الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

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



Université de Biskra Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie Mécanique Filière : Génie Mécanique

Option: Transport et Distribution des Hydrocarbures

Réf:

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de:

MASTER

Thème

Causes et mécanismes de la rupture dans les turbines

Présenté par: Sara AMOURIA **Proposé et dirigé par:** Pr. Zakaria BOUMERZOUG

Promotion : Juin 2017



Dédicace

J'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail à:

Ma très chère mère

Mon très cher père

Mes très Chères frères et sœurs

Toute ma famille

A tous mes camarades

A tout mes amis que j'ai connus dans ma vie

A tous les enseignants et toutes les enseignantes de génie mécanique

AMOURIA Sarah

Remerciements

Je remercie tout d'abord le grand puissant Dieu qui m'a éclairé le chemin pour réaliser ce modeste travail.

Mes remerciements très particuliers s'adressent à mon Encadreur Le professeur **BOUMERZOUG Zakaria** qui m'a proposé ce thème de recherche et qui m'a bien orienté durant cette année universitaire.

Mes remerciements sont aussi à mes enseignants qui m'ont formé.

Je remercie Monsieur **CHELGHOUM Salim** de DML (Laghouat) qui nous a fourni des échantillons de la turbine à gaz.

Je remercie le responsable du laboratoire de métallurgie Monsieur **DEGHICHE** qui m'a fourni les moyens nécessaires.

Je remercie l'administration de génie mécanique.

Je remercie toutes les personnes qui m'ont aidé pour réaliser ce mémoire.

Sommaire

Dédicace	
Remerciements	
Liste des figures	Ι
Liste des tableaux	IV
Introduction générale	1

Chapitre I : Généralités sur la turbine à gaz

Introduction	3
I- Généralités sur les turbines	3
I-1-Définition des turbines	3
I-2-Différents types de turbines	4
II-Turbine à gaz	4
II-1-Définition	4
II-2-Utilisation	5
II-3-Caractérisation des organes	6
II-4-Principes de fonctionnement	6
II-5-Théorie de fonctionnement d'une turbine à gaz	8
III-La turbine de détente	9
III-1-Distributeur	9
III-2-Roue de turbine	9
VI- Matériaux de base de fabrication des roues	11
VI-1-Les superalliages	11
VI-1-1-Alliage à base de nickel	12
VI- 1-1-1-L'inconel 718	13
VI-2-Les aciers	14

VI- 2-1- Les aciers inoxydables	14
Conclusion	18

Chapitre II: Généralités sur la rupture par

fissuration

Introduction	19
I-Modes de chargement	19
II-Le phénomène de fatigue thermique	20
II-1-Définition	20
II-2-Mécanismes de fatigue	21
II-2-1-L'amorçage	21
II-2-1-1-Définition	21
II-2-1-2-Evaluation de l'amorçage de fissure	21
II-2-1-3-Les étapes d'amorçage de la fissure	22
II-2-2-La propagation des fissures de fatigue	22
II-2-2-1-Définition	22
II-2-2-2-Les stades de propagation	23
II-2-2-3-Mécanismes d'écrantage de la fissure	24
II-2-2-4-Type de fissuration	27
II-2-2-5-Modes élémentaires de fissuration	27
II-2-3- la rupture par fissuration	28
II-2-3-1-Les faciès de rupture	29
II-2-3-2-Les types de rupture	30
II-2-3-3-Diagramme charge-déplacement	32
II-2-3-4-Classes de matériaux vis-à-vis de la rupture	32
III-Etude des aubes de turbine à gaz	34
Conclusion	37
Chapitre III : Matériaux et méthodes expérimentales	

Introduction	38
I-Matériaux des parties étudiées de la turbine	38

I-1-Préparations des échantillons et attaques chimique	40
II-Techniques de caractérisation	41
II-1-Technique de ressuage	41
II-2-La diffraction des rayons X (DRX)	45
II-3-Microscopie optique (MO)	47
II-4-Microscope numérique	49

Chapitre IV : Résultats et interprétation

Introduction	50
I-Propagation de fissure dans l'aube fabriquée en Inconel 718	50
I-1-Caractérisation macrographique	50
I-2 -Caractérisation par ressuage	54
I-3-Caractérisation microstructurale	54
I-4-Caractérisation par diffractogramme de rayon X	59
II-Propagation de fissure dans le disque fabriquée en acier inox martensitique	
(Z20CDV13)	60
II-1-Caractérisation macrographique	60
II-2- Caractérisation par ressuage	61
II-3-Caractérisation microstructurale	62
I-4-Caractérisation par diffractogramme de rayon X	67
III-Remèdes	67
III-1 La réparation des aubes	67
III-1-1-Types et positions des défauts réparables	68
III-1-2-Limites pratique de réparation des aubes	68
III-2-Procédés de réparation des aubes	69
III-2-1-Procédé de nettoyage	69
III-2-1-Procédés de réparation	70
Conclusion générale	74
Référence	75

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur la turbine à gaz

Figure I.1 Exemple d'une turbine entrainant un compresseur	4
Figure I.2 Les organes de la turbine à gaz	6
Figure I.3 Cycle théorique de Brayton	7
Figure I.4 Schéma présentant le principe de fonctionnement d'une turbine à gaz	7
Figure I.5 Le cycle de la turbine à gaz	8
Figure I.6 Distributeur de turbine	9
Figure I.7 La roue de turbin	10
Figure I.8 La roue de turbine	11
Figure I.9 Microstructures d'un superalliage à différentes échelle	13
Figure I.10 Structure austénitiques	16
Figure I.11 Structure ferritiques	17
Figure I.12 Structure d'un acier inox duplex	17
Figure I .13 Structure martensitique	18

Chapitre II: Généralités sur la rupture par

fissuration

Figure II.1 Chargement cyclique	20
Figure II.2 Amorçage de microfissures dû à la formation d'intrusions et extrusions	22
Figure II.3 Fissure courte	23
Figure II.4 Fissure longue	23
Figure II.5 Schématisation du mécanisme de fermeture induite par plasticité	25
Figure II.6 Schématisation du mécanisme de fermeture induite par la rugosité	25
Figure II.7 Représentation schématique de fermeture induite par l'oxydation	26
Figure II.8 Phénomène de fermeture de la fissure	26
Figure II.9 Modes élémentaires de fissuration	28
Figure II.10 Classement des ruptures selon leur cinétique	29
Figure II.11 Classement des ruptures selon leur observation	29

Figure II .12 Rupture fragile par clivage	30
Figure II.13 Rupture fragile par décohésion	31
Figure II.14 Faciès de rupture ductile	32
Figure II.15 Diagramme charge-déplacement	32
Figure II.16 Classes de matériaux	33
Figure II.17 Fissure et l'érosion sur le bord d'attaque et de fuite.	34
Figure II.18 Propagation de fissures due à la pénétration du soufre et de l'oxygène	
dans le substrat	35
Figure II.19 Une aube fracturée et l'intacte	36
Figure II.20 Fissures dans la surface de l'aube	36

Chapitre III : Matériaux et méthodes expérimentales

Figure III.1 Les deux aubes étudiées	39
Figure III.2 Une partie de disque de turbine à basse pression	39
Figure III.3 Différentes étapes du ressuage	43
Figure III.4 Technique de ressuage appliquée sur nos pièces	44
Figure III.5 Schéma représentent le principe de la diffraction des rayons X	46
Figure III.6 Schéma de fonctionnement d'un diffractomètre rasant de rayons X	46
Figure III.7 Diffractomètre PanalyticalX'Pert (D8 ADVENCE) BRUKER	47
Figure III.8 Microscope optique	48
Figure III.9 Microscope numérique	49

Chapitre IV : Résultats et interprétation

Figure VI.1 Aube en Inconel 718 contenant une fissure	51
Figure VI.2 Aube d'une turbine	53
Figure IV.3 Fissure formée dans l'aube en Inconel 718	54
Figure IV.4 Vue générale de la fissure principale dans l'aube en Inconel 718	55
Figure IV.5 La propagation de fissure dans la structure de l' Inconel 718	56
Figure IV.6 Microfissures dans l'aube en Inconel 718	56
Figure IV.7 Comportement des vitesses de propagation de fissures longues et	
courtes	58
Figure IV.8 Microstructure de l'Inconel 718	58
Figure IV.9 Microstructure de l'Inconel 718	58
Figure IV.10 Diffractogramme de rayon X de l' Inconel 718	59

Figure IV.11 Diagramme de diffraction des rayons X réalisé sur un échantillon	
d'alliage 718 prélevé à mi-rayon du matériau	60
Figure IV.12 Vue macrographique de disque fabrique en acier inox, avec formation	
d'une fissure	61
Figure IV.13 Echantillon prélevée de disque fabrique en acier inox Z20CDV13	61
Figure IV.14 L'analyse par ressuage sur un disque en acier inox	62
Figure IV.15 Forme générale de la fissure dans le disque	63
Figure IV.16 Mécanisme fermeture de fissure induite par la rugosité	64
Figure IV.17 La propagation de fissure dans la microstructure de I 'acier inox	
martensitique	65
Figure IV.18 Grandissement de la propagation de fissure dans la microstructure	
martensitique	66
Figure IV.19 La microstructure de l'acier inox martensitique	66
Figure IV.20 Diagramme de diffraction des rayons X réalisé sur un échantillon	
d'acier inox martensitique	67
Figure IV.21 Soudures typiques de réparation d'aubes de turbines à gaz	68
Figure IV.22 limites de réparation par soudage des aubes du 1 ^{ere} étage d'une turbine	
à gaz (GE modèle MS7000)	69
Figure IV.23 Procédé de réparation d'éléments d'aube	71
Figure IV.24 Les étapes principales prés la réparation final	73

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Composition chimique de l'alliage (en poids et en	
atomique)	40
Tableau III.2 : Composition chimique d'acier inoxydable martensitique	
(d'après EN 10088-1) Z20C13	40
Tableau III.3 : Le réactif de chaque attaque chimique et sa durée	
d'application	41

Introduction générale

Le monde de l'industrie est devenu très complexe, l'enjeu aujourd'hui est autour de la rentabilité en contribuant au développement de la société et en assurant des progrès technologiques satisfaisants, tout en mettant toutes les capacités humaines et matérielles pour arriver à un développement meilleur et une recherche scientifique assez poussée.

La turbine à gaz est un moteur à combustion interne, dont le rôle est la conversion de l'énergie thermique due à la combustion d'un hydrocarbure en énergie mécanique (couple mécanique sur l'arbre de la turbine). Les turbines à gaz ont connus au cours des dernières années un développement considérable dans des nombreuses applications industrielles. Leur grande importance dans les processus de conversion d'énergie peut être appuyée par la diversité de leurs applications qui s'étendent sur différents domaines. Le choix des turbines à gaz pour ces utilisations variées a été fondé en priorité sur leur souplesse d'emploi, leur fiabilité élevée et leur facilité de maintenance face à leurs concurrents traditionnels : turbines à vapeur et moteurs alternatifs.

La fabrication de turbine à gaz, particulièrement la fabrication des aubes qui sont soumises à des températures très élèves des gaz brulés, à des contraintes statiques et dynamiques importantes et à une érosion et /ou une corrosion à chaud pouvant être très sévères. Les aubes subissent donc des dégradations qui sont d'origine métallurgique ou mécanique ; elles ont pour résultats l'abaissement de la fiabilité et de la disponibilité des turbines à gaz et l'augmentation de leur probabilité de défaillance.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier le comportement et les causes de la propagation des fissures en deux éléments de turbine de détente (aube +disque) d'une turbine à gaz, et proposition des solutions de ce défaut.

Pour aboutir à notre objectif, on a pris des échantillons de ces mêmes pièces et qui contiennent quelques fissures. Plusieurs techniques ont été utilisées :

- le contrôle non destructif : ressuage.
- ➢ la diffraction des rayons X (DRX).
- > des observations par microscope optique (MO).
- > des observations par microscope numérique.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres :

- Chapitre I : traite des généralités sur la turbine à gaz et les principaux alliages de fabrications des roues de turbine.
- Chapitre II : présente des généralités sur la fissure et les mécanismes de sa propagation, avec des exemples pratiques.
- Chapitre III : rassemble les techniques de caractérisation de la fissure observée dans les pièces étudiées.
- Chapitre VI : regroupe les résultats de notre étude et leur interprétation.

