

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Métallurgie

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en **Génie des matériaux**

Optimisation du processus d'inspection et de réparation par brazing des segments de directrices de turbines

Application : Segments de directrices 1^{er} étage

Présenté par : Ines Yasmine MEDELICI

Sous la direction de : M. Merzak LARIBI (ENP)

M. Abderrezak AKRETCHE (ALGESCO)

Présenté et soutenu publiquement le 1^{er} juillet 2018

Composition du Jury :

Président	M. Kamel ABADLI	Docteur	ENP
Promoteur	M. Merzak LARIBI	Professeur	ENP
Co-promoteur	M. Abderrezak AKRETCHE	Ingénieur Process	ALGESCO
Examineur	M. Abdelmadjid KASSER	Maître de conférences	ENP
Examineur	M. Mabrouk BOUABDALLAH	Professeur	ENP

ENP 2018

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Métallurgie

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en **Génie des matériaux**

**Optimisation du processus d'inspection et de réparation
par brazing des segments de directrices de turbines**

Application : Segments de directrices 1^{er} étage

Présenté par : Ines Yasmine MEDELICI

Sous la direction de : M. Merzak LARIBI (ENP)

M. Abderrezak AKRETCHE (ALGESCO)

Présenté et soutenu publiquement le 1^{er} juillet 2018

Composition du Jury :

Président	M. Kamel ABADLI	Docteur	ENP
Promoteur	M. Merzak LARIBI	Professeur	ENP
Co-promoteur	M. Abderrezak AKRETCHE	Ingénieur Process	ALGESCO
Examineur	M. Abdelmadjid KASSER	Maître de conférences	ENP
Examineur	M. Mabrouk BOUABDALLAH	Professeur	ENP

ENP 2018

DEDICACES

À mes parents, à qui je dois tout,

À mon adorable petite sœur, à qui je souhaite toute la réussite du monde,

*À mes grands-parents et ma grand-mère, qui sont toujours là pour moi et que je chéris
énormément,*

À mes oncles et tantes, pour leurs encouragements et leur présence,

À mes plus proches amis pour leur soutien sans faille,

*À toute personne ayant contribué à mon cursus académique et professionnel et à
l'accomplissement de ce projet,*

À la mémoire de mon grand-père Bouya,

À la mémoire de mon arrière grand-mère Lalla,

REMERCIEMENTS

Je remercie avant tout Allah le tout puissant, de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la persévérance pour accomplir ce travail.

Je remercie toute personne ayant soutenu ce projet et contribué, de près ou de loin, à son aboutissement.

Je tiens à remercier tout d'abord, Monsieur Merzak LARIBI, d'avoir accepté d'assurer mon encadrement. Je le remercie pour sa disponibilité et ses conseils avisés.

Aussi, que Monsieur Abderrezak AKRETCHE, trouve ici mes remerciements pour son encadrement en entreprise, ses précieux conseils et ses encouragements tout au long du projet.

Mes remerciements vont également aux employés d'ALGESCO : Madame Nabila BELADJAL, pour m'avoir accueilli au sein de son département, Monsieur Mustapha BOUDERDA, pour son accompagnement et son soutien.

J'ai eu le plaisir de côtoyer toute l'équipe Engineering, que je tiens à remercier, d'avoir été présente tout au long de mon stage pour me fournir des explications, toujours prête à répondre à mes nombreuses interrogations et qui m'a permis de vivre une immersion dans un environnement de travail stimulant.

Je remercie mes chers enseignants du département de Génie des Matériaux pour leurs enseignements et le savoir qu'ils nous ont transmis durant ces trois années.

Je remercie ma famille de m'avoir toujours encouragée et soutenue.

Je remercie Tata Soumya pour son aide et ses conseils.

Je remercie Raouf, Lydia et Zakia de me soutenir constamment et de croire en moi.

Enfin, je remercie les membres du jury, qui me font l'honneur d'évaluer mon travail.

Merci à tous.

ملخص

يركز هذا العمل على دراسة عملية التفتيش وإصلاح قطاعات أول الكلمة التوجيهية التي هي في التوربينات. خلال متابعة هذه العملية، في مركز خدمة آل جيسكو، تمكنا من تحديد قضيتين تعاملنا معها. المشكلة الأولى هي صعوبة الحصول على سطح نظيف وبقايا من أكاسيد بعد عملية التنظيف أثناء عملية التفتيش. المشكلة الثانية هي: ذوبان أجهزة التبريد أثناء المعالجة الحرارية. سنبدأ بتقديم الشركة التي استضافتنا كجزء من هذا المشروع. ثم نناقش العموميات على التوربينات والمواد من مكوناتها، ثم تبحث في التفاصيل الإجراء الذي تابعنا والخبرات التي سمحت لنا لإنشاء عدد من التوصيات والمقترحات لتحسين بشأن طريقة التفتيش على قطاعات دليل الطابق الأول. سنغلق هذه الورقة بنتيجة عامة ونظرة مستقبلية.

الكلمات الدالة: السبائك الفائقة، تفتيش الجزء، إصلاح جزء نظيف السطح، "كور بلوغ".

ABSTRACT

The present work deals with the study of the process of inspection and repair of first-stage nozzle segments, which are found in turbines. During the follow-up of this process, within ALGESCO service center, we could identify two issues that we dealt with. The first problem is the difficulty to obtain a clean surface and without oxide residues at the end of the cleaning processes during the inspection. The second problem is: the melting of the cooling devices during the heat treatment. We will begin by presenting the company that hosted us as part of this project. Then we will discuss an overview about turbines and components materials, then we will discuss in detail the approach we followed and the experiments, which allowed us to make several recommendations and propose improvements to the inspection method of the 1st stage nozzle segments. We will close this paper with an outlook on future prospects.

Key words: super alloys, segment inspection, segment repair, "Renew Alloy brazing", surface cleaning, core plug

RESUMÉ

Le présent travail porte sur l'étude et l'optimisation du processus d'inspection et de réparation des segments de directrices premier étage, qui se trouvent dans les turbines. Durant le suivi de ce processus, au sein du centre de services ALGESCO, nous avons pu identifier deux problématiques, que nous avons traitées. La première problématique étant la difficulté d'obtention d'une surface propre et sans résidus d'oxydes à l'issue des processus de nettoyage lors de l'inspection. La seconde problématique étant: la fusion des dispositifs de refroidissement pendant le traitement thermique. Nous commencerons par présenter l'entreprise qui nous a accueilli dans le cadre de ce projet. Puis nous évoquerons des généralités sur les turbines et les matériaux de leurs composants, pour ensuite aborder en détail la démarche que nous avons suivi et les expériences, qui nous ont permis d'établir un certain nombre de recommandations et de proposer des améliorations concernant la méthode d'inspection des segments de directrices 1^{er} étage. Nous clôturerons ce mémoire par un aperçu sur les perspectives futures.

Mots clés: superalliages, inspection des segments, réparation des segments, « Renew Alloy brazing », nettoyage des surfaces, 'core plug'

SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ABRÉVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE _____ 10

PREMIERE PARTIE : ETAT DE L'ART _____ 10

CHAPITRE 1 : Présentation de l'entreprise _____ 11

1.1. GENERAL ELECTRIC _____ 14

1.2. BAKER HUGHES, a GE company _____ 14

1.3. ALGESCO _____ 15

CHAPITRE 2 : Généralités sur les turbines _____ 14

2.1. Introduction _____ 18

2.2. Turbines à gaz _____ 18

2.3. Domaines d'application _____ 20

2.4. Segment de directrice _____ 21

2.5. Segment de directrice 1^{er} étage _____ 22

2.6. « Core plug » _____ 23

2.7. Conclusion _____ 24

CHAPITRE 3 : Matériaux des composants des turbines _____ 18

3.1. Introduction _____ 26

3.2. Superalliages _____ 26

3.2.1. Généralités sur les superalliages _____ 26

3.2.2. Superalliages base nickel _____ 26

3.2.3. Superalliages base cobalt _____ 27

3.2.4. Superalliage FSX 414 _____ 29

3.2.5. Phénomène d'oxydation des superalliages _____ 30

3.3. L'acier inoxydable 321 _____ 30

3.4. Conclusion _____ 31

DEUXIÈME PARTIE : ETAT DES LIEUX _____ 26

CHAPITRE 4 : Restauration des composants de turbines au sein d'ALGESCO _____ 27

4.1. Introduction _____ 34

4.2. Modes de détérioration des segments de directrice 1^{er} étage _____ 34

4.3. Processus d'inspection et de nettoyage des segments de directrice 1^{er} étage _____ 38

4.2.1. Nettoyage par ultrasons (Ultrasonic Cleaning) _____ 38

4.2.2. Nettoyage à la vapeur sèche (Steam Cleaning) _____ 39

4.2.3. Nettoyage par sablage _____ 39

4.4. Processus de réparation des segments _____ 40

4.3.1. Soudage GTAW (TIG) _____ 40

4.3.2. Procédé « Renew Alloy Brazing » _____ 41

4.5. Conclusion _____ 46

CHAPITRE 5 : Diagnostic et propositions _____ 34

5.1. Introduction _____ 48

5.2.	Diagnostic et hypothèses	48
5.3.	Démarche expérimentale et résultats	49
5.4.	Interprétation des résultats et conclusions	55
5.5.	Propositions d'amélioration et recommandations	56
5.6.	Conséquences économiques et avantages	61
5.7.	Conclusion	64
CONCLUSION GÉNÉRALE		65
PERSPECTIVES		65
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		67

