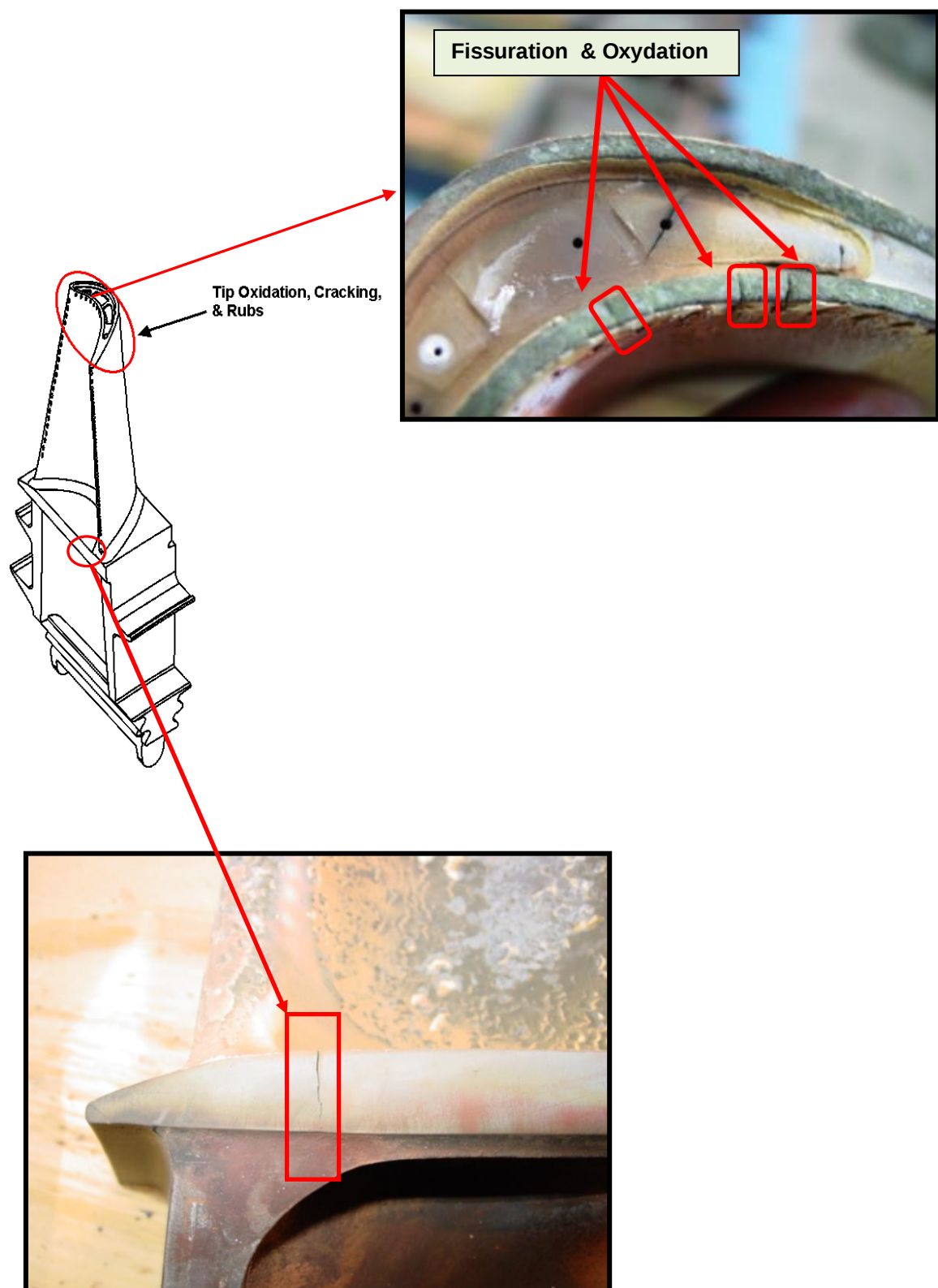


Figure II. 17 : Fissuration et oxidation sur un aube de turbine a gaz

8 Conclusion

En résumé, chaque méthode CND propose différents paramètres à prendre en compte. Il est important d'être conscient du type de discontinuité que vous recherchez, du matériau que vous recherchez pour cette discontinuité et des limites de votre entreprise. Aucune technologie n'est meilleure qu'une autre. Chaque technique a ses propres forces qui peuvent révéler l'exécution d'un test non destructif. Il est de la responsabilité du contrôleur de décider quelle technologie est nécessaire et comment la mettre en œuvre.