Chapitre I : Généralités sur la turbine à gaz

Introduction

Les développements des différentes industries (lourde, légère, de l'énergie, de la chaine et pétrochimie etc...) ainsi que l'économie de l'agriculture exige un système d'appareillage qui permet d'améliorer le travail, accélérer les systèmes de productivités, augmenter le volume des produits finis. Parmi les machines ayant un rôle primordial dans les domaines d'activités industrielles, on peut citer les turbines à gaz.

I-Généralités sur les turbines

I-1-Définition des turbines

Les turbines sont des équipements mécaniques rotatifs dont la fonction « moteur » permet d'entrainer des pompes, compresseurs ou générateurs électriques dans l'industrie pétrolière [1]. D'une manière générale, les turbomachines peuvent être définies comme des appareils permettant un échange d'énergie entre un fluide et un dispositif mécanique. L'énergie motrice du système pouvant être aussi bien fournie par le fluide que par le dispositif mécanique, le nombre de turbomachines que nous pouvons rencontrer dans notre quotidien s'en trouve fortement accru. Ainsi, la famille des turbomachines est composée par les ventilateurs, compresseurs, éoliennes, pompes, turbines... [2].

• Exemple

La figure I.1 présente un exemple de turbine :



Figure I.1 Exemple d'une turbine entrainant un compresseur [1].

I-2-Différents types de turbines

On peut diviser les turbines en trois catégories principales :

- Turbine à vapeur d'eau
- Turbines à gas-oil
- Turbines à gaz ou turbines à combustion (TAC)

Pour ce chapitre, on consacrera une grande partie à la turbine à gaz.

II-Turbine à gaz

II-1-Définition

Les turbines à gaz font partie des turbomachines définies par râteau comme étant des appareils dans lesquels a lieu un échange d'énergie entre un rotor tournant autour d'un axe à vitesse constante et un fluide en écoulement permanent. Une turbine à gaz, appelée aussi turbine à combustion, est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteur à combustion interne dont le rôle est produire l'énergie mécanique (rotation d'un arbre) à partir de l'énergie contenue dans un hydrocarbure (fuel, gaz,....) [3-4]. Selon le type de fluide utilisé, dit fluide actif ou fluide moteur, on a affaire à une turbine hydraulique, une turbine à vapeur ou une turbine à gaz. Dans ce dernier cas, le fluide moteur le plus fréquemment utilisé provient des gaz de combustion d'un combustible solide, liquide ou gazeux. Selon le type d'énergie délivrée, les turbines à gaz se répartissent

en deux classes : d'une part, les turbomoteurs fournissant de l'énergie mécanique disponible sur un arbre et, d'autre part, les turboréacteurs fournissant de l'énergie cinétique utilisable pour la propulsion [5].

II-2-Utilisation

C'est dans l'aéronautique que la turbine à gaz s'est imposée en priorité. Les turboréacteurs sont utilisés de façon quasi universelle pour la propulsion des appareils à voilure fixe : avions et missiles. Seule l'aviation générale (tourisme, affaire) utilise encore les moteurs alternatifs mais leur domaine est sans cesse grignoté par la turbine à gaz .pour la voilure tournantes, de façon similaire, les turbomoteurs équipent aussi la quasi-totalité des différents types d'hélicoptères [6].

Parmi l'utilisation non aéronautique, très diversifiées on peut citer :

Les turboalternateurs, destinés aux centrales de pointe et aux groupes de secours, bénéficient au mieux des qualités fondamentales de la turbine à gaz que sont la rapidité de démarrage, la facilité de mise œuvre, la fiabilité élevée ;

✤ Les machines, utilisées dans les stations de pompage et de compression des gazoducs et oléoducs ainsi que sur les plates-formes pétrolières off-shore, bénéficient des mêmes avantages avec en plus l'emploi d'un carburant local bon marché ;

✤ La traction terrestre, qu'elle soit ferroviaire avec les turbotrains ou d'application militaire pour les véhicules blindés, utilise en outre la grande puissance volumique de la turbine à gaz à celles des moteurs Diesel ;

✤ Les installations industrielles dites à énergie totale où le turbomoteur peut fournir simultanément trois formes d'énergie : électrique (alternateur), pneumatique (par prélèvement d'air sur le compresseur), calorifique (récupérateur de chaleur des gaz d'échappement). Le rendement d'ensemble de telles installations est ainsi fortement revalorisé et peut atteindre 50 à 60 % ;

✤ Les groupes auxiliaires de puissance ou GAP constituent enfin une classe de machines bien adaptée à la turbine à gaz : les groupes de conditionnement d'air sont utilisés tant sur les aéronefs que sur les turbotrains, d'autres types de GAP sont employés à des fins militaires (génération d'électricité) ou civiles (groupes de mise en œuvre et de maintenance au sol des avions) [7-8].

II-3-Caractérisation des organes

Dans sa forme la plus simple et la plus répandue, une turbine à gaz est composée de trois éléments:

• Un compresseur : centrifuge ou plus généralement axial, qui a pour rôle de comprimer de l'air ambiant ;

• Une chambre de combustion, dans laquelle un combustible gazeux ou liquide est injecté sous pression, puis brûlé avec l'air comprimé, avec un fort excès d'air afin de limiter la température des gaz d'échappement;

• Une turbine, généralement axial, dans laquelle sont détendus les gaz qui sortent de la chambre de combustion [5].



Figure I.2 Les organes de la turbine à gaz [9].

II-4-Principes de fonctionnement

Elle comporte un compresseur qui comprime l'air aspiré, une chambre de combustion pour augmenter la température du mélange air-carburant la turbine recueille l'énergie du gaz comprimé et chauffé afin de fournir un travail mécanique, et enfin un système d'échappement qui rejette les gaz brulés.une turbine à gaz est représentée par le diagramme de Brayton dans un diagramme T-S [10] :



Figure I.3 Cycle théorique de Brayton [10].

- ✓ 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 1-2 représente l'échappement isobare [10].

L'air est aspiré de l'atmosphère après filtration et refroidissement adiabatique éventuel, comprimé puis en partie mélangé au combustible avec un léger excès d'air. Le mélange est brûlé dans la chambre de combustion puis mélangé au reste de l'air compressé pour obtenir une température d'entrée dans le rotor de la turbine à gaz égale ou inférieure à la valeur limite admissible à l'entrée du rotor. Les gaz détendus dans la turbine produisent la puissance nécessaire au compresseur et la puissance nette pour entraîner un générateur électrique par exemple. Si la détente est complète à l'intérieur de la turbine, les gaz d'échappement sortent à la pression atmosphérique ; ce cycle hypothétique peut être plus facilement simulé puisque on ignore la contrepression exercée par les pertes de charge dans la tubulure de sortie [11].



Figure I.4 Schéma présentant le principe de fonctionnement d'une turbine à gaz [12].

II-5-Théorie de fonctionnement d'une turbine à gaz

Le cycle de la turbine à gaz, c'est-à-dire la succession des états « pressions températures » qui caractérise l'évolution des gaz (air pur d'abord, puis gaz de combustion) à travers les différents organes de la machine [1].



Figure I.5 Le cycle de la turbine à gaz [1].

Il se décompose

- 0-1 : Perte de charge dans le système de filtration d'air.
- 1-2 : Compression adiabatique de l'air ambiant par un compresseur.
- 2-3 : Combustion continue dite à pression constante dans deux chambres de combustion tubulaires.

• 3-4 : Première détente des gaz chauds dans une turbine haute pression à deux étages dont la fonction est d'entraîner le compresseur (appelée générateur de gaz GG).

• 4-5 : Deuxième détente des gaz dans une turbine basse pression qui fournit la utilisable sur un arbre indépendant (turbine libre ou turbine de puissance PT).

• 5-6 : Perte de charge dans la culotte d'échappement et la cheminée [1].

III-La turbine de détente

III-1-Distributeur

C'est une pièce particulièrement sensible car elle est soumise à des contraintes thermiques très importantes. À cet égard, le distributeur du premier étage qui reçoit les gaz issus de la chambre de combustion doit être la plupart du temps refroidi soit par convexion, soit par impact, par de l'air prélevé en sortie du compresseur. Dans les turbines de faibles dimensions, fonctionnant à des températures d'entrée modérées, le distributeur se présente sous la forme d'une pièce monobloc coulée, ou fabriquée en tôles mécano- soudées. Dans les turbines de dimensions plus importantes ou fonctionnant à température très élevée, on le réalise souvent par secteurs coulés et assemblés entre eux mécaniquement ou par soudure. En tant que matériaux, on utilise soit des tôles d'acier réfractaires à base de cobalt, soit des aciers réfractaires ayant de bonnes propriétés de coulabilité. Ces aciers doivent aussi être protégés par des revêtements contre la corrosion [13].



Figure I.6 Distributeur de turbine [1].

III-2-Roue de turbine

• Description

Dans les turbines à gaz, la contrainte technologique majeure concerne la température maximale que peuvent supporter tant les éléments de la chambre de combustion que le premier étage de la turbine, qui sont soumis au flux des gaz d'échappement. La turbine à gaz comporte deux couronnes d'aubage ; l'une fixe, l'autre mobile, et des capacités qui assurent l'alimentation en fluide ainsi que son échappement. Cet ensemble d'organes

constitue un étage ou une cellule de turbomachine. La partie active de la turbine est constituée par la roue ou rotor qui porte les aubages mobiles appelés encore aubes, pales ou ailettes et tourne à vitesse angulaire que l'on supposera constante autour d'un axe. L'espace compris entre deux aubages mobiles constitue un canal mobile ou, sous la réserve d'effets instationnaires, l'écoulement est considéré comme permanent par apport à un repère solidaire du rotor .les aubages mobiles ont une forme aérodynamique très complexe. La couronne d'aubages mobiles, qui est portée par une roue aminée d'un mouvement de rotation à vitesse angulaire constante, opère un échange d'énergie mécanique entre le fluide et l'arbre. L'écoulement relatif à l'espace tournant y est globalement permanent ; Les couronnes d'aubages, qu'elles soient fixes ou mobiles, sont fréquemment appelées grilles d'aubes. Le rôle des aubes du rotor est convertir, de l'énergie cinétique des gaz chaude sortants de la chambre de combustion, en énergie mécanique [5].

Existant sous deux modes de construction :

Les roues monoblocs, où pales et disque forment une pièce unique. Cette solution s'applique aux turbines de dimensions faibles, fonctionnant à température modérée. La roue est le plus souvent coulée et quelquefois usinée à partir de bruts ébauchés. Les matériaux utilisés sont les alliages spéciaux (nickel, chrome, molybdène) et matériaux céramiques.

Les roues à pales rapportées, où pales et disque sont assemblés mécaniquement, généralement par pieds de sapin et brochage. Cette technique permet un choix différent pour le matériau de la pale, qui doit avoir de bonnes caractéristiques de fluage, et pour le matériau du disque, qui doit posséder une bonne tenue à la fatigue [13].



Figure I.7 La roue de turbine [1].

Chapitre I

Dans les turbines à gaz, les roues de turbine ont pour fonction de convertir l'énergie des gaz issus de la combustion, en énergie mécanique. Elles sont constituées de disques sur lesquels sont montées des pales par des liaisons de type « pied de sapin» [14].



Figure I.8 La roue de turbine [14].

La roue est constituée d'un disque à la périphérie duquel on trouve les pales. Le disque est soit solidaire de l'arbre, soit monté sur celui-ci par un accouplement de type curviccoupling. Pour limiter la conduction de température, ses faces avant et arrière sont refroidies par circulation d'air. Il comporte, en outre, des masses ou des cordons permettant l'équilibrage. Les pales de turbine peuvent être taillées dans la masse ou rapportées par un procédé quelconque. Le procédé le plus utilisé est la fixation dite en pied, qui permet de répartir convenablement les efforts. Les pales rapportées sont, par ailleurs, disposées de façon à réaliser l'équilibrage statique et dynamique du rotor. Le jeu entre l'extrémité des pales et le carter extérieur est d'une grande importance ; il doit être ajusté pour obtenir un bon rendement (fuite minimum) sans provoquer le contact des pales [1].