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 3-1 Composition de superalliages de Cobalt utilisés dans la fabrication des composants de turbines [4]</i>	29
<i>Tableau 3-2 Composition chimique du superalliage FSX 414 [13]</i>	29
<i>Tableau 3-3 Composition chimique de l'acier inoxydable 321 [16]</i>	31
<i>Tableau 4-1 Composition chimique des poudres utilisées dans le procédé "Renew Alloy Brazing" [28]</i>	44
<i>Tableau 5-1 Tableau comparatif entre le nombre d'heures de travail de la méthode actuelle et celui de la méthode de travail proposée</i>	61

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 Schéma d'une turbine à gaz utilisée pour la production d'électricité [4]	19
Figure 2-2 Schéma d'une section transversale d'une turbine à gaz[4]	19
Figure 2-3 Schéma représentant les différentes parties de la turbine [5]	20
Figure 2-4 Utilisation des turbines à gaz dans les stations offshore [6]	21
Figure 2-5 Directrice (Modèle GE : MS 9001E)	21
Figure 2-6 Exemple de segment de directrice 1 ^{er} étage	22
Figure 2-7 Schéma représentant un segment de directrice premier étage (Modèle 7FA) [11]	23
Figure 2-8 « Core plug » retiré d'un segment de directrice (Modèle 7FA)	23
Figure 2-9 Schéma représentant le système de refroidissement des segments de directrice [11]	24
Figure 3-1 Microstructure d'un superalliage base Cobalt (carbures primaires : M ₆ C, carbures secondaires : M ₂₃ C ₆ ; M = Co, Cr, W, Ni), (a) électrons secondaires, (b) électrons rétrodiffusés [4]	28
Figure 3-2 Evaluation métallurgique montrant un épuisement en chrome/ oxydation [14]	30
Figure 4-1 Fissuration du bord de fuite	34
Figure 4-2 schéma désignant les différentes parties du segment [11]	35
Figure 4-3 Zones de segments présentant un endommagement par usure	35
Figure 4-4 Bord de fuite (zone des trous de refroidissement) présentant un endommagement par usure	35
Figure 4-5 Bord d'attaque brûlé	36
Figure 4-6 Déformation des bords de fuite	36
Figure 4-7 Elargissement des trous de refroidissement	36
Figure 4-8 Diagramme représentant les variations de l'énergie standard de Gibbs (ΔG° par mole d'oxygène à 1 atm) de plusieurs oxydes en fonction de la température [19]	37
Figure 4-9 Schéma représentant les formes les plus répandues d'oxydation des alliages. [19]	38
Figure 4-10 Bac à ultrasons	39
Figure 4-11 (a) oxydes de chrome à la surface de la fissure, (b) Réduction des oxydes sur les parois internes de la fissure après le cycle de nettoyage à l'hydrogène [27]	43
Figure 4-12 Exemple de microfissures (craze cracks), et d'une grande fissure due	44
Figure 4-13 Cycle typique d'un traitement thermique « Renew Alloy Brazing » [25]	45
Figure 5-1 Couche d'oxyde sur un segment de directrice 1er étage	48
Figure 5-2 Fusion des « core plug » des segments après traitement thermique (Directrice modèle 9001)	49
Figure 5-3 Segments dans le bac à ultrasons	50
Figure 5-4 : Segment avant nettoyage aux ultrasons	50
Figure 5-5 : Segment après nettoyage aux ultrasons	50
Figure 5-6 Déroulement de l'expérience	50
Figure 5-7 : Segment avant nettoyage aux ultrasons	51
Figure 5-8 : Segment après nettoyage aux ultrasons	51
Figure 5-9 Détergent utilisé (de couleur verte)	51
Figure 5-10 : Segment avant nettoyage aux ultrasons	52
Figure 5-11 : Segment après nettoyage aux ultrasons	52
Figure 5-12 Etat de surface des segments après le traitement thermique	53
Figure 5-13 « core plug » utilisés pour l'expérience, (1) core plug témoin, (2) core plug sablé à l'oxyde d'Aluminium, (3) core plug sablé au carbure de Silicium.	54
Figure 5-14 "Core plug" 1 et 3 après le traitement thermique	54
Figure 5-15 "Core plug" présentant plusieurs zones fondues après le traitement thermique	55
Figure 5-16 Four sous vide	59
Figure 5-17 Préparation de la pâte "Renew Alloy"	59
Figure 5-18 Seringue utilisée pour l'application de la pâte "Renew Alloy"	59
Figure 5-19 Application de la pâte "Renew Alloy"	60
Figure 5-20 Application du "stop off"	60

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ALGESCO: Algerian Engineering Services Company

GE: General Electric

BHGE: Baker Hughes, a GE company

INTRODUCTION GENERALE

Les turbines à gaz sont, depuis plusieurs décennies, utilisées dans les centrales électriques et les industries pétrolières et gazières. Ces turbines à gaz, employées dans les systèmes de production d'énergie utilisent des **superalliages à base de nickel et de cobalt**, qui constituent le matériau de plusieurs composants tels que les aubes, les directrices et les composants de la chambre de combustion. Ces matériaux possèdent d'excellentes propriétés, notamment les superalliages à base de cobalt qui ont une conductivité thermique plus élevée et donc une plus grande résistance aux chocs thermiques, une plus grande résistance à la fatigue thermique et également une meilleure résistance à la corrosion, par comparaison aux superalliages à base de nickel.

Le superalliage à base de Cobalt FSX 414 constitue le matériau des segments de directrices 1^{er} étage, qui feront l'objet de notre étude. Ces segments fonctionnent dans des conditions de températures très élevées, et sont sujets à des contraintes thermiques extrêmes. Au cours du service de la turbine, ces composants peuvent donc être endommagés. Plusieurs types de dégradation des composants peuvent être constatés. Chaque mode d'endommagement présente différentes exigences quant à la méthode de réparation. A titre d'exemple, les segments candidats à la réparation subissent une première évaluation ou inspection. À partir des résultats obtenus à la fin de cette étape, des recommandations d'ingénierie sont établies quant à la réparabilité de la pièce et à la méthode de réparation requise.

Cependant, il est important de noter que tous les composants endommagés ne sont pas candidats à la réparation. Le niveau de dégradation de certains composants peut parfois aller au-delà des limites de réparation prescrites par l'entreprise General Electric.

Le présent travail s'est porté sur **le suivi et l'étude du processus d'inspection et de réparation des segments de directrices "premier étage"**, effectué au sein de l'entreprise ALGESCO.

Les segments de directrices 1^{er} étage se trouvent être les premiers composants de la turbine à subir le contact avec les gaz à très haute température, issus de la combustion. A ce niveau de la turbine, la température peut atteindre 1140 °C dans les « large frames » ou turbines *grands modèles*. Les segments qui composent la directrice sont donc sujets à une fatigue thermique importante, et sont souvent endommagés pendant le service. Les directrices de turbines qui sont envoyées à ALGESCO, sont inspectées afin d'évaluer l'ampleur de l'endommagement et de décider de la réparabilité des composants, puis réparées, en second lieu s'il y a possibilité de réparation.

Durant le suivi du processus d'inspection et de réparation de ces composants, nous avons pu identifier deux problématiques, que nous avons traitées. La première problématique étant la difficulté d'obtention d'une surface propre et sans résidus d'oxydes à l'issue des processus de nettoyage lors de l'inspection. La seconde problématique étant : la fusion des dispositifs de refroidissement ('core plugs') se trouvant à l'intérieur des segments, au cours des traitements thermiques dans le four sous vide. Ces problématiques constituent des obstacles durant le processus d'inspection des segments, engendrent une perte de temps, génèrent des coûts importants et ont une répercussion directe sur l'étape de la réparation des composants. C'est la raison pour laquelle, nous nous fixons comme objectif d'optimiser la méthode de travail de façon à trouver des solutions à ces problématiques et, par conséquent, augmenter la productivité.