Par conséquent, il est important d'envisager de déterminer s'il existe un meilleur moyen d'obtenir une précision en termes de temps et de budget.

Chapitre III

Résultats & Discussions

Introduction

Ce chapitre est consacré à la description du matériel utilisé et des méthodes expérimentales mises en œuvre pour le contrôle non destructif des soudures sur une partie chaude de la turbine à gaz de type GR LM5000. L'objectif est d'identifier les défauts susceptibles d'affecter la fiabilité de ces composants critiques, soumis à de fortes contraintes thermomécaniques.

1 Matériels utilisés.

1.1 Présentation de la turbine LM5000

La turbine LM5000 est une turbine à gaz industrielle de deuxième génération, développée par General Electric à partir du moteur d'avion CF6-50 (Figure III. 2). Elle a été conçue pour répondre aux besoins croissants de puissance dans les secteurs marin et industriel, en s'appuyant sur les retours d'expérience positifs de la LM2500.[17]

L'objectif était de créer une turbine d'une puissance environ deux fois supérieure à celle de la LM2500, soit dans la classe des 50 000 chevaux (≈ 37 MW), tout en offrant un rendement énergétique plus élevé grâce à l'utilisation de matériaux et de technologies plus avancés.

Depuis sa première commande en **1978**, la LM5000 a démontré sa valeur dans les domaines suivants :

- Production d'électricité industrielle (centrales à gaz),
- Cogénération (électricité + vapeur pour procédés industriels),
- Applications marines, notamment dans la propulsion ou les systèmes auxiliaires.[17]

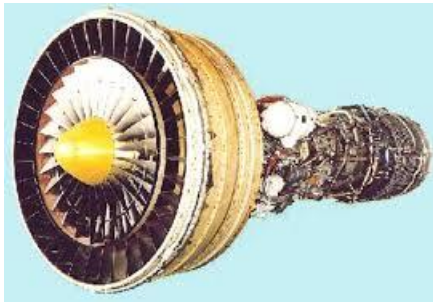


Figure III. 1 :Turbine type TF39



Figure III. 2:Turbine type CF9



Figure III. 3:Turbine type LM2500

Figure III. 4:Turbine type
LM5000

La turbine à gaz LM5000, dérivée du moteur d'aviation **CF6-50**, est utilisée dans l'industrie pour la production d'électricité et la compression de gaz. Elle comporte une **partie chaude** incluant :

- les aubes de turbine,
- les disques,
- les conduits de combustion, et les chambres de combustion.

Ces zones sont soumises à des températures élevées (jusqu'à 1200 °C), ce qui rend les soudures particulièrement vulnérables à certains défauts tels que les fissures à chaud, la porosité ou encore le criquage.[17]

Nous présenterons une description approfondie de la **turbine à gaz de type LM5000**, Ce type de turbine est largement utilisé dans l'industrie pétrolière, notamment pour **l'entraînement de compresseurs centrifuges**, grâce à sa grande fiabilité et sa capacité à fonctionner sous des conditions extrêmes.

La LM5000 se distingue par sa **forte admission d'air** et par une **évacuation de gaz chauds à haute température**, ce qui en fait un équipement de choix pour les stations de compression de gaz et les installations énergétiques.

Nous procéderons à une **analyse technologique et fonctionnelle** de cette turbine, en décrivant de manière détaillée **chacune de ses parties constitutives** : compresseur, chambre de combustion, turbine haute pression, turbine basse pression

2-2- Caractéristiques de la turbine à gaz LM 5000[17]

Les caractéristiques techniques définissant une turbine à gaz type LM **5000** sont résumées comme suit:

Fabricant	Générale Electrique
Température d'entrée turbine	≈ 1200–1250°C
Vitesse de rotation	≈ 3 600 tr/min (adaptée aux générateurs 60 Hz)
Système de refroidissement	Refroidissement par air des aubes et aubages
Combustible	Gaz naturel ou distillats liquides
Poids	≈ 20 à 25 tonnes

2 Produits Utilises

Parmi les méthodes de contrôle non destructif cité dans le chapitre précédent, l'application de la technique de ressuage sera l'objet de ce chapitre.