VI- Matériaux de base de fabrication des roues

VI-1-Les superalliages

Un superalliage ou alliage à haute performance est un alliage métallique présentant une excellente résistance mécanique et une bonne résistance au fluage à haute température (typiquement 0,7 à 0,8 fois sa température de fusion), une bonne stabilité surfacique ainsi qu'une bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation. Les superalliages présentent typiquement une structure cristalline cubique à face centrée de type austénitique. Les éléments d'alliages à la base d'un superalliage sont le plus souvent le nickel, le cobalt et le

fer, mais aussi le titane ou l'aluminium. Le développement des superalliages s'est appuyé à la fois sur des innovations dans les domaines de la chimie et des processus de fabrication, réalisées dans les domaines de l'aérospatial et de l'énergie. Les superalliages trouvent leurs applications habituelles dans les turbines des moteurs d'avion (aubes de turbine des veines chaudes des turboréacteurs), les turbines à gaz, ou les turbines de l'industrie marine. Les superalliages sont des matériaux métalliques destinés à des usages à haute température comme les zones chaudes des turbines à gaz ou des turboréacteurs. Ils permettent notamment des gains de rendement en offrant la possibilité à ces systèmes de fonctionner à des températures plus élevées.

On peut diviser les superalliages en trois familles :

- Alliages à base de fer-nickel-chrome ;
- Alliage à base de nickel;
- Alliage à base de cobalt.

Leur résistance élevée au fluage est due principalement aux trois facteurs :

- Refroidissement de la matrice par addition des éléments : molybdène, tungstène, cobalt, niobium, tantale, vanadium ;
- Présence d'une phase intermétallique finement précipitée ;
- Présence de carbures [2].

VI- 1-1-Alliage à base de nickel

Les superalliages à base de nickel doivent leurs excellentes propriétés à leur microstructure particulière. Ce sont des alliages constitués d'une matrice austénitique cubique à faces centrées (CFC), solution solide à base de Ni (la phase γ '), renforcée par des précipités cubiques de phase γ ' [15].



Figure I.9 Microstructures d'un superalliage à différentes échelle : a) maille cristallographique b) précipités cohérents c) microstructure en cubes observée par microscopie électronique à balayage [15].

VI- 1-1-1-Inconel 718

L'INCONEL un alliage constitué de Nickel, de fer et de Chrome. Contrairement aux aciers inoxydables qui sont tous à base de fer et alliés avec du nickel et du chrome, certains Inconels sont à base de nickel et alliés avec du chrome et du fer [2], comme par exemple l'Inconel 718. Le terme « Inconel » est une marque déposée de métaux spéciaux. Corporation, désignant différents alliages de métaux. La marque est utilisée comme préfixe pour environ 25 alliages [2].

1-Présentation

L'INCONEL 718 est un alliage à base de nickel qui a été mis au point en vue d'obtenir un matériau possédant de bonnes caractéristique s tant sur le plan mécanique que sur le plan de la résistance à la corrosion dans un très large domaine de température : de - 250 à 700 °. C'est u n alliage austénitique dont le durcissement au cours du traitement de vieillis sèment s'obtient surtout grâce à la présence de niobium (5 %). Les principaux autres éléments d'addition sont le chrome (19 %), le molybdène (3 %) et le titane (1 %) [16].

2-Les propriétés de l'inconel

Ses propriétés mécaniques et son apparence sont comparables à celles de l'acier inoxydable. Sa résistance mécanique à la traction varie de 690 à 1 275 MPa (100 000 à 185 000 psi) selon l'alliage. Ils ont les mêmes avantages que les aciers inoxydables par rapport aux aciers carbones, mais en plus marqués. La résistance à la chaleur est beaucoup plus

importante (\pm 900°). Évidemment, ils sont aussi beaucoup plus chers, la décision de les utiliser est calculée sur la durée de vie prévue et la rentabilité de l'application [2].

VI- 2-Les aciers

Les aciers sont d'une importance capitale, puisqu'on les retrouve quasiment dans tous les domaines. Ils sont à l'origine de toute la révolution scientifique et industrielle. Ce progrès est essentiellement du à la présence d'une vaste gamme de transformations qui permettent de faire varier considérablement les propriétés mécaniques des aciers [17].

Présentation

L'acier est un alliage métallique utilisé dans les domaines de la construction métallique et de la construction mécanique. L'acier est constitué d'au moins deux éléments, le fer, très majoritaire, et le carbone, dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse. Un acier inoxydable est, d'après la définition de la norme NF EN 10020, un acier contenant au minimum 10,5 % de chrome et au maximum 1,2 % de carbone. C'est la teneur en carbone qui donne à l'alliage les propriétés du métal qu'on appelle « acier » [18].

VI- 2-1-Les aciers inoxydables

> Définition

Les aciers inoxydables, couramment appelés inox, jouent un grand rôle dans d'innombrables domaines : vie quotidienne, industrie mécanique, agroalimentaire, chimie, transports, médecine, chirurgie, etc. Ce sont des aciers, alliages de fer et de carbone, auxquels on ajoute essentiellement du chrome qui, au-delà de 10,5 % en solution (selon la teneur en carbone) dans la matrice, provoque la formation d'une couche protectrice d'oxyde de chrome qui confère à ces aciers leur inoxydabilité. D'autres éléments sont ajoutés, notamment le nickel qui améliore les propriétés mécaniques en général et la ductilité en particulier, le molybdène ou le titane améliorent la stabilité de l'alliage pour des températures autres que l'ambiante ainsi que des éléments à hauts points de fusion comme le vanadium et le tungstène accompagné en général d'une augmentation de la teneur en chrome, pour obtenir la résistance aux hautes températures au contact d'une flamme (aciers réfractaires) [18].

Propriétés et applications

Les aciers inoxydables présentent une grande variété de structures et donc de propriétés physiques, mécaniques et surtout chimiques .la principale propriété de ces aciers est leur excellente résistance à la corrosion, ce qui leur donne une durée de vie quasi exceptionnelle dans la très grande majorité des milieux.

• Propriétés physiques

Ces aciers possèdent :

- ➤ une masse volumique de l'ordre de 7850 Kg/m³.
- > une capacité thermique de $0.5J/g.C^{\circ}$ pour T=0°à100°C.
- ▶ une conductivité thermique de16.2W /m.K à100°C.
- ▶ une conductivité thermique de21.4 W /m.K à 500°C.

Propriétés mécaniques

Les aciers inoxydables représentent les propriétés mécaniques suivantes :

- la dureté, Rockweli B est : 79HRB ;
- 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 .10⁻⁵omh.cm.

• Propriétés magnétiques

Les aciers inoxydables ferritiques et martensitiques sont ferromagnétiques é (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 acier inoxydables jouent un rôle prépondérant dans l'industrie aéronautique, chimique, pharmaceutique et agroalimentaire, les cuisine professionnelles, l'architecture et même la bijouterie [19].

Classification des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont des alliages Fe-Cr et Fe-Ni-Cr contenant éventuellement des éléments d'alliage soit de type interstitiel comme le carbone ou l'azote, soit de type métallique tel que le molybdène, le titane... Le qualificatif "inoxydable" est habituellement attribué lorsque l'alliage présente une concentration minimale d'environ 11 à 12% de chrome. Des phases secondaires de nature inclusionnaire, formées lors de l'élaboration du métal, tels des sulfures, peuvent se retrouver dans les aciers inoxydables. Si l'on se réfère à une classification selon la composition chimique de l'alliage, les désignations d'aciers inoxydables au chrome, d'aciers inoxydables au chrome-nickel ou d'aciers inoxydables au chrome-nickel-molybdène sont employées. Cette classification est cependant un peu restrictive car l'addition d'éléments d'alliage leur confère une large variété de structures et donc de propriétés physiques, mécaniques et chimiques. L'addition de chrome, de structure cubique centrée, favorise la structure ferritique. C'est un élément dit a-gène comme le molybdène, le niobium ou le tantale. Le nickel est un élément γ -gène, de structure cubique face centrée. Il confère une structure austénitique. Le carbone, l'azote ou le manganèse ont aussi cette particularité. Les aciers inoxydables sont plus couramment classés selon leur structure micrographique. Ce type de classification a permis de mettre en évidence quatre grandes familles d'aciers inoxydables [20] :

> Aciers inoxydables austenitiques

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 [21].



Figure I .10 Structure austénitiques [23].

Aciers inoxydables ferritiques

Ils ne prennent pas la trempe. On trouve dans cette catégorie des aciers réfractaires à haute teneur en chrome (jusqu'à 27 %), particulièrement intéressants en présence de soufre [22].



Figure I.11 Structure ferritiques [23].

Aciers inoxydables duplex

Ils contiennent comme principaux éléments d'alliages du chrome (18-28%), du nickel (4-10%) et également du molybdène (1,5-3%). Le nom "duplex" vient de ce que la structure contient environ 50% d'austénite et 50% de ferrite [23].



Figure I.12 Structure d'un acier inox duplex [23].

> Aciers inoxydables martensitiques

Les plus courants titrent 13 % de chrome avec au moins 0,08 % de carbone. Ils sont utilisés lorsque les caractéristiques de résistance mécanique sont importantes. D'autres nuances

sont plus chargées en additions, avec éventuellement un faible pourcentage de nickel [24]. Du point de vue métallographique, les aciers martensitiques au chrome ressemblent fort à des aciers au carbone durcis. Comme la teneur en carbone est relativement élevée, les aciers martensitiques au chrome sont durcissables au contraire des aciers ferritiques au chrome. Les aciers martensitiques au chrome ne sont guère utilisés dans les constructions soudées. Ils trouvent leur application dans la fabrication de couteaux, instruments médicaux, pièces de turbines, matrices, ... autrement dit quand une exigence en résistance à la corrosion et résistance à l'usure est posée [23]. Ces aciers peuvent prendre la trempe et sont susceptibles de donner des caractéristiques mécaniques variées suivant la teneur en carbone et le traitement thermique (trempe, revenu, recuit). Ils ont une très bonne trempabilité en général. Toutefois, il faut noter que l'accroissement de caractéristiques par la trempe et le revenu est inévitablement associé à une augmentation de la sensibilité à la corrosion. Les aciers martensitiques sont en général moins résistants à la corrosion que les aciers ferritiques [25].



Figure I .13 Structure martensitique [23].

Conclusion

Les aubes de turbine des étages les plus chauds sont les pièces qui subissent les sollicitations les plus endommageant, en raison de nombreux facteurs tels que la température très élevée des gaz brûles (souvent supérieure a la température de fusion des alliages), les forts gradients thermiques présents, notamment lors des phases de décollage et d'atterrissage, le fluage du a la force centrifuge, la corrosion à chaud, les contraintes élevées induites par la géométrie complexe ainsi que la fatigue vibratoire [2].

Introduction

Dans certaines conditions d'utilisation, un matériau peut être exposé à des variations plus ou moins brusques de température. Ces variations de température entraînent des variations dimensionnelles du matériau. Par conséquent, lorsque le matériau n'est pas libre de se dilater ou de se contracter, il se trouve soumis à des contraintes thermiques. Même dans une pièce non encastrée, des contraintes thermiques apparaissent en présence d'un gradient de température. Lorsque le gradient de température n'est pas très élevé, et que sa valeur est stable, les contraintes thermiques peuvent être atténuées. Ces contraintes thermiques dépendent des caractéristiques du gradient de température et des propriétés thermiques du matériau. Si les contraintes thermiques varient de manière cyclique, on parle alors de phénomène de fatigue thermique, un phénomène qui peut affecter même les métaux. La formation et le développement de fissures ou micro fissures par fatigue thermique peuvent conduire à la dégradation complète du matériau ou de la pièce [26].