Nous étudierons par conséquent en détail chaque étape du processus d'inspection et de réparation des segments de directrices premier étage afin de comprendre, au mieux les phénomènes qui se produisent.

Pour ce faire, nous commencerons par présenter, dans une première partie l'état de l'art, qui se composera de plusieurs chapitres :

- Le contenu du premier chapitre sera constitué d'une présentation de l'entreprise qui nous a accueilli dans le cadre de ce projet ;
- Le second chapitre présentera des généralités sur les turbines ;
- Le troisième chapitre portera sur les matériaux des composants de turbines.

Nous entamerons ensuite la deuxième partie de ce projet avec les chapitres suivants :

- Le quatrième chapitre concernera les méthodes d'inspection et de réparation des turbines au sein d'ALGESCO ;
- Enfin, au cinquième et dernier chapitre, nous exposerons notre diagnostic de la méthode de travail déjà existante, puis nous expliquerons les expériences que nous avons effectuées ainsi que les propositions d'amélioration que nous avons suggérées.

Nous clôturerons ce mémoire par une conclusion générale et un aperçu sur les perspectives futures.

PREMIERE PARTIE : ETAT DE L'ART

CHAPITRE 1 : Présentation de l'entreprise

La présente étude a été réalisée au sein du Centre de services ALGESCO, qui fait partie de BAKER HUGHES, a GE Company, une entreprise de GENERAL ELECTRIC.

Nous allons, en premier lieu, présenter l'entreprise GENERAL ELECTRIC ainsi que l'entreprise BAKER HUGHES, a GE Company puis enfin présenter le centre de services ALGESCO.

1.1. GENERAL ELECTRIC

General Electric est un conglomérat industriel multinational américain, qui transforme l'industrie mondiale grâce à ses machines contrôlées par logiciel et des solutions connectées, adaptées et prédictives.

General Electric est une entreprise présente sur plusieurs secteurs d'activités, aussi nombreux que variés, allant des domaines de l'énergie, de l'aviation aux domaines de la finance, du digital et des transports. Ainsi, des moteurs d'avions et de la production d'électricité aux services financiers, aux solutions de soins de santé et à la programmation télévisuelle, GE exerce dans plus de 100 pays et emploie environ 300 000 personnes dans le monde.

Les principales filiales de GE dans le monde sont : GE Aviation, GE Capital, GE Healthcare, GE Lighting, GE Power, GE Renewable Energy, GE Transportation, GE Digital, Baker Hughes a GE company.

General Electric s'organise autour d'un échange mondial de connaissance, le "GE Store" (offre de produits GE), au sein duquel chaque activité partage et a accès aux mêmes technologies, marchés, structures et intelligences. Chaque intervention nourrit les innovations et les applications dans tous les secteurs industriels.

Présente en Algérie depuis plus de 40 ans, General Electric soutient l'industrie pétrolière et gazière algérienne et sa flotte installée en Algérie comprend environ 400 turbines à gaz, 340 compresseurs, 200 pompes centrifuges, 50 turbines à vapeur et 35 000 kilomètres de pipelines inspectés.



1.2. BAKER HUGHES, a GE company

"Baker Hughes, a GE Company" est une société issue de la fusion entre "Baker Hughes" et "General Electric Oil & Gas". BHGE est la première et unique entreprise « fullstream » de l'industrie du pétrole et du gaz, au monde. L'offre fullstream comprend l'intervention en amont (Upstream), au niveau du transport (Midstream) et en aval (Downstream) de la chaîne de production.

En plus de proposer une offre « fullstream », BHGE a pour missions d'intégrer des solutions digitales pour plus de fiabilité et de disponibilité, créer de nouvelles solutions et s'appuyer sur un héritage solide pour créer une culture d'entreprise de classe mondiale.

BHGE est aujourd'hui un leader mondial dans la fourniture de systèmes, technologies, solutions numériques, produits, et services pétroliers d'un bout à l'autre de la chaîne de production et d'exploitation du pétrole et du gaz. Avec plus de 59 000 collaborateurs, répartis dans plus de 80 pays, Baker Hughes aide ses clients à découvrir, évaluer, forer, produire, transporter et transformer les ressources d'hydrocarbures.



1.3. ALGESCO

ALGESCO est une joint-venture entre « Baker Hughes, a GE Company », « SONATRACH » et « SONELGAZ ».

A l'origine, ALGESCO a été créée en 1993 à Hassi R'mel, puis transférée sur son nouveau site industriel à Boufarik en 2010. C'est un centre spécialisé dans l'offre de services d'entretien et d'optimisation des équipements de turbomachinerie, qui contribue à l'accroissement des capacités d'exploitation et de production dans le domaine de l'industrie pétrolière et gazière Algérienne.

Cet atelier de 18 300 m² de surface offre les technologies les plus avancées pour l'inspection, la maintenance, la réparation et l'amélioration de performance des équipements de turbines (rotors, compresseurs, aubes...etc.). Il s'agit du plus grand site General Electric de ce genre au monde.

Les principales prestations assurées par ALGESCO sont : la maintenance et la réparation (service Engineering), la formation technique ainsi que l'achat et la revente de pièces de rechange de turbines.

Les services élargis de ce centre de service comprennent la remise en état des composants des turbines à gaz dans leurs conditions d'origine, la restauration des caractéristiques physiques d'origine des matériaux et l'allongement de la durée de vie prévue des composants des turbines à gaz. Les domaines technologiques couverts comprennent le GNL, la compression des canalisations, l'inspection et l'intégrité des pipelines, le stockage de gaz et de CO₂, les applications de raffinerie et de pétrochimie, ainsi que la surveillance et le diagnostic à distance de la flotte installée de GE.





ATELIER (SHOP / ENGINEERING) :

Il s'agit de l'endroit où s'effectuent toutes les opérations d'inspection et de réparation des composants des turbines (tubes à flammes, aubes, pièces de transition, nez d'injecteurs, directrices...etc), avec un suivi constant des travaux par les ingénieurs qui doivent établir, respectivement les rapports d'inspection et les rapports de réparation à transmettre au client.

L'atelier regroupe des équipements de haute technologie, fonctionnant avec des logiciels appropriés. Parmi ces équipements, on peut citer : 2 Fours de traitement thermique (sous vide), Fraiseuse 5 axes, Soudage laser 5 axes, 2 équipements de revêtement, cabines et équipement de Contrôle Non Destructif, cabines et équipements de soudage, équipement de grenailage, équipement de sablage à l'oxyde d'aluminium, équipement de sablage au carbure de Silicium, équilibreuse.

CHAPITRE 2 : Généralités sur les turbines

2.1. Introduction

Dans la littérature, la turbine est définie comme étant un dispositif rotatif destiné à utiliser l'énergie cinétique d'un fluide liquide comme l'eau ou gazeux pour faire tourner un arbre supportant les aubes de la turbine. [Larousse 2017]. Il existe plusieurs types de turbines selon l'utilisation recherchée, tels que les turbines à gaz, les turbines à vapeur, et les turbines hydrauliques, qui sont situées en aval d'un barrage hydroélectrique, actionnées par l'écoulement de l'eau et entraînent un alternateur qui produit de l'électricité. Dans ce qui suit, nous nous pencherons plus en détail sur les turbines à gaz, qui constitueront l'objet de notre étude.

2.2. Turbines à gaz

Une « turbine à gaz » est un moteur rotatif endothermique, capable de convertir en continu l'énergie thermique en énergie mécanique. Aussi appelées « Turbines à combustion », les turbines à gaz sont, aujourd'hui, l'élément le plus polyvalent des turbomachines. Ce sont des machines très puissantes, tournant à de très grandes vitesses et qui peuvent fonctionner, sans arrêt, pendant une durée allant jusqu'à un an. Elles peuvent être employées dans de nombreuses et diverses industries critiques telles que la production d'électricité, le pétrole et le gaz, les usines de traitement, l'aviation, ainsi que les industries locales et les petites industries connexes. Les turbines à gaz sont capables de conduire des générateurs électriques, ou des pompes et des compresseurs, selon l'application recherchée. [1]

Capables de fonctionner en utilisant une grande variété de combustibles (liquides et gazeux), la puissance de ces machines varie de 5 MW à 500 MW et leur rendement varie entre 25% et 40%.