Pour réaliser cette étude, nous avons fait appel à une gamme de produits.

Les produits utilisés dans le cadre de cette étude sont le nombre du trois à savoir ; le révélateur de type FLUXO R175 et les deux pénétrants FLUXO P125 et HM-3A.

L'ensemble des produits utilisés est présenté en détail sous-dessous(Figure III. 5) ainsi que les affiches techniques de ces produits sont présenté dans l'annexe.



Figure III. 5 : Les Produits utilisés dans le contrôle par ressuage

2.1 Le pénétrant Fluxo P125

Dans le cadre du contrôle non destructif par ressuage, nous avons utilisé le pénétrant coloré de type, un produit largement reconnu pour sa sensibilité moyenne et sa fiabilité dans la détection des discontinuités ouvertes en surface.

C est un pénétrant rouge visible à la lumière du jour, formulé pour offrir :

- Une bonne mouillabilité sur les métaux usinés ou bruts,
- Une capacité de pénétration efficace dans les fissures capillaires,
- Un nettoyage aisé, sans laisser de résidus gênants sur la pièce.

Il est généralement utilisé en association avec un révélateur blanc, ce qui permet une mise en évidence rapide et contrastée des indications.

Ce choix s'est avéré particulièrement adapté aux composants inspectés (roue basse pression, directrice, injecteur), notamment en raison de leur géométrie complexe[18]

2.2 Le révélateur FLUXO R175

Dans le cadre du contrôle par ressuage, nous avons utilisé le révélateur FLUXO R175, un produit de la gamme non aqueuse formulé spécialement pour les inspections visuelles en méthode colorée. Il est conforme aux normes internationales telles que ISO 3452-2, EN ISO 3452-6 et ASTM E165.

Le FLUXO R175 se présente sous forme de suspension blanche à base de solvants, contenue en aérosol, permettant une application homogène et rapide sur la surface à contrôler. Ce révélateur a pour rôle :

D'absorber le pénétrant résiduel resté dans les fissures après l'essuyage, et de faire ressortir les indications sous forme de traînées rouges vives, assurant un contraste optimal.

Il sèche rapidement et forme un film blanc uniforme qui améliore la visibilité des défauts ouverts en surface, tout en garantissant une bonne sensibilité de détection.[19]

Conditions d'application :

- Température recommandée : **10 °C à 50 °C**
- Agiter l'aérosol avant usage.
- Pulvériser à **20–30 cm** de la surface en fine couche.

3 Méthodes D'études Et Conditions expérimentales

L'inspection a été menée au niveau de la partie chaude de la turbine à gaz GE LM2500, au sein de la station de pompage SP2 de Sonatrach (Biskra). Cette intervention s'est inscrite dans le cadre d'une opération de maintenance préventive, visant à vérifier l'état des composants soumis à de fortes températures et contraintes mécaniques.

3.1 Préparation des pièces à contrôler

Nettoyage préalable des pièces à l'aide de solvants appropriés afin d'éliminer graisses, huiles et impuretés.

Inspection visuelle pour localiser les zones critiques susceptibles de présenter des défauts (zones thermiquement sollicitées et soumises aux contraintes mécaniques).

3.2 Méthodologie du contrôle par ressuage

1. Application du nettoyant: élimination des contaminants de surface.
2. Application du pénétrant rouge: pulvérisé uniformément sur la surface.
3. Temps de pénétration : environ 15 à 20 minutes selon les conditions ambiantes.
4. Essuyage de l'excédent de pénétrant à l'aide d'un chiffon non pelucheux et de solvant.

5. Pulvérisation du révélateur FLUXO R175 : pour faire remonter le pénétrant résiduel hors des défauts.
6. Observation et interprétation des indications rouges sur fond blanc.

L'ensemble des étapes précédentes a été appliqué sur trois différents composants principales d'une turbine à gaz GE de type LM5000 ; tels que la roue à basse pression, la directrice et l'injecteur, les figure suivantes présentent ces pièces et les résultats obtenus sont discuter ultérieurement.