I- Modes de chargement

On distingue plusieurs modes de chargement des structures : (i) chargement monotone, (ii) chargement cyclique, (iii) chargement constant. Chaque mode de chargement correspond à un mode de ruine particulier.

Chargement monotone : Dans ce cas le chargement croît de façon continue. Le chargement peut consister en un déplacement imposé ou une charge imposée. Dans le cas linéaire (élasticité) les deux cas sont similaires. Dans le cas d'un comportement plastique, il existe une charge limite que la structure ne peut pas dépasser. Dans le cas d'un chargement en force, il y a rupture brutale par instabilité plastique. Il peut s'agir, par exemple, du cas d'un réservoir dont on augmente la pression [27].

Chargement cyclique : La charge ou le déplacement varient de façon cyclique au cours du temps. la rupture est différée ; elle n'interviendra qu'au bout d'un nombre de cycles dépendant de la sévérité du chargement. On parle de fatigue. Des nombreuses structures sont sollicitées en fatigue : moteurs, pneus, ailes d'avions, hélices de bateau etc... [27].



Figure II.1 Chargement cyclique [27].

► Chargement constant : Dans ce cas une charge constante est appliquée sur une structure généralement à haute température (c'est à dire pour $T=T_f > 0.5$). Dans ce cas la structure flue. On se trouve également dans un cas de rupture différée.

Chargements complexes : Dans certains cas, le chargement peut être plus complexe que dans les cas précédents. Une structure à haute température peut voir son niveau de charge varier au cours du temps. On parle alors d'interaction fatigue– fluage. Une structure en fatigue dans laquelle se propage lentement une fissure peut subir une surcharge qui entraîne la rupture en charge limite [27].

II-Le phénomène de fatigue thermique

II-1-Définition

Toute pièce mécanique est soumise durant son fonctionnement normal à un certain nombre de sollicitations de causes variables mais qui se traduisent le plus souvent par des variations cycliques des contraintes qui lui sont appliquées. Or, on constate souvent, la ruine parfois catastrophique, d'un certain nombre de structures alors que celles-ci ne sont soumises qu'à des sollicitations dynamiques jugées modestes par rapport aux capacités statiques des matériaux (résistance à la rupture et limite d'élasticité). Le responsable de ces ruines est très souvent le phénomène de fatigue du matériau phénomène qui se développe lentement dans le temps, sans modifications apparentes au niveau macroscopique des pièces et des structures et dans des zones souvent inaccessibles mais particulièrement sujettes à cet endommagement de par leur conception [28].

II-2-Mécanismes de fatigue

Cet endommagement par la fatigue mené jusqu'à son terme, c'est-à-dire jusqu'à la ruine, comprend 3 périodes de durées variables suivant les matériaux et les caractéristiques des sollicitations [28]. La rupture de pièce ou de structure par fatigue peut être divisée en trois stades : L'amorçage, la propagation d'une fissure principale (ou de quelques fissures) et la rupture finale brutale [26].

II-2-1-L'amorçage

II-2-1-1-Définition

La définition de l'amorçage est encore aujourd'hui une des principales difficultés. Elle est différente selon que l'on s'intéresse à l'évolution microstructurale du matériau ou que l'on considère l'apparition d'une microfissure [29].

II-2-1-2-Evaluation de l'amorçage de fissure

Plusieurs définitions sont utilisées dans la littérature :

- La variation de la rigidité de l'éprouvette,
- L'apparition d'une fissure de quelques microns,
- La chute de la charge supportée par l'éprouvette.

La phase d'amorçage est généralement constituée par la nucléation et la croissance de fissures « courtes » mais la longueur seuil de fissure à laquelle l'amorçage se produit manque de définition uniforme. Plusieurs auteurs pensent que la phase d'amorçage d'une fissure de fatigue est de durée négligeable et qu'il existe des « petites » fissures de taille comparable à celle d'un défaut microstructural. Ces fissures se manifestent dès les premiers cycles de sollicitation. Alors, la durée de vie associée à l'amorçage correspondrait en fait à la phase de propagation de ces fissures courtes avant qu'elles n'atteignent une taille détectable par les moyens de suivi usuels [29].

II-2-1-3-Les étapes d'amorçage de la fissure

La première étape est la plastification locale au voisinage des défauts et singularité géométriques ou matérielles. Le degré de la singularité a une influence primordiale sur l'ampleur de la zone plastique ainsi que sur la concentration des contraintes. Lors d'un chargement répété, il a un écrouissage. Cet écrouissage conduit à élever la contrainte seuil. Le matériau se trouvant au voisinage de la point des défauts ou de la singularité devient à haut résistance, entrainant la création d'une première fissure ;

La deuxième étape est la formation des fissures. Cet étape peut se réaliser à partir des traitements des surface, des traitements ou chargement thermique générant des contraint résiduelle dépassant largement le seuil plastique. On peut également avoir des formations de fissure à partir d'un chargement mécanique statique ou variable [30].





L'amorçage se produit préférentiellement dans les zones où il y a concentration de contraintes : changement brusque de section ou de géométrie, inclusions ou défauts de surface. Toutefois, l'amorçage peut se produire dans les endroits parfaitement polis et ne présentant aucune zone de concentration de contrainte [26].

II-2-2-La propagation des fissures de fatigue

II-2-2-1-Définition

Au cours des cycles de fatigue, la microfissure initiale devient grande par rapport à la taille du grain, et les différentes microfissures vont coalescer. Une macro-fissure apparaît

ainsi et sa direction est généralement imposée par les contraintes d'ouverture, maximum des contraintes principales de traction. On distingue alors deux stades :

La fissure courte la zone plastifiée en pointe de la fissure est importante devant la taille de la fissure. On utilise alors la Mécanique de la Rupture Elasto- Plastique (MREP). La propagation de la fissure dans le milieu élasto-plastique est complexe et on fissure [28].



Figure II.3 Fissure courte [28].

La fissure longue la taille de la zone plastifiée est faible devant la longueur de la fissure et sa déformation est déterminée par le champ élastique l'entourant. Si la réponse de la structure reste élastique linéaire et que la taille de la zone plastique peut être négligée, alors il est possible d'utiliser la Mécanique de la Rupture Elastique Linéaire (MREL) [28].



Figure II.4 Fissure longue [28].

II-2-2-2-Les stades de propagation

Aux stades d'amorçage d'une fissure succède la propagation de celle-ci dont on distingue deux stades. Lorsqu'on se situe à des facteurs d'intensité de contraintes faibles, la propagation de la fissure est fortement influencée par la microstructure du matériau. Dans les matériaux métalliques, pour une faible variation du facteur d'intensité des contraintes ΔK , et plus particulièrement, dans le cas des superalliages monocristallins, la fissure se propage généralement dans des plans de glissement privilégies, selon l'orientation cristallographique de la microstructure. Par exemple, dans les premiers stades de

fissuration, on observe généralement une propagation en mode de cisaillement dans des plans de glissement actifs. Ce mécanisme conduit à des chemins de fissuration en zig-zig, dénis comme "stade I" de fissuration par fatigue. Lorsque ΔK augmente, le nombre de systèmes de glissement actifs augmente également et les facies de rupture présentent des reliefs moins importants. La fissure se propage plus régulièrement, avec une moindre sensibilité à la microstructure du matériau. Ce régime a été appelé "stade II" de fissuration. Il est caractérisé par l'apparition de stries de fatigue sur la surface de rupture [31].

II-2-2-3-Mécanismes d'écrantage de la fissure

La propagation des fissures de fatigue est le résultat de mécanismes d'endommagement intrinsèques se produisant en amont de la fissure. Un des mécanismes les plus communément acceptés pour caractériser l'endommagement en bout de fissure sous charges cycliques est l'émoussement-affûtage plastique. Lors de l'application de la charge au début d'un cycle, le bout de la fissure est émoussé suite au cisaillement localisé selon des plans de glissement préférentiellement orientés. Lors du retrait de la charge, le bout de la fissure est affûté suite à l'inversion de la direction de glissement. Ce processus se répète pour chaque cycle de chargement-déchargement et résulte souvent en des surfaces de ruptures présentant des stries, où chaque strie représente un cycle d'avancement de la fissure. Cet endommagement intrinsèque est en compétition mutuelle avec différents mécanismes pouvant agir sur la fissure en l'écrantant d'une partie de la charge appliquée .Ces mécanismes, qui sont favorables à la résistance à la propagation des fissures, peuvent être divisés en deux types, soient la fermeture et la trajectoire de la fissure. [32].

A-Mécanismes de fermeture

La fermeture de fissure peut être induite par plusieurs phénomènes comme la rugosité, l'oxydation ou la plasticité [29].

• Fermeture induite par la plasticité

En se propageant, une fissure de fatigue entraîne avec elle la zone plastifiée qui se développe à son extrémité. Il se forme ainsi, au fur et à mesure que la fissure progresse, un sillage plastique autour de la fissure. Au cours d'un cycle de fatigue suivant, la décharge

élastique du matériau entraîne des contraintes de compression sur le sillage plastique de la fissure : c'est le phénomène de fermeture induite par la plastification [29].



Figure II.5 Schématisation du mécanisme de fermeture induite par plasticité [32].

• Fermeture induite par la rugosité

La rugosité est associée au trajet très tortueux et aux déplacements des lèvres de fissure suivant le mode II, ce qui empêche sa refermeture totale à charge nulle En effet, les surfaces de rupture n'étant pas rigoureusement lisses, une fermeture prématurée peut intervenir si les lèvres de la fissure perdent leurs coïncidences respectives à la suite d'un glissement des surfaces de l'une par rapport à l'autre [29].



Figure II.6 Schématisation du mécanisme de fermeture induite par la rugosité [32].
Chapitre II Généralités sur la rupture par fissuration

• Fermeture induite par l'oxydation

Une deuxième raison invoquée pour expliquer le phénomène de fermeture concerne le dépôt d'oxyde sur les surfaces de rupture. Cette couche empêche la refermeture totale des surfaces fissurées, et par conséquent modifie la cinétique de propagation de la fissure [29].



Figure II.7 Représentation schématique de fermeture induite par l'oxydation [32].

Les épaisseurs d'oxyde sont différentes suivant l'environnement pour un rapport de charge donné. De plus, une forte dépendance entre la fermeture de la fissure et l'oxydation des surfaces peut intervenir et expliquer la diminution de la vitesse de propagation [29].



Figure II.8 Phénomène de fermeture de la fissure [26].

Ce phénomène consiste en la remise en contact des lèvres de la fissure lorsque la charge cyclique devient faible. La partie du cycle de chargement au cours de laquelle la fissure est fermée est considérée comme inopérante pour le mécanisme de propagation [26].

B-Effet de la trajectoire de la fissure

À l'échelle microscopique, une fissure de fatigue est rarement rectiligne et présente souvent une trajectoire tortueuse marquée de bifurcations. Ces bifurcations, en plus de contribuer à la fermeture induite par la rugosité, font en sorte qu'une fissure se propageant nominalement suivant le mode I de propagation se propage en fait en mode mixtes I et II à une échelle plus fine. Cette propagation en modes mixtes est très localisée et sujette aux constants changements de direction dus aux bifurcations. Une propagation en modes mixtes résulte en une variation équivalente du facteur d'intensité de contrainte plus faible qu'une fissure rectiligne soumise à la même charge [32].

II-2-2-4-Type de fissuration

A- La fissuration brutale

Pour des solides ou pour les matériaux à très haut résistance, les contraintes de travail sont très élevées, une énergie potentielle considérable est ainsi créée ; La présence de petites fissures peut alors conduire à une rupture brutale qui souvent ne s'accompagne pas de déformation plastiques macroscopiques par suite de l très faible ductilité de matériaux au voisinage la fissures [30].

B- La fissuration successive

Il s'agit ici, d'une succession de mécanismes (fragile-ductile) qui sous contrainte répétées entraine la fissuration successive, appelée habituellement la rupture par fatigue. Cette fissuration peut intervenir sans déformation plastiques appréciables avec un grand nombre de variations de cycles de contrainte, ou elle peut s'accompagner de grandes déformations plastiques et intervenir à petit nombre de cycles [30].