La puissance d'une turbine à gaz est sensiblement liée à la température interne de la turbine. Les principaux composants des turbines à gaz sont : le compresseur, dont la fonction est de fournir la quantité d'air nécessaire pour la combustion des gaz et d'alimenter en air divers circuits de refroidissement, les tubes à flammes, dont le rôle consiste à brûler un mélange de carburant et d'air et délivrer les gaz issus de la combustion vers les aubes de la turbine à travers les pièces de transition et en passant par la directrice. [1,2]

Le principe de fonctionnement de la turbine à gaz est le suivant : l'air aspiré du milieu environnant est conduit vers un compresseur dans lequel il est comprimé. Durant cette opération de compression, les valeurs de la pression et la température augmentent considérablement. L'air comprimé est ensuite mélangé à un combustible en présence d'une flamme dans la chambre de combustion, ce qui augmente son niveau d'énergie. La combustion a alors lieu et les gaz qui en résultent sont propulsés à travers la turbine. L'arbre de cette turbine continue de tourner et de faire tourner le compresseur.

Une unité de démarrage séparée est utilisée pour fournir le premier mouvement du rotor, jusqu'à ce que la vitesse de rotation de la turbine atteigne une valeur à partir de laquelle la turbine devient autonome et peut garder l'ensemble de l'unité en marche. [1,2]

Les turbines à gaz sont capables de fonctionner en utilisant plusieurs types de combustibles différents tels que le gaz naturel ou le fuel ou une combinaison de combustibles.

Les turbines à gaz produites par General Electric sont classifiées comme suit :

- HEAVY DUTY : ces turbines à gaz se divisent en deux types : single shaft (un seul arbre), généralement utilisées pour la production d'électricité et double shaft (2 arbres), constituées d'une partie HP (Haute Pression) et d'une partie LP (Basse pression/ « Power turbine »).
- JET : ces turbines à gaz sont réparties en deux classes : les « Penguin Turbines » destinées à des utilisations industrielles et marines, et les turbines aéronautiques.

Parmi les turbines à gaz de General Electric, on distingue plusieurs modèles dont : MS 5002, MS 6001, MS 7001, MS 9001, PGT 10, PGT 25...etc, qui sont répartis en deux catégories, selon la taille et la puissance de la turbine : les « Large Frames » ou turbines *Grands modèles* qui comprennent les modèles 6000, 7000 et 9000, et les « Small frames » qui comprennent le reste des modèles de turbines. [3]

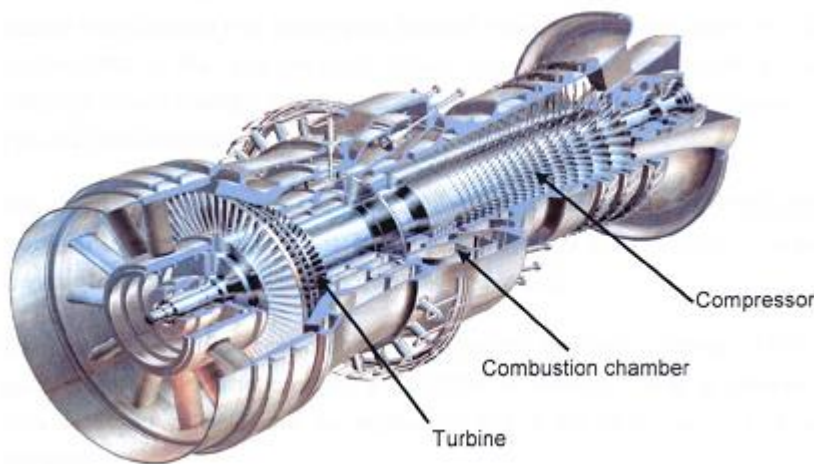


Figure 2-1 Schéma d'une turbine à gaz utilisée pour la production d'électricité [4]

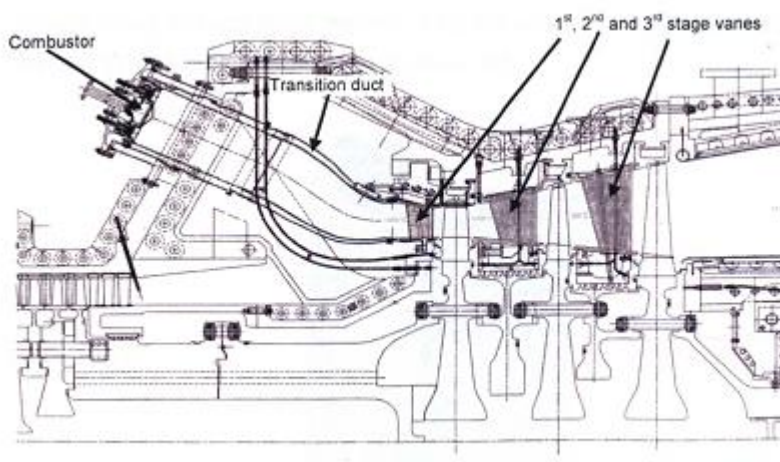


Figure 2-2 Schéma d'une section transversale d'une turbine à gaz[4]

- Compresseur :

Le compresseur peut être axial ou centrifuge. Il se compose de plusieurs étages consécutifs d'ailettes et a pour rôle de comprimer l'air aspiré.

- Combustion :

La partie combustion se compose de plusieurs tubes à flammes reliés et disposés de façon circulaire, chacun suivi d'une pièce de transition.

- Turbine :

Elle comprend un certain nombre d'étages, chacun d'eux étant composé d'un étage statorique (les directrices) qui sert à diriger les gaz à température et pression élevés vers l'étage rotorique composé d'aubes de turbines.

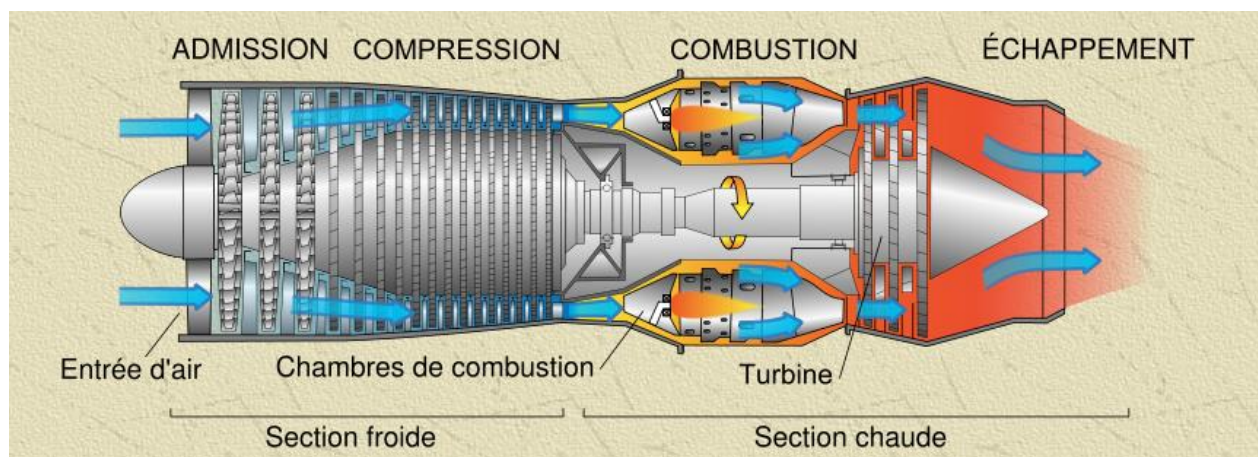


Figure 2-3 Schéma représentant les différentes parties de la turbine [5]

2.3. Domaines d'application

Les turbines à gaz sont utilisées dans diverses industries dont :

- Les usines de liquéfaction du gaz naturel
- Les installations pétrochimiques
- Les centrales de production d'électricité
- Le chauffage urbain
- Les stations offshore :

Les plateformes offshore utilisent des turbines à gaz « aérodérivatives » pour produire leur propre électricité. Ces turbines sont issues des turbines à gaz développées pour l'aviation et elles sont employées en raison de leur légèreté.



Figure 2-4 Utilisation des turbines à gaz dans les stations offshore [6]

2.4. Segment de directrice

Dans une turbine à gaz, la directrice est l'organe dont la fonction est de guider l'écoulement des gaz chauds vers les aubes de la turbine avec l'angle d'incidence le plus favorable. [7]

Les segments sont les éléments qui composent la directrice de la turbine. Chaque directrice est constituée de 18 segments. Ce sont des composants stationnaires qui ont pour rôle de diriger les gaz vers les aubes tournantes de la turbine.

L'état des segments de directrices de turbines à gaz a tendance à se dégrader pendant le service de la turbine.

Les segments de turbines sont sujets à plusieurs types d'endommagement, dus à l'environnement agressif des turbines à gaz industrielles. Cette dégradation peut se traduire par : des craquelures, de l'oxydation, de la corrosion, un fluage, une fusion naissante ou des dommages causés par des corps étrangers. Chaque mode de dégradation requiert des exigences différentes pour la réparation des composants.