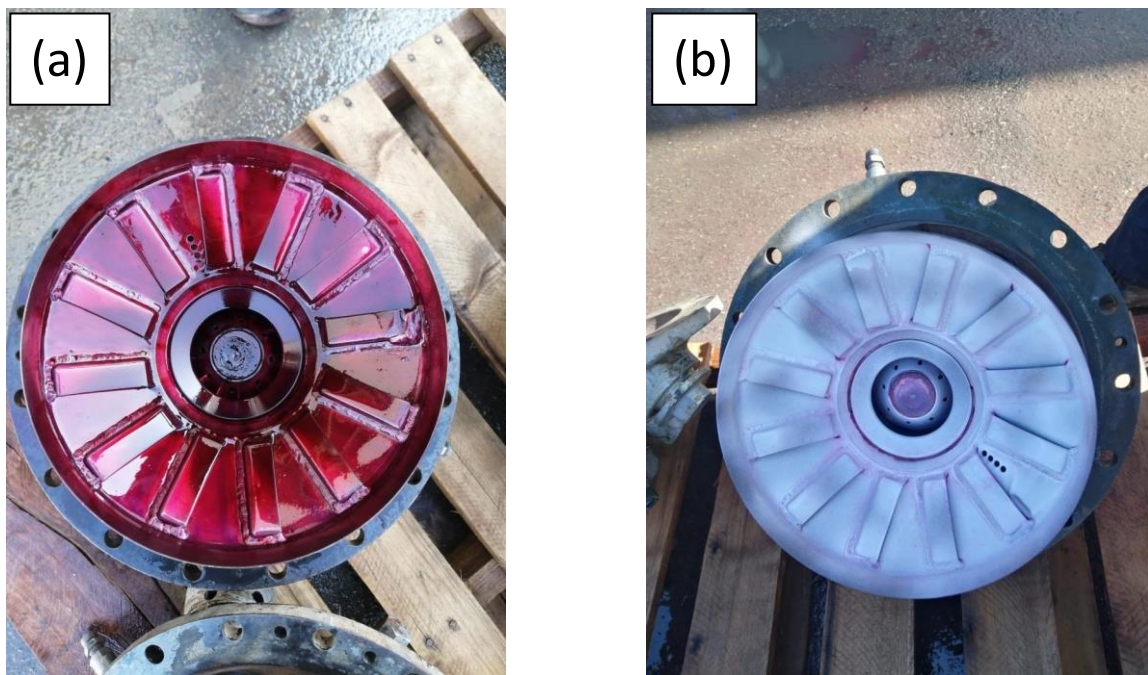


Figure III. 6 : (a) injecteur avec pénétrant, (b) injecteur avec révélateur



Figure III. 7 : (a) stator avec pénétrant, (b) stator avec révélateur

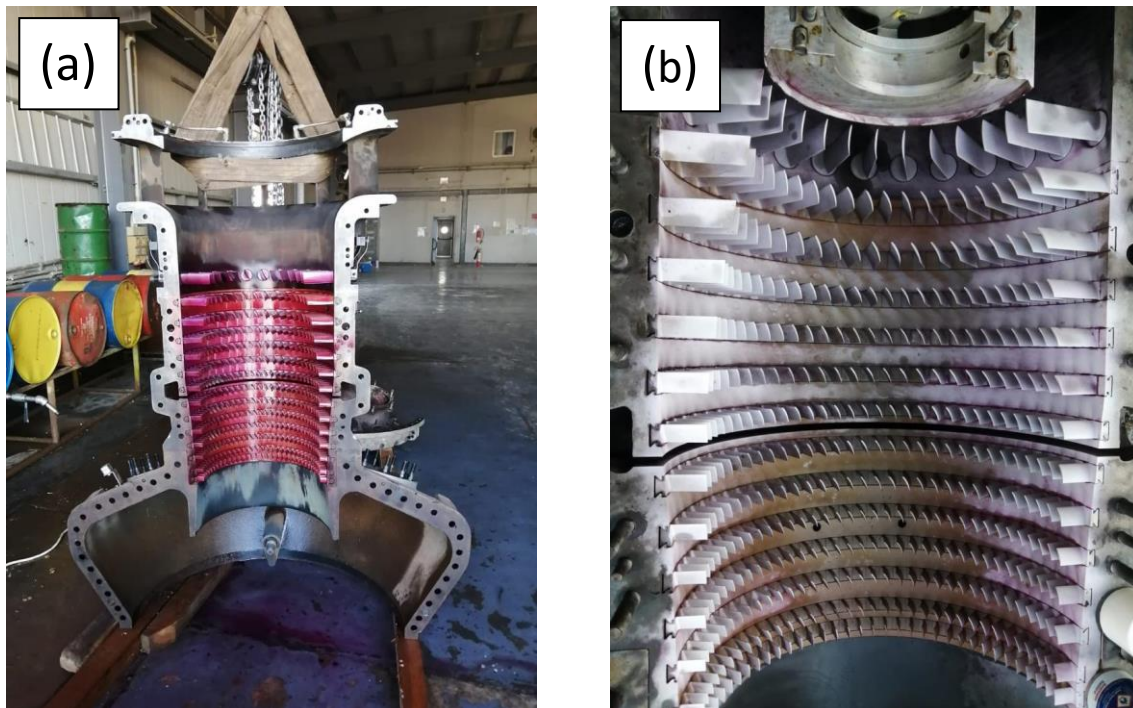


Figure III. 8 : (a) les aubes fix avec pénétrant, (b) les aubes fix avec révélateur

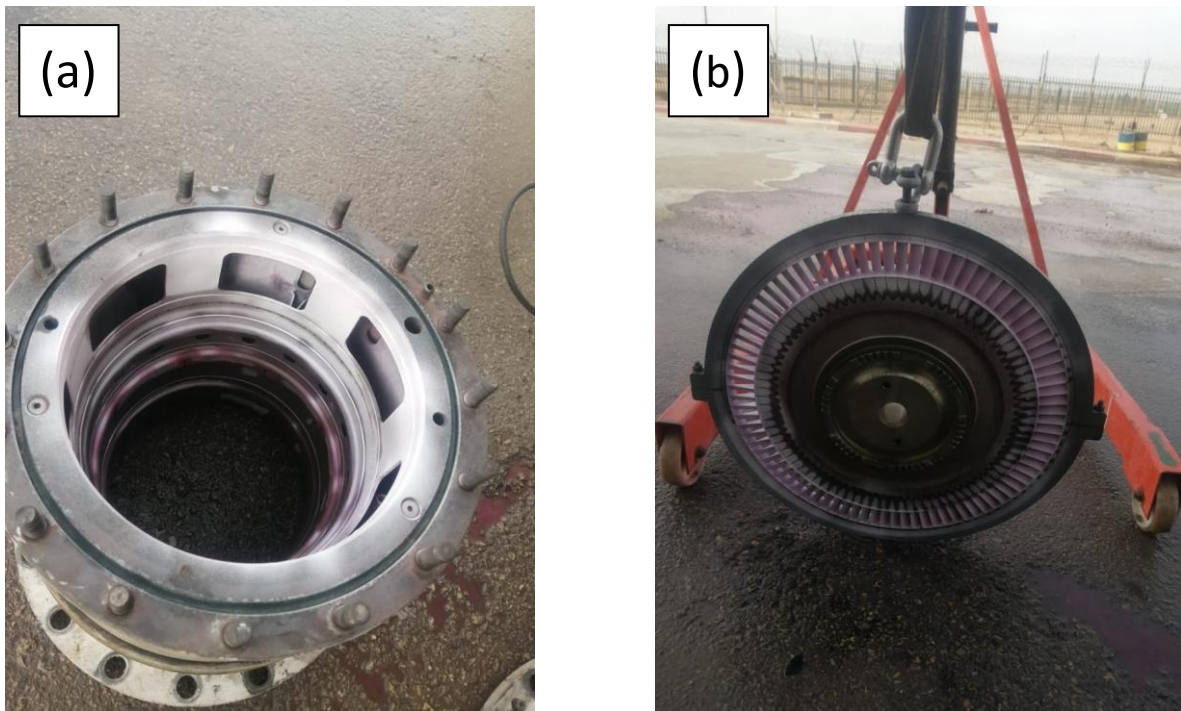


Figure III. 9 : (a) chambre de combustion de LM5000, (b) la roue de LM5000

4 Résultat Et Discussions

D'après les résultats obtenus de la technique CND du ressuage appliquée aux différents pièces de la turbine à gaz de type LM5000, nous avons constaté que à la dernière étape de l'ajout du révélateur, l'absence du couleur rouge qui peut être expliqué par le non absorbance du produit pénétrant.