II-2-2-5-Modes élémentaires de fissuration

D'un point de vue macroscopique, on peut considérer deux modes principaux de la rupture : la rupture plate et la rupture inclinée .la rupture plate correspond à une surface de rupture globalement perpendiculaire à la direction de la contrainte principale maximale.la rupture inclinée dans le sens transversal par apport à la direction de propagation s'accompagne souvent de grandes déformation. L'examen du faciès de rupture permet bien

Chapitre II Généralités sur la rupture par fissuration

souvent de détecter, après rupture, le mécanisme de rupture et le type de fissure produit. On remarque généralement: Une zone lisse et soyeuse correspondant à la propagation en fatigue ; Une zone à grains cristallins plus ou moins apparents, correspondant à la fissuration. On montre que toute fissuration peut être ramenée à l'un des trois modes simples ou à leur superposition. Il existe donc trois modes de fissuration élémentaires [30].



Figure II .9 Modes élémentaires de fissuration [28].

Mode I : Mode d'ouverture de la fissure. Les déplacements aux lèvres de la fissure sont perpendiculaires à la direction de la propagation.

Mode II : Mode de cisaillement dans le plan. Les déplacements aux lèvres de la fissure sont parallèles à la direction de la fissure.

Mode III : Mode de cisaillement hors du plan. Les déplacements aux lèvres de la fissure sont parallèles à la direction de la propagation [28].

II-2-3- La rupture par fissuration

Le phénomène de rupture par fissuration conduit à la rupture du matériau mécanique à cause de l'évolution d'une fissure existante, par exemple la propagation d'un défaut de fabrication ou la présence de défauts internes. Cette évolution est provoquée par une application répétée d'un chargement cyclique. L'étude du comportement d'une fissure sous contrainte est la base de la mécanique de la rupture [33].

II-2-3-1- Les faciès de rupture

Les faciès de rupture d'éprouvettes peuvent être classés selon deux critères distincts liés d'une part à leur cinétique, d'autre part à leur observation. Lors de sollicitations statiques ou quasi-statiques, les ruptures sont instantanées et traduisent le caractère ductile ou fragile du matériau. Elles sont transgranulaires – c'est le cas de toutes les ruptures ductiles et des ruptures fragiles par clivage - ou intergranulaires, c'est le cas des ruptures fragiles par décohésion - selon que la fissure qui génère la fracture traverse les grains ou les contourne en suivant précisément les joints de grains. L'analyse des ruptures progressives, caractéristiques en particulier des dégradations en fatigue, en fluage ou encore en corrosion sera proposée ultérieurement [34].



Figure II .10 Classement des ruptures selon leur cinétique [34].



Figure II .11 Classement des ruptures selon leur observation [34].

II-2-3-2-Les types de rupture

Il existe deux types de ruptures, les ruptures fragiles et les ruptures ductiles

La rupture fragile

La rupture fragile s'accompagne de très peu de déformation plastique. Dans les alliages métalliques, elle est de type soit :

- Transgranulaire : rupture par clivage ou par glissement dans un grain ;
- Intergranulaire : rupture par glissement le long des joints de grains.

L'approche atomique consiste à étudier une rupture par clivage en considérant les forces des liaisons atomiques ; Le clivage opère par rupture des liaisons inter atomiques dans une direction perpendiculaire au plan de rupture. Il se produit préférentiellement le long de plans atomiques bien définis qui dépendent des matériaux. Par exemple, les matériaux cubiques centrés clivent selon les plans (100) alors que les cubiques faces centrées clivent difficilement [35].



Figure II .12 Rupture fragile par clivage [34].

Exempte de déformation plastique, les ruptures fragiles par décohésion présentent un aspect globalement plan et ne font pas apparaître de zone d'amorçage et de direction de propagation. À l'échelle microscopique, elles font apparaître parce qu'elles sont inter granulaires des polyèdres juxtaposés correspondant à la surface des grains définissant le faciès de rupture. Des phases fragilisantes peuvent apparaître au niveau de la surface de rupture. Bien souvent, des fissures secondaires sont observables [34].



Figure II.13 Rupture fragile par décohésion [34].

Rupture ductile

Au plan macroscopique, les ruptures ductiles sont toujours caractérisées par la présence d'une zone déformée plastiquement. Elles font apparaître une surface matte, souvent en relief et comporte, si la sollicitation est de traction, une zone de striction. On ne distingue pas de zone d'amorçage précise ni de direction de propagation nette. Au plan microscopique, le faciès, généralement orienté, est pourvu de nombreuses cupules et éventuellement d'inclusions. Ces ruptures sont transgranulaires [34].

La rupture ductile se caractérise par :

- Une forte énergie de rupture
- Une importante déformation à rupture
- Un faciès mat et fibreux
- Possibilité de déformation plastique importante.
- Le type le plus courant de rupture ductile est la rupture par traction avec apparition de striction
- Dans les matériaux très purs, on peut observer des déformations plastiques importantes [36].

Chapitre II Généralités sur la rupture par fissuration



Figure II.14 Faciès de rupture ductile [36].

II-2-3-3-Diagramme charge-déplacement

Les déformations à rupture, l'énergie de rupture, les faciès de rupture sont différents [36].



Figure II.15 Diagramme charge-déplacement [36].

II-2-3-4-Classes de matériaux vis-à-vis de la rupture

Pour un essai sous chargement monotone d'une éprouvette de traction simple, on peut distinguer différents types de mode de rupture :

Rupture élastique fragile: Le comportement global est linéaire élastique et la rupture intervient de façon brutale. Les déformations à rupture sont généralement faibles (< 1%). Les matériaux ayant ce type de comportement sont les céramiques massives, les verres.

Chapitre II Généralités sur la rupture par fissuration

- Rupture quasi fragile: Le comportement global est non linéaire. Des décharges partielles indiquent une forte perte de rigidité qui indique une microfissuration du matériau. Cette microfissuration est la cause essentielle de la non-linéarité globale. Les matériaux ayant ce type de comportement sont : Les composites En particulier les composites céramique, Les bétons On observe ce comportement en compression. En traction les bétons ont généralement une rupture élastique fragile. Les nouveaux bétons renforces ont également une rupture quasi fragile en traction.
- **Rupture plastique-fragile**: Le matériau plastifie mais rompt brutalement pour des déformations relativement faibles. C'est le cas des métaux de type cubique centré ou hexagonal lorsque la température est suffisamment faible.
- **Rupture ductile :** Le matériau plastifie et rompt progressivement. Une fissure stable peut s'amorcer au sein de la matière. L'endommagement peut-être diffus et relativement important. Les métaux cubiques à faces centrées ont ce comportement. Les métaux de type cubique centré sont ductiles pour une température suffisamment élevée [27].



Figure II.16 Classes de matériaux [27].

Chapitre II Généralités sur la rupture par fissuration

III-Etude des aubes de turbine à gaz

Parmi les travaux de recherche consacrés à l'étude des fissures formées dans les aubes on peut citer :

1- Etude faite par Sushila et al [37]

• Observation visuelle

La figure II.17 présente la défaillante d'aube. L'aube a été fissurée à la pointe du bord d'attaque et à la pointe du bord de fuite. Il ressort clairement de la figure que la surface de la pale de turbine devient sombre et l'érosion se retrouve également sur les deux côtés de la pointe et du bord de fuite.



Figure II.17 Fissure et érosion sur le bord d'attaque et de fuite.

• Évaluation de fissure

D'après ces auteurs l'initiation et la propagation des fissures dans l'aube de turbine à gaz sont dues aux combinaisons de contraintes thermiques et d'environnement.



Figure II.18 Propagation de fissures due à la pénétration du soufre et de l'oxygène dans le substrat.

De même, ils ont effectué des observations microscopiques et qui on montré :

- ✓ Sur la base de la composition chimique déterminée à l'aide du spectromètre à analyse optique d'émission, l'aube n'a pas échoué en raison de défauts des matériels.
- ✓ À partir de la microstructure et du spectre EDX obtenus à l'aide du microscope électronique à balayage Hitachi S-3700N (SEM) équipé d'un spectromètre dispersif d'énergie à rayons X (EDS), il est évalué que l'aube de la turbine a échoué en raison de la dégradation de surface provoquée par une surchauffe, une corrosion à chaud et oxydation.
- ✓ Ils ont constaté que l'aube a été échouée en raison de l'effet combiné de la dégradation de surface causée par la surchauffe, l'oxydation, la corrosion à chaud et la dégradation du revêtement, fortement oxydé.

2- Etude faite par Attarian et al [38].

• Observation visuelle

Les aubes qui ont été choisies pour l'évaluation des matériaux, se sont des aubes détériorées à base de nickel et intacte de première série de cobalt (Fig II.19).



Figure II.19 Une aube fracturée et l'intacte.

• Évaluation de fissure

Ces auteurs ont remarqué que les fissures ne dépassaient plus les limites des grains et se sont développées en chemins de carbure interdendritique dans l'épaisseur de la l'aube (Fig II.20).



Figure II.20 Fissures dans la surface de l'aube.

La croissance des fissures interdendritiques et oxydes est due au dommage environnemental assisté par le stress et compte tenu des changements microstructurales et de la détérioration de l'aube due à une exposition à haute température, la formation facilitée de fissures en coin selon le mécanisme classique de dégâts de fluage pourrait être expliquée dans cette région.

Chapitre II Généralités sur la rupture par fissuration

Ils ont effectué des observations microscopiques et qui ont montré :

La composition chimique du matériau qui utilisé dans la fabrication de l'aube était un alliage IN-738LC. Les changements microstructurale à la long de l'aube ont montré que la phase γ' a été décomposée progressivement avec l'augmentation de la distance de la racine et sa teneur a diminué, et finalement elle a précipité comme des particules très petites et compactes adjacentes à la zone fracturée. La dureté a également augmenté dans cette région. La croissance de la fissure a été considérée comme interdendritique dans les rainures oxydes (encoches) de la surface de la fracture. La majeure partie de la surface de la fracture était transgranulaire. Les résultats montrent que l'aube a été exposée à une température élevée avant la fracture. Il semble que, en dissolvant γ 'la matrice en raison de l'exposition à une température élevée, l'oxydation et les mécanismes de fragilisation dynamique ont entraîné une défaillance d'aube présentée.

Conclusion

La mécanique de la rupture est devenue un élément essentiel dans les processus de dimensionnement des industriels. Le calcul de durée de vie résiduelle en propagation de fissure permet de définir des plans d'inspection pour des pièces intégrant des défauts liés au processus de fabrication, au matériau même, aux manipulations effectuées au montage, aux charges ou événements subis durant le cycle de vie d'une structure mécanique [39].

Chapitre III : Matériaux et méthodes expérimentales

Introduction

Les matériaux destinés à la fabrication des roues (aubes +disques) de la turbine à gaz industriel dans le domaine pétrolier sont présentés, ainsi les techniques de caractérisation utilisées.

I-Matériaux des parties étudiées de la turbine

Les matériaux utilisés ont été fournis par la société Sonatrach de LAGHOUAT (DML). Dans notre étude, on à choisi d'étudier certaines parties de deux types de turbines :

Turbine à haut pression (HP): La turbine haute pression est située après la chambre de combustion. Elle convertit l'énergie potentiel des gaz brûles en énergie mécanique. La première détente des gaz chauds dans une turbine haute pression à deux étages dont la fonction est d'entraîner le compresseur (appelée générateur de gaz GG).

Turbine à basse pression (BP) : La turbine à basse pression est située après la turbine à haute pression dont la fonction fournit la puissance utilisable sur un arbre indépendant (turbine libre ou turbine de puissance PT). Dans la turbine à basse pression s'effectué la deuxième détente des gaz.

Les parties choisies se sont :

> **Deux aubes :** Aube d'une turbine haute pression

Aube d'une turbine basse pression.

> Disque d'une turbine basse pression.

Les deux aubes sont fabriquées en superalliage à basse de nickel : INCONEL 718 (Fig



Figure III.1 Les deux aubes étudiées : a) aube HP b) aube BP.