Figure 2-5 Directrice (Modèle GE : MS 9001E)

2.5. Segment de directrice 1^{er} étage

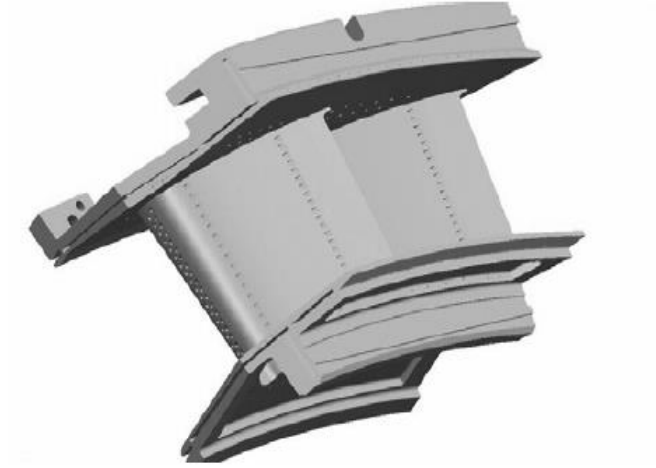


Figure 2-6 Exemple de segment de directrice 1^{er} étage

Les segments de directrices premier étage (terminologie GE pour les aubes stationnaires dans la turbine) sont les premiers éléments à être confrontés aux gaz sortants des chambres de combustion, et par conséquent, aux températures les plus élevées de la turbine. Leur fonction est de diriger les gaz chauds vers les aubes de turbines. Ces composants se distinguent donc par une excellente résistance à de très hautes températures.

Les segments de directrices de turbines doivent avoir une excellente résistance à l'oxydation et à la corrosion à haute température, une haute résistance à la fatigue thermique, une bonne soudabilité et une bonne coulabilité pour faciliter la fabrication et réparation. [8]

Ces composants sont essentiellement sujets à la formation de fissures quel que soit le type de turbines : industrielles, aériennes ou marines. [8]

Les segments de directrices premier étage sont fabriqués en superalliage de Cobalt. Pendant leur durée de vie, les segments peuvent être réparés et rénovés plusieurs fois.

Ces composants sont donc soumis à des contraintes thermiques extrêmes mais disposent d'un système de refroidissement, notamment des trous de refroidissement cylindriques dont l'emplacement varie selon le type de segment. [9,10]

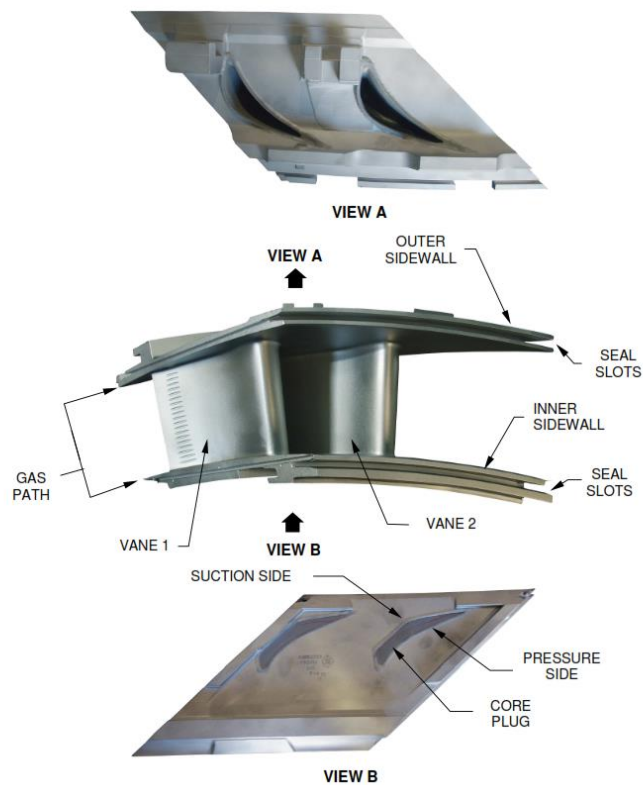


Figure 2-7 Schéma représentant un segment de directrice premier étage (Modèle 7FA) [11]

2.6. « Core plug »

Les ‘core plug’ représentent un des systèmes de refroidissement des segments de directrices 1^{er} étage. Ils font partie du segment et y sont soudés. Chaque segment en contient quatre. Cependant, ils ne sont pas constitués du même matériau. Tandis que les segments sont fabriqués en superalliages de Cobalt, le matériau des ‘core plug’ est l’acier inoxydable 321.

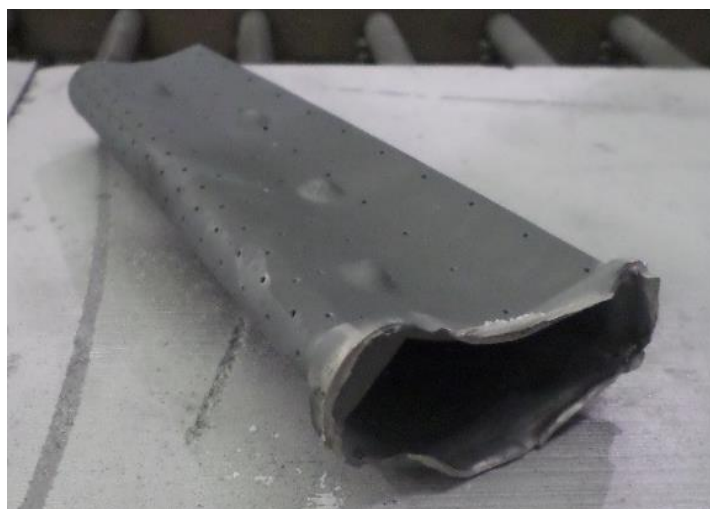


Figure 2-8 « Core plug » retiré d'un segment de directrice (Modèle 7FA)

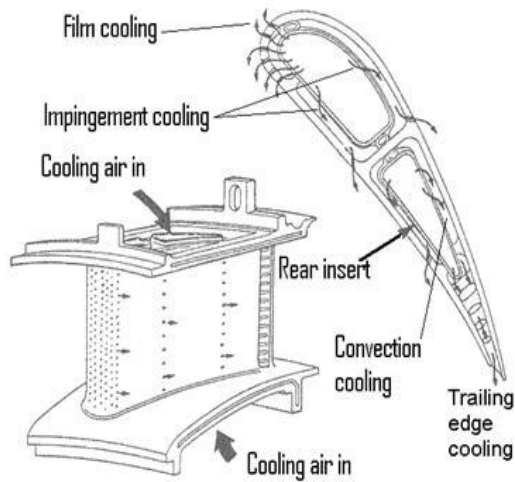


Figure 2-9 Schéma représentant le système de refroidissement des segments de directrice [11]

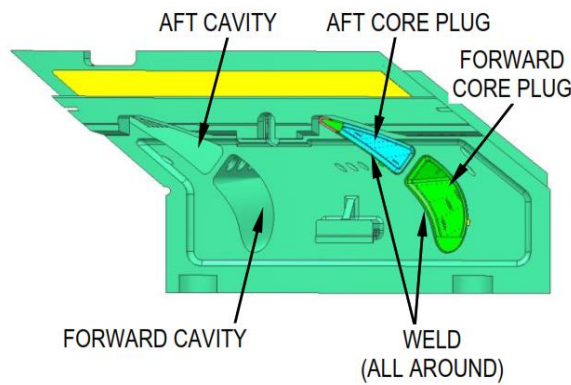


Figure 2-10 Schéma représentant l'emplacement des core plug dans le segment de directrice [11]



Figure 2-11 Localisation des 4 core plug dans le segment de directrice (Modèle 6000)

2.7. Conclusion

Nous avons introduit des généralités sur les turbines ainsi que leurs composants et le rôle de ces derniers, et en particulier les segments de directrices 1^{er} étage qui représentent l'objet de notre étude.

Nous nous apprêtons à présent à présenter les matériaux qui composent ces pièces, leurs propriétés, et leur importance par rapport aux conditions de fonctionnement de la turbine.

CHAPITRE 3 : Matériaux des composants des turbines

3.1. Introduction

L'aspiration et le besoin constant pour une grande efficacité dans des applications de hautes températures, notamment pour les turbines à gaz dans les centrales électriques et les moteurs d'avions requiert le développement de matériaux résistants aux hautes températures. En effet, les superalliages sont les matériaux traditionnellement utilisés dans la fabrication des composants de turbines à gaz, notamment les aubes et les pièces soumises à de fortes contraintes thermiques. Ces matériaux doivent maintenir une certaine stabilité métallurgique afin d'éviter toute fragilisation de la structure et permettre la réparation des composants.