L'ensemble des pièces testé est en bonne état et l'absence d'aucune fissure qui peut être remonté pour exploitation sur machine. Donc les pièces sont saines et ne présentent pas de fissuration ou de porosités ouvertes en surface

5 Conclusion

La méthode de ressuage utilisée a permis une vérification rapide, fiable **et** économique de l'état de surface des composants critiques. Les résultats confirment la bonne intégrité des pièces inspectées, et leur aptitude à continuer le service sans intervention majeure. Ces inspections doivent toutefois être renouvelées périodiquement, en fonction des cycles thermiques et mécaniques subis.

Conclusion générale

Ce travail s'inscrit dans le cadre du contrôle de la qualité et de la fiabilité des soudures dans les parties chaudes des turbines à gaz, éléments cruciaux dans les installations de transport d'hydrocarbures, notamment à la station de pompage SP2 de Sonatrach.

L'étude menée nous a permis de :

- Mieux comprendre les contraintes thermomécaniques extrêmes auxquelles ces composants sont soumis,
- Identifier les zones critiques de soudure susceptibles de présenter des défauts,
- Appliquer concrètement la méthode de ressuage, technique de contrôle non destructif adaptée à la détection de défauts de surface.

Les résultats expérimentaux ont montré que les pièces inspectées (roue basse pression, injecteur, aubes directrices) ne présentaient pas de défauts critiques, et étaient donc conformes pour une remise en service. Cette démarche a également mis en évidence l'importance : d'un choix rigoureux des techniques de CND, la planification des inspections périodiques, et la formation des opérateurs,

Enfin, cette étude a renforcé l'idée qu'il n'existe pas une méthode unique de contrôle, mais que le choix dépend toujours du contexte, du type de pièce, du défaut recherché et des contraintes opérationnelles.

Références

1. *Thermodynamique les turbine*, w.S.c., 2009,téléchargé 20/04/2025.
2. *Boyce, M.P., Gas turbine engineering handbook*2011: Elsevier.
3. *Volponi, A.J., Gas turbine engine health management: past, present, and future trends. Journal of engineering for gas turbines and power*, 2014. **136**(5): p. 051201.
4. *Saravanamuttoo, H.I., G.F.C. Rogers, and H. Cohen, Gas turbine theory*2001: Pearson education.
5. *AMOURIA, S., Causes et mécanismes de la rupture dans les turbines.*
6. *Saravanamuttoo, H.I.H., Rogers, G. F. C., & Cohen, H. (2001). Gas Turbine Theory (5th ed.). Pearson Education.*
7. *Mahmoud, R., MEMOIRE.*
8. *Alston Power, T.à.g.T., manuel d'utilisation», 2002.*
9. *Soller, A., Refusion à l'arc sous vide du superalliage 718: Modélisation du procédé et étude de la formation des "white spots". Institut National Polytechnique de Lorraine, 2006.*
10. *Mahieddine, n., influence du peroxyde d'hydrogene sur la susceptibilite a la corrosion des aciers inoxydables en milieu salin. doctorat thesis (2014), Université de Batna 2. 2017.*
11. *HEDI KAFFEL, t.d.d., la maintenance distribuée : concept, évaluation et mise en œuvre, département de génie mécanique faculté des sciences et de génie université Laval Québec, octobre 2001.*
12. *James Masso, C.C., Heavy-DutyGas Turbine Operating and and G.P.W.A. Maintenance Considerations, GA, 2015.*
13. *ASNT (American Society for Nondestructive Testing), N.T.H., Volume 1: Common Methods, 3rd Edition, 2001.*
14. *Roshan, C.C., et al., Non-destructive testing by liquid penetrant testing and ultrasonic testing—A review. Int. J. Adv. Res. Ideas Innov. Technol, 2019. 5: p. 694-697.*
15. *Raj, B., T. Jayakumar, and M. Thavasimuthu, Practical non-destructive testing*2002: Woodhead Publishing.
16. *Oussama, M.H.M., Contrôle non destructif d'une turbine a gaz de type GE LM2500. Mémoire de master2, 2023.*
17. *Stancliff, R.C. The General Electric LM5000 Marine Gas Turbine. in ASME 1989 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. 1989.*

Références

18. MAGNAFLUX. *Fiche technique – Pénétrant coloré HM-3A. Pénétrant rouge à sensibilité moyenne, c.a.n.A.E., ASTM E165, ISO 3452-2. Magnaflux, ITW, France, 2023. [Consulté en 2025].*
19. *normes ISO 3452-2 et ASTM E165 (SREM)Technologies.*