Par contre, le disque choisi est fabriqué en acier inoxydable martensitique : Z20CDV13 (Fig III.2).



Figure III.2 Une partie de disque de turbine à basse pression.

Les tableaux 1 et 2 présentent la composition de ces matériaux.

Tableau III.1 : Composition chimique de l'alliage (en poids et en atomique) [40].

Elément	Ni	Fe	Cr	Nb	Mo	Со	Al	С	Si	Mn
chimique									(ppm)	(ppm)
% atomique	54,47	18,27	20,07	3,39	1,9	0,21	1,08	0,5	2369	743
% poids	52,95	17,09	17,49	5,28	3,05	0,21	0,49	0,12	1116	684
Composition nominale	52,50	19,00	19,00	5,30	3,00	-	0,50	0,04	-	-
(% poids)										

Tableau III.2 : Composition chimique d'acier inoxydable martensitique (d'après EN10088-1) Z20C13 [41].

Désignation							% en	
de l'acier							masse	
Symbolique	Numérique	С		Si	Mn	Р	S	Cr
				max	max	max		
X20Cr13	1.4021	0,16	à	1,00	1,50	0,04	< 0,015	12,00 à 14,00
		0,25				0		

I-1-Préparations des échantillons et attaque chimique

Pour effectuer des observations métallographiques, il est nécessaire d'avoir un état de surface très propre, donc une très bonne préparation. La préparation débute par un polissage mécanique à l'aide des machines MECAPOL-P 310 avec des papiers abrasifs de grade croissant (120, 180, 320, 400, 600, 800,1200). Le polissage se fait sous eau. Il débute avec un papier à gros grains et on procède par élimination progressive des rayures. On croise soigneusement les stries de polissage quand on passe d'un papier au suivant. Nous terminons par un polissage à pâte diamantée qui est utilisé avec un disque feutré spécifique. Après polissage, ces échantillons seront nettoyés dans un bain d'eau distillé

Chapitre III

puis séchés avec un séchoir. Une fois que le polissage est réalisé, on peut effectuer une attaque chimique. Deux types d'attaque ont été réalisés dans cette étude.

	Les réactifs	Durée d'attaque
Acier inox	Réactif de Villéla :	-20 s à quelques min
	-100 ml éthanol	(jusqu'à 4 min)
	-5 ml Hcl	
	-1 g l'acide picrique	
INCONEL 718	-acide sulfurique(H ₂ SO ₄)	-30 s à quelques min
		(jusqu'à 5 min)

Tableau III.3 : Le réactif de chaque attaque chimique et sa durée d'application.

II-Techniques de caractérisation

Pour caractériser et identifier les phases et les précipités présents dans les alliages (inox ; INCONEL 718) à l'état de réception, nous avons utilisé différentes techniques expérimentales :

- le contrôle non destructif : ressuage.
- ➤ la diffraction des rayons X (DRX).
- > des observations par microscope optique (MO).
- des observations par microscope numérique.

II-1-Technique de ressuage

• Définition

Le ressuage par définition: est la résurgence (réapparition) d'un liquide d'une discontinuité dans laquelle il s'était préalablement introduit au cours d'une opération d'imprégnation. Il permet donc de détecter les discontinuités débouchant en surface de la pièce contrôlée sous forme d'indications colorées ou fluorescentes, observées respectivement sur un fond blanc ou sur un fond noir [42].

• Principe de base

La figure III.3 montre les différentes étapes de teste de ressuage. Après nettoyage soigné de la surface à contrôler, un liquide d'imprégnation, coloré et/ou fluorescent, doté d'une faible tension superficielle, appelé « pénétrant », est appliqué sur la surface à contrôler. Une fois la durée requise de pénétration écoulée, l'excès de pénétrant est éliminé de la surface à contrôler. Après essuyage ou séchage, selon le cas, de la surface à contrôler, un produit, provoquant la résurgence du pénétrant hors des discontinuités, appelé « révélateur », est appliqué. Une durée de révélation déterminé doit être observée, puis l'examen est effectué, dans des conditions appropriées d'observation, selon le type de pénétrant utilisé. Lorsque les indications ont été relevées et interprétées, les pièces contrôlées sont généralement remises dans leur état de propreté initial. La sensibilité et la fiabilité de détection des discontinuités sont en grande partie conditionnées par la qualité du nettoyage des surfaces avant application des produits de ressuage [43].



(a) nettoyage



(b) application du pénétrant



© pénétration



(e) application du révélateur



(d) élimination de l'excès de pénétrant



(f) révélation



(g) examen

Figure III.3 Différentes étapes du ressuage [43].

Chapitre III

Pour notre cas, on a appliqué cette technique de ressuage sur nos pièces choisies (deux aubes et une partie d'une roue) prélevées de deux turbines.

- La figure III.4 a : présente l'état de surface des pièces après application de pénétrant
- La figure III.4 b : montre le procédé de nettoyage de la surface avant l'application de révélateur.
- La figure III.4 c : illustre l'état de surface après l'utilisation de révélateur.







Figure III.4 Technique de ressuage appliquée sur nos pièces :a) La surface des pièces après application de pénétrant b) Le procédé de nettoyage de la surface avant l'application de révélateur c) L'état de surface après l'utilisation de révélateur.

II-2-La diffraction des rayons X (DRX)

La technique de diffraction des rayons X permet de connaître et d'identifier les phases cristallisées présentes dans un échantillon.

• Principe

Le principe de cette méthode consiste à envoyer un faisceau de rayons X sur l'échantillon et enregistré l'intensité du faisceau des rayons réfléchis par les plans réticulaires des premières plans de l'échantillon .Les rayons réfléchis, sont en phase et donnent lieu à un pic sur le diffractométrie enregistré. Ainsi, Bragg a montré qu'il existe une relation simple entre la distance entre les plans, la longueur d'onde des rayons X et l'angle de diffraction

$n.\lambda = 2d_{hkl}.sin\theta$

Où θ : l'angle entre le faisceau incident (ou faisceau réfléchi) et les plans des atomes, d_{hkl} : distance entre les plans, λ Longueur d'onde des rayons X, n: Nombre entier positif (Sauvant égal à 1).

A partir des spectres des rayons X, on peut tirer des informations sur la cristallographie de l'échantillon, déterminer la composition chimique, connaître l'état de contrainte, le taux de cristallinité et la taille des cristallites (ou la aille des grains). On note aussi que la taille des cristallites est estimée à partir de la largeur à mi-hauteur d'un pic de diffraction selon la relation classique de Scherrer

$D = 0.9 \lambda/\beta \cos\theta$

Où : **D** Taille moyenne des cristallites (nm), β : Largeur à mi hauteur du pic de diffraction considéré, θ : Position angulaire (angle de Bragg) [44].



Figure III.5 Schéma du principe de la diffraction des rayons X [44].



Figure III.6 Schéma de fonctionnement d'un diffractomètre rasant de rayons X [44].

Pour notre cas, on à utilisé un diffractomètre de rayon X de marque BRUKER (Fig III.7). Les conditions d'utilisation de l'appareil sont :

- ➢ Voltage=45 KV.
- \blacktriangleright Courant =40 mA.
- Anticathode de cuivre (d=1 .45 A°).



Figure III.7 Diffractomètre PanalyticalX'Pert (D8 ADVENCE) BRUKER.

II-3 Microscopie optique (MO)

Le microscope optique est une technique très utilisée dans l'étude de la structure des métaux afin de montre les différentes phases et aussi les différents défauts comme les pores et les fissures.

Pour notre étude, on utilisé de types de microscopes :

- ✤ Figure III.8.a : Microscope optique HUND T100-WETZLAR.
- ✤ Figure III.8.b : Microscope optique OLYMPUS CX40.



Figure III.8 Microscope optique :a) Microscope optique HUND T100-WETZLAR b) Microscope optique OLYMPUS CX40.

II-4-Microscope numérique

Les microscopes numériques sont un moyen abordable de commencer à visualiser et à capturer des images rapprochées des circuits sur vos puces d'ordinateur et d'autres élément sans dépenser une fortune sur un microscope éducatif haut gamme.

Ils sont conçus pour se connecter facilement à votre ordinateur de bureau ou portable via le port USB.



Figure III.9 Microscope numérique.

Chapitre IV : Résultats et interprétation

Introduction

Ce chapitre est consacré aux résultats de l'étude de caractérisation des fissures formées dans quelques parties essentielles (aube, disque) de deux types de turbine (turbine HP et turbine BP). Les observations microscopiques, le ressuage et la diffraction des rayons X seront les techniques de caractérisation. On note que les matériaux de fabrication de disque et d'aubes sont respectivement l'acier inox (martensitique) Z20CDV13, le superalliage à base de nickel Inconel 718.

I-Propagation de fissure dans l'aube fabriquée en Inconel 718

I-1-Caractérisation macrographique

La figure IV.1 présente une vue macrographique dans une aube fabriquée en Inconel 718, et qui contient une fissure apparente.



Figure IV.1 Aube en Inconel 718 contenant une fissure.

On note que cette fissure est due généralement à :

- > Température des gaz brulés et qui est très élevée ;
- Les contraintes thermiques ;
- Les propriétés thermiques du matériau ;
- Le phénomène de fatigue du matériau.
- Fatigue vibratoire dans certaines zones.

On note aussi que des études antérieures ont été consacrées sur la formation des fissures dans les aubes de turbines ont montré que ces fissures sont dues à certains paramètres :

Selon Besson et al [44], les ruptures de pièces de machines ou de structures en fonctionnement normal sont le plus souvent dues à la fatigue. Le caractère lent et progressif de la fatigue est d'autant plus grave que la fissuration par fatigue conduit très souvent à une rupture brutale différée qui peut provoquer un accident. Lorsque la contrainte est appliquée de manière cyclique (fatigue) ou lorsque l'environnement est corrosif (fatigue corrosion), les fissures se forment et croissent lentement sous des contraintes plus faibles que celles conduisant à la rupture brutale. En effet, il arrive qu'une

pièce ou structure soumise à des contraintes cycliques de façon répétée rompe sous des contraintes bien inferieures à la contrainte de résistance à la traction ou même souvent inferieures à la limite d'élasticité du matériau. On distingue la fatigue à grand nombre de cycles qui correspond à une déformation plastique négligeable et qui concerne toutes les pièces soumises à des rotations, vibrations : roues, essieux, pièces de moteurs, de la fatigue oligocyclique qui correspond à une plastification substantielle au cours de chaque cycle et concerne les pièces de cœur de réacteur nucléaire, de turbines, et toutes les pièces soumises à surcharge occasionnelle. Les structures telles que les turbines, les réacteurs et les moteurs thermiques fonctionnent à des températures élevées. Sous l'action de charges qui, à basse température, ne provoquent pas de déformations plastiques permanentes, les matériaux commencent à fluer de manière irréversible lorsque l'on augmente la température. Le fluage est une déformation lente, continue qui est une fonction du temps t et de la température T [45].

Des études menées à partir de comparaisons en termes de durée de vie sur des superalliages à base nickel ([46], [47], [48]), avec notamment des essais réalisées sous air et sous vide, ont montre l'influence de l'environnement sur la durée de vie, et notamment l'effet néfaste de l'oxydation, effet d'autant plus marquée que la fréquence de sollicitation est faible. Outre le fait que la dégradation soit d'autant plus importante que la température est élevée, l'environnement semble influencer les divers mécanismes d'endommagement. En effet, en fatigue, les couches d'oxydes formées peuvent être rompues sous l'action de sollicitations mécaniques. Ces ruptures successives remettent à nu le métal, ce qui a pour effet d'accélérer les cinétiques des réactions chimiques. La fatigue est donc le phénomène d'endommagement le plus sensible en raison de la localisation préférentielle des défauts en surface, et donc dans une région au contact du milieu oxydant. L'oxydation est privilégiée au niveau des fissures, ce qui se traduit par une accélération de leur cinétique d'amorçage et de propagation.

La figure IV.2 montre une fissure forme dans une aube étudiée par Pak et al [49], ils ont effectué des observations microscopiques qui ont montré des fissures qui sont dues au procédé de solidification lors de la fabrication des aubes.