3.2. Superalliages

3.2.1. Généralités sur les superalliages

Le terme « superalliages » désigne une vaste famille d'alliages à base de nickel, cobalt ou fer, possédant de très bonnes performances à haute température. Les superalliages sont des matériaux métalliques élaborés à partir d'éléments qui, initialement ont des propriétés médiocres, mais qui, réunis, constituent des métaux particulièrement efficaces. Les superalliages se distinguent des alliages ordinaires par des caractéristiques hors du commun. Ils possèdent de très bonnes propriétés de résistance aux efforts mécaniques intenses dans un large domaine de températures et une excellente tenue à la corrosion et/ou à l'oxydation à haute température. Ils ont tout d'abord été utilisés pour les moteurs d'avion, puis pour les turbines à gaz industrielles ou marines, les moteurs de fusée, les réacteurs nucléaires, les usines chimiques et pétrochimiques.

Il existe deux grandes familles de superalliages : les superalliages base Nickel et les superalliages base Cobalt. Le terme base désigne l'élément le plus abondant dans la composition du superalliage. La coulée des superalliages de Cobalt et de Nickel à haute température est considérée comme étant la plus complexe parmi tous les alliages existants.

Dans le but d'améliorer la résistance au fluage, ces alliages sont solidifiés en monocristaux, et peuvent, par conséquent, être employés dans des applications de hautes températures. Généralement soumis à une opération de revêtement de protection, les superalliages base Nickel sont utilisés pour des applications à haute température comprises entre 700 et 1050 °C. [12]

3.2.2. Superalliages base nickel

Les superalliages à base de nickel sont nés à la fin des années 20. Depuis, des progrès n'ont cessé d'être réalisés, non seulement par l'optimisation de leur composition mais aussi par l'amélioration des méthodes d'élaboration et des traitements thermiques.

Les superalliages à base de nickel sont constitués d'une matrice austénitique, cubique faces centrées, et de précipités de phase Ni_3Al .

L'élément le plus abondant de ce superalliage est le nickel, qui, pur, a de mauvaises propriétés, puisqu'il s'oxyde et flue dès 600°C à 700°C. De ce fait, d'autres éléments sont ajoutés au Ni afin d'obtenir les meilleures propriétés possibles.

Parmi ces éléments, on peut citer :

- Le Chrome : qui confère à l'alliage une protection contre l'oxydation et la corrosion en formant en surface des oxydes de Chrome Cr_2O_3 ;
- L'Aluminium : qui permet de renforcer les propriétés mécaniques à chaud grâce à la précipitation dans la solution solide ternaire Nickel-Chrome-Aluminium d'un composé de type Ni_3Al . Cet élément joue également un rôle important dans la résistance de l'alliage à l'oxydation haute température par formation d'une couche d'Alumine stable Al_2O_3 .
- Le Molybdène, le Tungstène et le Rhénium : durcissent la solution solide.

A travers un dosage fin des composants sus-cités ainsi que l'ajout d'éléments tels que le Titane, le Cobalt, le Fer...etc, ces superalliages répondent à des besoins très divers qui dépassent largement le domaine des réacteurs d'avion. Les superalliages base Nickel démontrent une combinaison de bonnes propriétés mécaniques, dont la résistance au fluage. Ils sont notamment utilisés dans la fabrication de composants de turbines.

Cependant, bien que ces superalliages soient largement utilisés, la température interne dans la turbine est proche de la température de fusion de la majorité des superalliages monocristallins développés. De plus, ces alliages peuvent présenter des limites dont une résistance insuffisante à la corrosion à haute température. [12]

3.2.3. Superalliages base cobalt

Lorsqu'on s'intéresse à l'historique du développement technologique des moteurs d'avions, les alliages base cobalt émergent comme étant les premiers vrais membres de la famille des superalliages.

Initialement, les superalliages base cobalt étaient employés dans la fabrication des turbocompresseurs pour moteurs à pistons dans les années 1930, puis dans la fabrication des aubes des premières turbines dans les années 1940. Actuellement, les superalliages base cobalt sont principalement utilisés pour la fabrication des aubes et des directrices de turbines.

Les superalliages à base de cobalt ne sont pas, contrairement à ceux à base de fer et de fer-nickel, durcis par précipitation d'une phase intermétallique ordonnée cohérente. Ce sont des matériaux à matrice cubique à faces centrées stabilisés à basse température par le nickel formant avec le cobalt une solution solide durcie par des atomes lourds (Mo, W, C....) et renforcée par une précipitation de fins carbures intra granulaires. Leurs propriétés mécaniques ne peuvent donc qu'exceptionnellement être améliorées par un simple traitement thermique.

Les superalliages à base de Cobalt sont généralement caractérisés par une structure cubique à faces centrées contenant d'autres phases, qui sont essentiellement des carbures on peut aussi observer des composés intermétalliques. [12, 13]

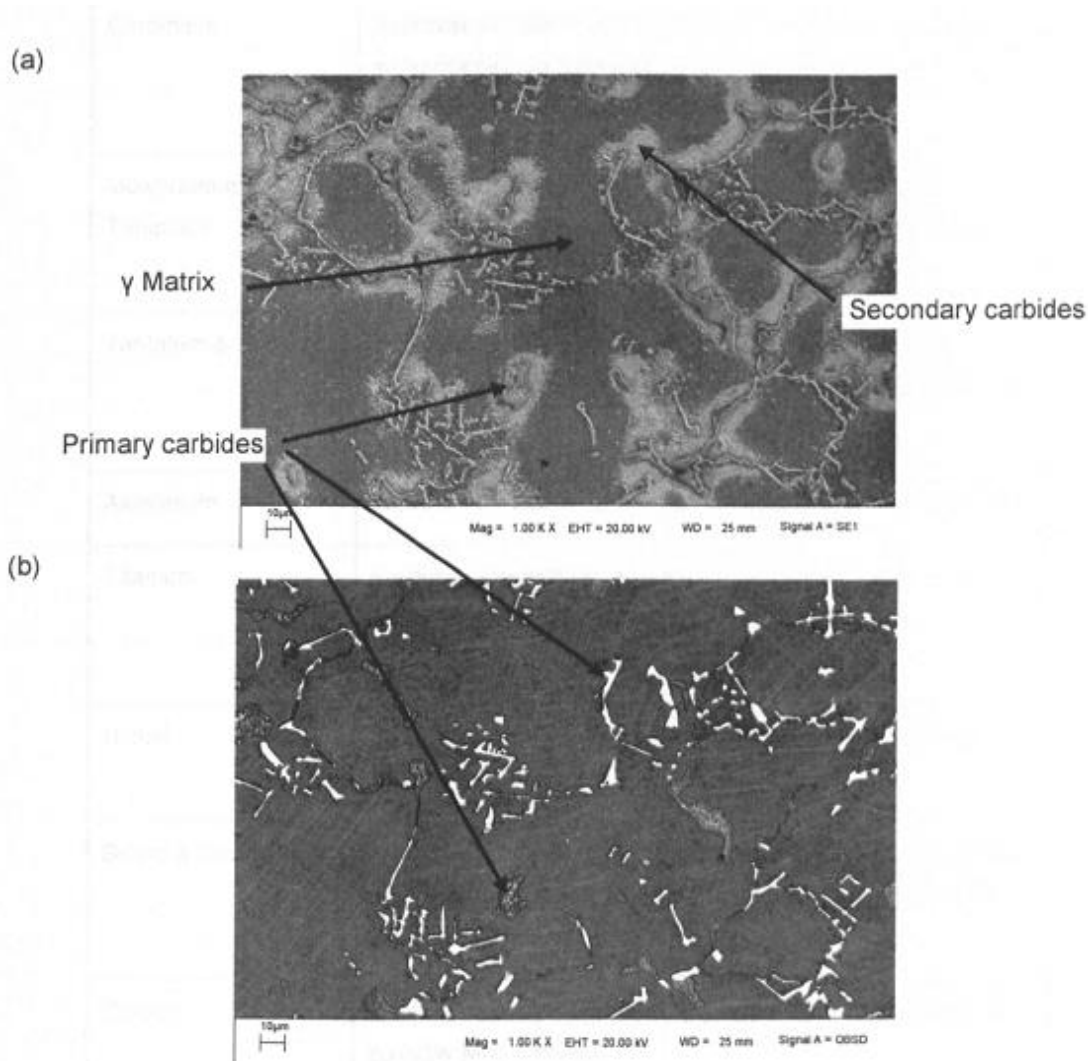


Figure 3-1 Microstructure d'un superalliage base Cobalt (carbures primaires : M_6C , carbures secondaires : $M_{23}C_6$; $M = Co, Cr, W, Ni$), (a) électrons secondaires, (b) électrons rétrodiffusés [4]

Chaque élément d'alliage a un rôle précis dans la composition et confère des propriétés particulières au superalliage :

- Le Cobalt : représente une base d'alliage unique grâce à sa transformation allotropique ;
- Le Chrome : améliore la résistance à l'oxydation et à la corrosion à haute température ;
- Les éléments d'addition tels que le fer, le manganèse, le nickel, et le carbone ont tendance à stabiliser la structure cubique à face centrée.