Figure IV.2 Aube d'une turbine :a) aube après prélèvement d'un morceau pour observation microscopique, b) aube après le polissage, c) fissure dans l'aube [49].

I-2 - Caractérisation par ressuage

La figure IV.3 présente le résultat d'application de technique de ressuage. L'utilisation de la technique de ressuage a permit de mettre en évidence une fissures dans l'aube en Inconel 718.



Figure IV.3 Fissure formée dans l'aube en Inconel 718.

I-3-Caractérisation microstructurale

Concernant la fissure, la figure IV.4 montre clairement la forme générale de cette fissure. D'une manière générale la fissure n'a pas la même largeur et n'a pas une orientation fixe. Ce comportement est du à la propriété structural des matériaux avec lequel est fabriqué cette aube. Généralement cette fissure se déplace selon une direction cristallographique bien définie.



Figure IV.4 Vue générale de la fissure principale dans l'aube en Inconel 718.

Chapitre IV

La figure IV.5 présente une vue micrographique de la fissure dans l'aube en Inconel 718. La forme générale de la fissure est en zig- zag avec une formation de microfissure de part et d'autre de la fissure principale et qui est de type : transgranulaire.



Figure IV.5 La propagation de fissure dans la structure de l'Inconel 718.

L'agrandissement de ces microfissures est présenté dans la figure IV.6. Ces microfissures montrent que la propagation de ces défauts s'effectue le long des joints de grains de l'alliage.



(a)

(c)

Figure IV.6 Microfissures dans l'aube en Inconel 718.

(b)

On peut dire que la propagation de ces microfissures est de type : intergranulaire.

D' après la littérature, dans les alliages métalliques monophasés, relativement purs, sollicités dans de telles conditions, le mode d'amorçage et de propagation des fissures de fatigue est souvent transgranulaire. Les fissures naissent le long des bandes de glissement persistantes selon des plans cristallographiques (exemple(111) dans les CFC) se développent ainsi (stade I) jusqu'à une faible distance (de l'ordre de grandeur de la taille de grains) puis bifurquent (stade II) pour s'étendre suivant un plan macroscopique normale à la contrainte appliquée. On règle générale, l'amorçage se produit toujours à la surface et ce, pour deux raisons principales : l'effet du relief macroscopique qui s'y développe par suit de l'émergence des dislocations (stade I transgranulaire) ou des concentrations de contraintes liées au problème de compatibilité de déformation à la frontière des grains et /ou assistance de l'endommagement transgranulaire et surtout intergranulaire. On règle générale, par une réduction de la durée de vue. La rupture intergranulaire est favorisée par cette orientation du joint des grains et par la voisinage des deux grains séparés par le joint.la taille des grains à également un fort effet sur les conditions d'apparition de la fatigue intergranulaire [50].

Le comportement des fissures en début de la propagation présente principalement deux types de caractéristiques de propagation .Dans le premier cas, les fissures courtes se propagent à une vitesse non régulière en dessous du seuil des fissures longues. Dans certains cas, si la fissure est une fissure courte secondaire, elle arrête de se propager définitivement, et peut être appelée fissure courte non propageant. Si la fissure est une fissure courte principale, elle se propage de manière irrégulière jusqu'à rupture de la pièce avec une vitesse de propagation soit accélérée, soit décélérée dans la région située en dessous du seuil des fissures longues. Dans certains cas, cette décélération continue jusqu'à une vitesse minimale, quasiment nulle. Après avoir franchi cette décélération, les fissures courtes se propagent avec une vitesse accélérée pour rejoindre le comportement des fissures longues. Plusieurs comportements de croissance de petite fissure ont proposés comme il est indiqué dans la figure IV.7 [29].





La figure IV.8 présente la microstructure de l'Inconel 718 avec lequel est fabriquée l'aube de la turbine. La caractérisation de la microstructure de l'alliage dans son état de réception montre une observation de structure monophasée de l'austénite (γ) avec taille des grains très hétérogène. Cette même micrographe a été observée par : Aliou NIANG [43].



Figure IV.8 Microstructure de l'Inconel 718.



Figure IV.9 Microstructure de l'Inconel 718 [43].

I-4-Caractérisation par diffractogramme de rayon X

La figure IV.10 montre le diagramme de diffraction des rayons X expérimental obtenu sur un échantillon massif d'alliage 718 à l'état de réception prélevé du matériau. On remarque bien les trois pics de fer de la phase austénite (γ).



Figure IV.10 Diffractogramme de rayon X de l'Inconel 718.

Aliou NIANG a aussi présenté le diffractogramme de l'Inconel 718. On remarque bien la présence d'une phase principale qui est γ et une phase secondaire qui est delta.



Figure IV.11 Diagramme de diffraction des rayons X réalisé sur un échantillon d'alliage 718 prélevé à mi-rayon du matériau [43].

II-Propagation de fissure dans le disque fabriqué en acier inox martensitique (Z20CDV13).

II-1-Caractérisation macrographique

Figure IV.12 présente une vue macrographique d'un partie de disque avec formation de fissure de grande dimension.



Figure IV.12 Vue macrographique de disque fabrique en acier inox, avec formation d'une fissure.

La figure IV.13 présente un échantillon prélevée ou il 'y avait la formation de fissure dans le disque fabriquée en acier inox martensitique.



Figure IV.13 Echantillon prélevée de disque fabrique en acier inox Z20CDV13.

II-2-Caractérisation par ressuage

La figure IV.14 présent le résultat d'application de technique de ressuage. L'analyse par la technique de ressuage a montre la position de la fissure.


Figure IV.14 L'analyse par ressuage sur un disque en acier inox.

II-3-Caractérisation microstructurale

La figure IV.15 montre une vue globale forme de la propagation de fissure dans l'acier inox martensitique. On constate que cette fissure a la forme d'une aiguille, c'est-à-dire son point d'amorçage est large puis elle se rétrécit pour devenir pointue dans son front. On remarque que le point d'arrêt de la fissure se ferme dans son bout.



Figure IV.15 Forme générale de la fissure dans le disque.

Chapitre IV

D'après la littérature : Lorsque les caractéristiques microstructurales, et la taille des grains, sont d'une taille de l'ordre de la zone plastique en bout de fissure, son extension selon des plans de glissements simples préférentiellement orientés résulte en une trajectoire tortueuse. Les surfaces de rupture ainsi créées présentent des aspérités qui entrent en contact, ce qui ferme la fissure prématurément. La fermeture induite par la rugosité (Fig IV.16) permet de rationnaliser certains effets de la microstructure sur la propagation des fissures de fatigue, particulièrement au seuil. La fermeture induite par la rugosité est prédominante à faibles valeurs de ΔK , où la taille des aspérités engendrées par les bifurcations de la fissure est comparable à l'ouverture de la pointe de la fissure [32].



Figure IV.16 Mécanisme fermeture de fissure induite par la rugosité [32].

D'autre part, les figures IV.17 et IV.18 montrent une parte de la fissure dans la microstructure de l'acier inox martensitique. On constate une fissure principale avec de ramifications de microfissures et en plus de sa on remarque que l'amorçage de cette fissure est grand par apport a la fermeture. On note que cette forme de trajectoire est appelée : trajectoire tortueuse.



Figure IV.17 La propagation de fissure dans la microstructure de I 'acier inox martensitique.



Figure IV.18 Agrandissement de la propagation de fissure dans la microstructure martensitique.

L'observation microscopique de l'acier inox martensitique (Fig IV.19) à montré l'existence des aiguilles de martensite.



Figure IV.19 La microstructure de l'acier inox martensitique.

II-4-Caractérisation par diffractogramme de rayon X

L'analyse par diffraction des rayons X de l'acier inox (fig IV.20) a montré la formation des pics de martensite dans le diffractogramme. Cette analyse a confirmé l'observation microstructurale, c'est-à-dire la formation des pics de martensite.



Figure IV.20 Diagramme de diffraction des rayons X réalisé sur un échantillon d'acier inox martensitique.

III-Remèdes

III-1 La réparation des aubes

Les roues de turbine à gaz subissent souvent des dommages tel que : impact, fissure, usure, destruction du revêtement protecteur, dégradation de microstructure ... bien avant d'avoir attient leur durée de vie théorique. Les couts de remplacent étant onéreux (le prix d'une aube est de l'ordre de 1.500 Dollars US), les utilisateurs de turbine à gaz préfèrent souvent réparer les aubes endommagées, réalisant ainsi des économies substantielles. Les utilisateurs de turbine à gaz et les réparateurs spécialisés se sont investis à développer des technique fiable de réparation ; le résultat est qu'on peut aujourd'hui rénover une aube endommagée et lui redonner une durée de vie théorique pouvant atteindre celle d'une aube

Chapitre IV

neuve, cela à un prix ne dépassant guère 60% de cette dernière ! Les économies sont donc très importantes [5].

III-1-1-Types et positions des défauts réparables

La figure IV.21 montre le type de défauts d'aubes de turbines à gaz réparables par soudage.



Figure IV.21 Soudures typiques de réparation d'aubes de turbines à gaz [5].

III-1-2-Limites pratique de réparation des aubes

La figure IV.22 représente les limites de réparation par soudage des aubes du premier étage d'une turbine à gaz (GE modèle MS7000).Ces limites sont basées sur une procédure de réparation qui exige que l'aube ait subi un traitement de mise en solution avant d'être soudée. Un traitement après soudage est également exigé [5].



Figure IV.22 Limites de réparation par soudage des aubes du 1^{ere} étage d'une turbine à gaz (GE modèle MS7000) [5].

III-2-Procédés de réparation des aubes

III-2-1-Procédé de nettoyage

Pour nettoyer les fissures et les surfaces de parties de turbine avant la réparation des ailettes, qui comprend l'exposition des surfaces et des fissures des ailettes à un mélange caustique, c'est-à-dire un procédé chimique par voie humide qui , constitué essentiellement d'un solvant organique, d'une base et d'eau, dans un autoclave, à une température comprise entre 150 et 250°C et sous une pression comprise entre 7,03 kg/cm² (100 psi) et 210,9 kg/cm² (3000 psi), la température et la pression étant suffisantes pour abaisser la tension superficielle du mélange jusqu'à environ zéro, pendant une durée comprise entre 0,1 heure et 8,0 heures, suffisante pour éliminer complètement tous les oxydes de la surface et des fissures des ailettes, le solvant organique étant choisi parmi le méthanol, l'éthanol, le propanol, l'alcool isopropylique, l'acétone et leurs mélanges, pris isolément ou en combinaison avec du dioxyde de carbone liquide, de l'ammoniac liquide ou un mélange des deux [51].

III-2-1-Procédés de réparation

Principe I :

La figure IV.23 présente un procédé de réparation d'éléments d'aube, plus particulièrement des éléments d'aube (10) dans une turbomachine, est prévu.

Dans un exemple, une partie endommagée [zone (20, 22)] d'un élément d'aube (10) est découpée de l'élément d'aube, par exemple par fraisage. L'étendue de la partie découpée [zone (20', 22')] correspond généralement en taille et/ou en forme à la zone endommagée (20, 22). Une partie de remplacement [zone (20", 22")] est alors soudée en place dans le vide résultant dans l'élément d'aube. Le cordon de soudure résultant (28, 30) est alors bruni ou roulé en profondeur ou galeté afin de travailler à froid la matière d'élément d'aube au niveau du cordon de soudure. Ceci induit des contraintes résiduelles de compression dans l'élément d'aube qui contrecarrent les contraintes résiduelles de tension dans et autour du cordon de soudure provoqué par la soudure, et renforce par conséquent la structure réparée résultante. Le processus divulgué est particulièrement utile pour réparer des disques à aube (disques à aube monoblocs) où des aubes individuelles ne peuvent pas être enlevées pour remplacement ou réparation [52].











Figure IV.23 Procédé de réparation d'éléments d'aube [52].

Principe II :

La figure IV.24 montre un procédé de réparation d'aube de turbine. Ce procédé comprenant les étapes consistant à:

a) appliquer des moyens de chauffage (70) à des zones sélectionnées d'une aube (60) de turbine à réparer;

b) chauffer ces zones de l'aube (60) de turbine pour les porter à des températures désirées;

c) exécuter une étape de réparation sur l'aube (60), cette étape de réparation comprenant une opération de brasage ou de soudage qui implique la fourniture d'une quantité importante d'énergie thermique à l'aube (60),

d) positionner les moyens de chauffage (70) sur l'aube dans une position sensiblement opposée au côté de l'aube qui, pendant la fourniture de ladite quantité importante d'énergie thermique, a des chances d'atteindre la température la plus élevée, et régler ces moyens de chauffage pendant l'étape de réparation de façon à chauffer des zones sélectionnées de l'aube de turbine de manière à réduire les forces qui agissent sur l'aube du fait de la dilatation thermique qui se produit dans celle-ci par suite de la fourniture de la quantité importante d'énergie thermique, le réglage et la position des moyens de chauffage (70) tendant à provoquer une déformation de l'aube dans le sens sensiblement opposé à celui de la déformation que risque de provoquer la fourniture de la quantité importante d'énergie thermique .

e) régler les moyens de chauffage (70) après l'étape de réparation de manière à maintenir l'aube de turbine à une température prédéterminée pendant un laps de temps prédéterminé pour réduire les contraintes dans l'aube dues à l'opération de brasage ou de soudage [53].



Figure IV.24 Les étapes principales de réparation [53].

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire était l'étude des causes et mécanismes de la rupture par fissuration d'aube d'une turbine à gaz, et proposition des remèdes de ce défaut.

Pour cela, des échantillons des pièces contenant des fissures ont été prélevées (aube et disque) afin de les étudier par plusieurs techniques :

- le contrôle non destructif : ressuage.
- la diffraction des rayons X (DRX).
- des observations par microscope optique (MO).
- des observations par microscope numérique.

A traverses cette étude on a pu mettre en évidence la forme et le mécanisme de propagation de fissure, c'est à dire la propagation trnsangranulaire avec des microfissures intregranulaires.

Des observations microscopiques ont mis en évidence les différentes phases qui forment les matériaux de fabrication de ces pièces, et confirme cette observation par les analyses de rayon X.

Perspectives :

Modélisation de la propagation des fissures.

Références

[1] Support de Formation de l'Entreprise TOTAL, Exploration et Production des Equipements et des Turbines, EXP-PR-EQ140-FR ,2007.

[2] E. KLAA, Conception d'une aube de turbine à gaz en matériaux composites, Thèse de Magister, Université de Batna, 2015.

[3] S. L.DIXON, Fluid mechanic, Thermodynamic of Turbomachinry,3rd Edition, Pergamon Press Oxford (New York, Toronto,Sydney,Frankfurt),1978.

[4] H.COHEN, G. F.C., ROGERS AND H. L. N., SARAVANAMUTTOO, Gas Turbine Theory, 4th Edition, Longman, London, 1996.

[5] Y. YAHMI, Elaboration et qualification d'une procédure de réparation par soudage TIG d'aube de turbine à gaz en superalliage à base de nickel-inconel 738, Thèse de Magister, Université de Boumerdès, 2007.

[6] A. BOUAM, Amélioration des Performances des Turbines à Gaz utilisées dans L'industrie des Hydrocarbures par L'injection de Vapeur d'eau à l'amont de la chambre de combustion, Thèse de Doctorat, Université de Boumerdès, 2009.

[7] C. ROBERT, Technique de l'ingénieur : Machines hydrauliques et thermiques ,2000 .

[8] O. BOLLAND, Thermal power generation-TEP9, 2004.

[9] A. BENIDIR, Calcul énergétique de l'installation hybride thermique pour la production d'électricité, Mémoire de master, Université de Biskra, 2013.

[10] Thermodynamique les turbine, www.Scientificsentence.com, 2009, Télécharges le 11 /11 /2016.

[11] H. SADI, M., HOCINE, Conception, design et modélisation des systèmes de cogénération dans les stations de compression de gazoduc, Mémoire d'Ingénieur d'Etat, Université des Sciences et de la Technologie Houari BOUMEDIENE ,2008.

[12] Eléments de cours d'Ecole National Supérieure des Mines, Machines thermiques,Olivier Bonnefoy (<u>bonnefoy@emse.fr</u>), 2014-2015.

[13] M. GIRAUD, J., SILET, Turbines à gaz aéronautiques et terrestres : Technique de l'ingénieures, B 4 410.

[14] M.A. Djeridane1, K., Abdessamed, Analyse défaillance des attaches aubesdisques des roues HP des turbines a gaz, Présenté dans le 3^{eme} conférence internationale sur le soudage, CND, et l'industrie des matériaux et alliages, IC-WNDT-MI'12, Algie (Oran), 2012.

[15] M. ARNOUX, Etude du comportement en fluage à haute température du superalliage monocristallin à base de nickel MCNG : Effet d'une surchauffe, Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale : Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Energétique et Aéronautique, 2006.

[16] Y. TREMOUREUX, Etude de la résistance à la corrosion d'alliages à hautes caractéristiques mécaniques dans quelques milieux de l'industrie alimentaire, Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Pierre et Marie CURIE, PARIS, 1978.

[17] H. MAROUF, Caractérisation structurale et mécanique du joint soudé de la liaison bimétallique acier ordinaire E36/ acier anti-usure NAXTRA 70 utilisé par l'Unité Grue de Bejaia dans l'assemblage de la pelle chargeuse et godet d'excavation, Thèse de Magister, Université de Tizi-Ouzou, 2012.

[18] M. NAOUN, Influence du peroxyde d'hydrogène sur la susceptibilité a la corrosion des aciers inoxydables en milieu salin, Thèse de Doctorat, Université de BATNA, 2014.

[19] Z. AMY, Caractérisation de l'acier inoxydable X5CrNi18-10 et étude de son oxydation à température, Thèse de Magister, Université de Tizi-Ouzou, 2013.

[20] N. LE BOZEC, Réaction de réduction de l'oxygène sur les aciers inoxydables en eau de mer naturelle. Influence du biofilm sur les processus de corrosion, Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 2000.

[21] S. MAHMOUDI, Etude comparative entre deux métaux passifs en milieux neutre, alcalin et acide: un acier inoxydable 304L et un alliage de titane Ti6Al4V, Thèse de Magister, Université de Constantine, 2008.

[22] M. OUCHEN, Effet du PH du milieu sur la corrosion de l'acier inoxydable 304 L, Thèse de Magister, Université de Batna, 2013.

[23] R. VENNEKENS, Aciers inoxydables, Fiches d'information, Centre de Recherche de l'Institut Belge de la Soudure, 2007.

[24] https://fr.wikibooks.org/wiki/Matériaux/Caractéristiques_mécaniques_des aciers# Aciers_ inoxydables, Téléchargé le 15/01/2017.

[25] Document technique de l'entreprise MetalComobilConcepts, Téléchargé le 10/06/2016.

[26] H. LE, Etude de la propagation d'une fissure sous chargement thermique cyclique induisant un gradient de température dans l'épaisseur, Thèse de Doctorat, Ecole nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique, 2006.

[27] C. Berdin, J., Besson, S., Bugat, R., Desmorat, F., Feyel, S., Forest, E., Lorentz, E., Maire, T., Pardoen, A., Pineau, B., Tanguy, Endommagement et rupture, Presses de l'Ecole des Mines, 2004.

[28] D. LEBAILLIF, Fissuration en fatigue des structures mécano-soudées soumises à un environnement mécanique complexe, Thèse de Doctorat, Université de Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2012.

[29] M. GEUFFRARD, Amorçage et micro-propagation de fissure en fatigue à haute température à partir de défauts dans un superalliage monocristallin, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2010.

[30] N. RECHO, Mécanique de la rupture par fissuration, France, 2012.

[31] M. Kaminski. Modélisation de l'endommagement en fatigue des superalliages monocristallins pour aubes de turbines en zone de concentration de contrainte. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2007.

[32] A. TRUDEL, Etude expérimentale de la propagation de fissures de fatigue dans la zone affectée thermiquement de joints soudés de roues de turbines hydrauliques, Mémoire de Maîtrisées sciences appliquées, Université de Montréal, 2013.

[33] D. MEBARKIA, Recherche d'une solution optimale d'exploitation et de maintenance des gazoducs algériens tenant compte de la fiabilité des équipements des différentes lignes, Thèse de Magister, Université de Boumerdes, 2013.

[34] Les faciès de rupture, École des Mines d'Albi-Carmaux : http://nte.minesalbi.fr/SciMat/co/SM6uc1-4.html, Télécharger le : 25/02/2017.

[**35**] A. ZEGHLOUL, Concepts fondamentaux de la mécanique de la rupture, Master : Matériaux ; Mécanique ; Structures ; Procèdes, Mention : Sciences pour l'ingénieur, Université de Lorriane, 2015-2016.

[**36**] C. ROBIN, Mécanismes de rupture et de croissance de fissures, Ecole des Mines de Douai, 2010.

[37] R. SUSHILA, A., ATUL K, R., VIKAS, Failure analysis of a first stage IN738 gas turbine blade tip cracking in a thermal power plant, Volume 8, April 2017, pp 1–10.

[**38**] M. Attarian, R., Khoshmanesh , S., Nategh, P., Davami, Microstructural evaluation and fracture mechanisms of failed IN-738LC gas turbine blades, Volume 1, Issue 2, April 2013, pp85–94.

[39] J. ANTONIO, R., SABARIEGO, Mécanique de la rupture : Techniques de l'ingénieur, RÉF : BM5060 V1, 2014.

[40] A. NIANG, Contribution à l'étude de la précipitation des phases intermétalliques dans l'alliage 718, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2010.

[41] A. KOZLOWSKI, Données numériques sur les aciers inoxydables: Techniques de l'ingénieur, Form. M 323.

[42] S. CHELGHOUM, Les Contrôle Non Destructifs, présenté dans les 3èmes journées sur le transport et la distribution des hydrocarbures, Biskra ,2015.

[43] J. BODNAR, CND : méthodes surfaciques : Techniques de l'ingénieur, 2e édition, Réf. Internet : 42586.

[44] S. DERBAL, Electrodéposition et caractérisation de couches minces métalliques ternaires CuZnSn, Thèse de Magister, Université de Stif, 2014.

[45] J. Besson, G., Cailletaud, J.-L. Chaboche ans S., Forest. Mécanique non linéaire des matériaux, 2001.

[46] L. Rémy, J., Reuchet.Fatigue - Oxydation interaction in a superalloy – Application to life prediction in high temperature low cycle fatigue. Metallurgical Transactions, vol. 14 A, pp 141-49, 1983.

[47] E. Chataigner, L., Rémy. Thermomechanical fatigue behavior of coated and bare Nickel-based superalloy single crystals. Dans: Fatigue under thermal and Mechanical loading, Petten, Netherland, May 22-24. International Symposium, 1995.

[48] P. Perruchaud. Etude des interactions fatigue-fluage-oxydation sur l'endommagement du superalliage monocristallin AM1. Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 1997.

[**49**] J. Pak, Engg. & Appl, Cracking Failure in GAS-Turbine Blades, Vol. 9, Jul., 2011, pp 98-102.

[50] L. PRIESTER, Joints des grains et plasticité cristalline, Paris ,2011.

[51] https://www.google.com/patents/EP0783044B1?cl=fr, Téléchargé le 21/02/2017.

[52] https://www.google.com/patents/EP1607169A1?cl=fr,Téléchargé le 21/02/2017.

[53] https://www.google.com/patents/EP0101164B?cl=fr, Téléchargé le 21/02/2017.

Résumé

L'objectif principal de ce mémoire est l'étude de phénomène de fissuration dans certains éléments de la turbine à gaz. Le mécanisme et le type de fissure ont été déterminés.

Abstract

The objective of this dissertation is to study the phenomenon of crack in some elements of gas turbine. The mechanism and the type of crack have been determined.

ملخص إن الهدف من هذه المذكرة هو دراسة ظاهرة "التشقق " في بعض عناصر التوربينات الغازية.حيث تم تم تحديد آلية ونوعية التشقق.