Le développement et l'utilisation des superalliages base cobalt ont été, en effet, grandement éclipsés par l'avènement des superalliages base nickel. Cependant, bien que les superalliages base-cobalt possèdent une résistance au fluage inférieure à celle des alliages de Nickel, ils se distinguent par une remarquable résistance à l'oxydation et à la corrosion dans des environnements de très haute température. Leur résistance au fluage à haute température et leur résistance à la fatigue ainsi que leur résistance à la corrosion à chaud et leur résistance à l'usure leur confèrent des utilisations spéciales dans une variété d'applications qui devraient assurer leur utilisation continue pendant de nombreuses années. En général, les alliages base cobalt possèdent une résistance supérieure à très haute température, par rapport aux alliages à base de nickel. [4]

Voici quelques exemples de superalliages à base de cobalt utilisés dans l'élaboration des composants de turbines :

Tableau 3-1 Composition de superalliages de Cobalt utilisés dans la fabrication des composants de turbines [4]

	C	Fe	Ni	Cr	W	Co	Ta	Ti	Al	Zr	B
X40	0.5	1.5	10.0	25	7.5	Bal					
X45	0.25	2.0	10.5	25	7.0	Bal					0.01
FSX 414	0.25	2.0	10.5	29.5	7.0	Bal					0.012
MM 509	0.6	1.0	10.0	21.5	7.0	Bal	3.5	0.2		0.5	0.01
ECY 768	0.6	1.0	10.0	23.5	7.0	Bal	3.5	0.2	0.15	0.05	0.01

3.2.4. Superalliage FSX 414

Le matériau actuel utilisé pour la fabrication des segments de directrice premier étage est l'alliage FSX 414, un superalliage à base de cobalt breveté par General Electric.

Cet alliage est un dérivé des alliages X-40 et X-45, également développés par GE, et d'abord utilisé dans les années 1960. Le superalliage FSX-414 contient moins de carbone que X-40 pour améliorer la soudabilité, et plus de chrome pour améliorer la résistance à l'oxydation / corrosion.

Les tests de longue durée dans une chambre de combustion simulée de turbine à gaz ont démontré une augmentation de deux à trois fois la résistance à l'oxydation par rapport aux alliages X-40 et X-45.

La composition du FSX414 est donnée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3-2 Composition chimique du superalliage FSX 414 [13]

Alliage	Co	Cr	Ni	W	Fe	Ta	Zr	Si	Mn	Ti	Al	Ce	C	B
FSX-414	Base	29.0	10.0	7.5	1.0	-	-	-	-	-	-	-	0.25	0.01

Le superalliage FSX 414 a une ductilité modérée à température ambiante, avec un allongement d'environ 15% et une bonne ductilité à 870 °C, avec un allongement d'environ 35%. Cependant, la ductilité des superalliages base cobalt, et en particulier celle du superalliage FSX 414 diminue avec l'exposition aux hautes températures. Cette perte de ductilité peut provenir de la précipitation secondaire des carbures pendant l'exposition au service. [14]

3.2.5. Phénomène d'oxydation des superalliages

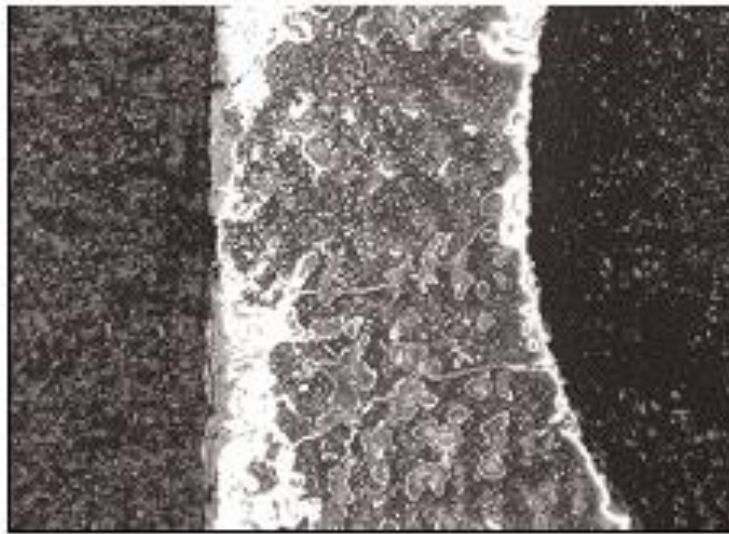


Figure 3. Metallurgical evolution showing chrome depletion/oxidation

Figure 3-2 Evaluation métallurgique montrant un épaissement en chrome/ oxydation [14]

L'industrie énergétique étant en constante évolution, les besoins en matériaux résistants à des environnements agressifs et à des contraintes thermiques et mécaniques extrêmes, ne cessent de croître. C'est la raison pour laquelle des alliages de plus en plus résistants à haute température ont été élaborés. Ce sont les superalliages, des matériaux qui de bonnes propriétés mécaniques à des températures élevées et qui possèdent une bonne stabilité de surface (résistance à l'oxydation). La résistance à l'oxydation à haute température est une propriété primordiale pour les applications industrielles des superalliages. [15]

L'oxydation est une réaction entre l'oxygène présent dans l'air et l'alliage. L'oxyde est formé sur la surface de l'alliage. La surface de l'alliage réagit alors avec l'oxygène et forme une couche d'oxyde mince et protectrice. Avec la montée des températures, le film mince se développe en une couche d'oxyde plus épaisse. Cette couche d'oxyde protège le substrat contre l'oxydation de façon continue. La formation de la couche d'oxyde est contrôlée par les facteurs thermodynamiques et cinétiques, la composition de l'alliage, la composition du mélange gazeux et la température. Ainsi, plusieurs études et cas pratiques ont démontré que les segments de directrices en superalliage de Cobalt, contiennent, à la surface, un film d'oxydes, typiquement constitué d'oxydes de Chrome, d'oxydes de Nickel, d'oxydes de Fer, ou une combinaison de ces oxydes.

3.3. L'acier inoxydable 321

Les aciers inoxydables sont fabriqués à partir d'un alliage de fer qui contient un minimum de 10,5% de Chrome. La formation d'un film d'oxyde invisible, adhérent et riche en chrome leur attribue la propriété d'inoxydable. L'acier 321 est un acier inoxydable austénitique d'usage général avec une structure cubique à faces centrées. Il est essentiellement non magnétique sous condition de recuit et ne peut être durci que par un travail à froid. Le titane est ajouté pour

supprimer les précipités de carbure de chrome aux joints de grain et réduire les possibilités de corrosion inter granulaire. Cet élément permet également d'améliorer les propriétés à haute température de l'alliage. L'acier inoxydable 321 possède une excellente résistance à l'oxydation et à la corrosion et une bonne résistance au fluage. Sa température de fusion est comprise entre 1400 et 1425°C.

La composition chimique de l'acier inoxydable 321 est précisée dans le Tableau 2 :

Tableau 3-3 Composition chimique de l'acier inoxydable 321 [16]

Element	Fe	C	Cr	Ni	Si	Ti	Mn	N	S	P
%	Base	0.08 max	17.00 - 19.00	9.00 – 12.00	0.75 max	0.7 max	2.00 max	0.10 max	0.030 max	0.045 max

3.4. Conclusion

Les matériaux utilisés dans la fabrication des composants de turbines, et en particulier des segments de directrices 1^{er} étage (superalliages base cobalt) et des systèmes de refroidissement (acier inoxydable) ont une importance primordiale. Ils se distinguent par des caractéristiques exceptionnelles mais demeurent cependant sujets à l'oxydation à haute température.

Nous présenterons au prochain chapitre les techniques employées dans la restauration de ces composants au sein d'ALGESCO ainsi qu'un diagnostic de la méthode de travail déjà existante.

DEUXIÈME PARTIE : ETAT DES LIEUX

CHAPITRE 4 : Restauration des composants de turbines au sein d'ALGESCO

4.1. Introduction

Avec l'évolution des technologies mises en œuvre dans le monde des turbines à gaz, la réparation des composants est un constant défi. Les composants de turbine sont soumis à de très hautes températures. Un défaut de réparation peut en effet avoir des répercussions catastrophiques pour la turbine.

4.2. Modes de détérioration des segments de directrice 1^{er} étage

Les segments de directrice 1^{er} étage sont soumis à un environnement agressif durant le service de la turbine. Ce sont les premières pièces à être directement exposées aux gaz les plus chauds sortants de la combustion. La dégradation de ces composants peut se manifester de différentes manières :

- Fissuration :

La fissuration demeure le principal mode de dégradation dans la majorité des segments de directrices de turbines à gaz industrielles. Ces fissurations sont généralement la cause principale pour laquelle ces composants sont envoyés pour réparation. Elles sont particulièrement sévères en raison des longues durées de services et des fortes contraintes thermiques, dues au gradient thermique entre les surfaces intérieures et extérieures de la directrice, auxquels ils sont soumis.

Les fissures dans les plus grands modèles de turbine peuvent atteindre 7 à 10 cm de longueur, et la somme des longueurs de toutes les fissures dans une directrice de turbine peut dépasser les 13 mètres. [8,17,18]

Ce phénomène de fissuration concerne différentes parties du segment, notamment le bord de fuite (Trailing Edge), le bord d'attaque (Leading Edge), les pâles (Airfoils), les parois latérales (sidewalls).



Figure 4-1 Fissuration du bord de fuite

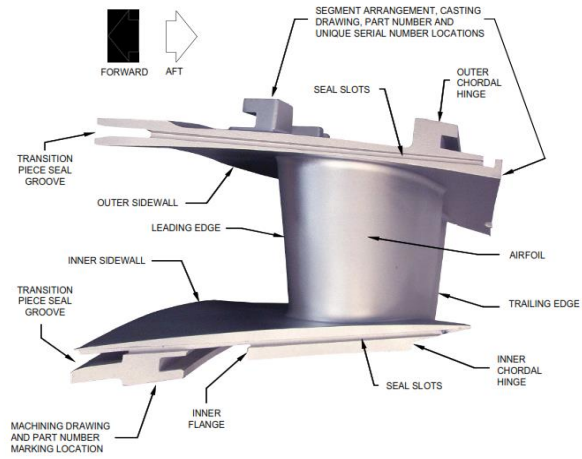


Figure 4-2 schéma désignant les différentes parties du segment [11]

- Usure



Figure 4-3 Zones de segments présentant un endommagement par usure

- Enlèvement de matière / érosion



Figure 4-4 Bord de fuite (zone des trous de refroidissement) présentant un endommagement par usure

- Brûlure du bord d'attaque (Leading Edge)



Figure 4-5 Bord d'attaque brûlé

- Déformation



Figure 4-6 Déformation des bords de fuite

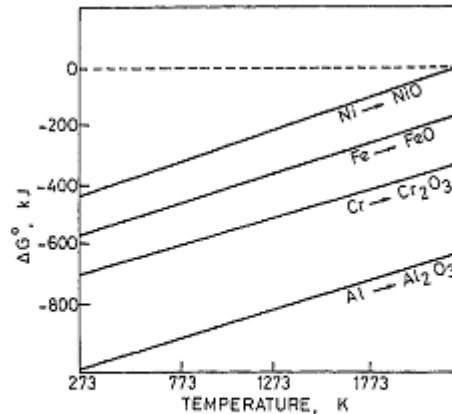
- Elargissement des trous de refroidissement



Figure 4-7 Elargissement des trous de refroidissement

- Oxydation

On peut constater, dans certains cas, le développement d'une couche d'oxyde, notamment des oxydes de Chrome. Le Chrome et l'Aluminium ont une affinité pour l'oxygène beaucoup plus importante que le Nickel, le Cobalt ou le Fer. Les degrés d'affinité des métaux pour l'oxygène sont généralement présentés dans le diagramme d'Ellingham, qui représente la variation de l'énergie libre standard (énergie de Gibbs) de formation d'oxyde par mole d'oxygène en fonction de la température. [14,19]



1 Schematic diagram showing standard Gibb's energy change (ΔG° per mole of oxygen at 1 atm) for several metal oxides as function of temperature

Figure 4-8 Diagramme représentant les variations de l'énergie standard de Gibbs (ΔG° par mole d'oxygène à 1 atm) de plusieurs oxydes en fonction de la température [19]

Les analyses métallurgiques des segments démontrent que la microstructure est modifiée par l'accroissement des précipitations de carbures, ce qui augmente la dureté et conduit à la formation de fissures. [14, 19]

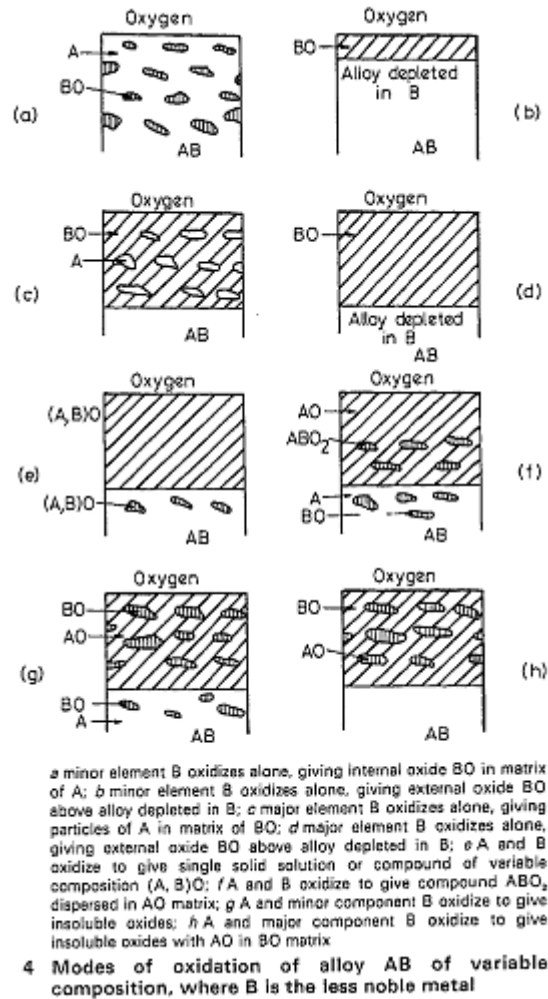


Figure 4-9 Schéma représentant les formes les plus répandues d'oxydation des alliages. [19]

4.3. Processus d'inspection et de nettoyage des segments de directrice 1^{er} étage

Le nettoyage constitue l'étape la plus importante de tout processus de réparation. Ainsi, la réussite de cette étape engendre la réussite des étapes suivantes. Il est nécessaire d'éliminer toute contamination provenant du service de la turbine, afin de d'inspecter l'état de surface de la pièce. Si le nettoyage des pièces n'est pas réussi, les opérations de soudage et de brazing s'avèrent difficiles, voire même parfois impossibles. L'expérience a démontré que la projection de particules abrasives sur la surface des pièces permet une inspection plus précise des fissures. [20, 21]

4.2.1. Nettoyage par ultrasons (Ultrasonic Cleaning)

Le nettoyage par ultrasons est l'élimination rapide et complète des contaminants des pièces qui sont immergées dans un réservoir de liquide, inondé de vagues de sons à haute fréquence. Ces ondes sonores non audibles créent une action de frottement douce dans le fluide, éliminant les contaminants de toutes les surfaces avec lesquelles le fluide entre en contact.

Le processus est provoqué par l'énergie électrique à haute fréquence qui est convertie par un transducteur en ondes sonores à haute fréquence - énergie ultrasonique.

L'énergie ultrasonique pénètre dans le liquide dans le réservoir ou le bain, ce qui provoque la formation rapide et l'effondrement de bulles minuscules ; un phénomène connu sous le nom de cavitation. Ces bulles se déplacent à grande vitesse dans le réservoir, ce qui les fait imploser contre la surface de tout objet immergé avec une énorme libération d'énergie. Au fur et à mesure que les bulles explosent et que la cavitation se produit, la solution nettoyante pénètre dans l'espace laissé par les bulles, créant une légère action de frottement sur la surface avec laquelle elle entre en contact et soulevant délicatement les contaminants et la saleté de la surface.

De nombreuses variables doivent être prises en compte lors du nettoyage des pièces. La chaleur, la puissance, la fréquence, le type de détergent et le temps affectent tout le processus de nettoyage.



Figure 4-10 Bac à ultrasons

4.2.2. Nettoyage à la vapeur sèche (Steam Cleaning)

Le nettoyage par vapeur sèche consiste à pulvériser sur les pièces de la vapeur d'eau, dite « sèche », à une température de 140 °C et une pression de 8 bars. La rapidité du séchage permet de considérer ce procédé comme sec.

Avec cette technique, la variable à maîtriser est l'eau. Plus la vapeur en contient, moins elle est intéressante d'un point de vue énergétique, car elle transporte et cède moins de chaleur qu'une vapeur dite « sèche ». Ce procédé produit un nettoyage efficace sur les surfaces planes comme les formes complexes, consomme très peu d'eau et est utilisable in situ, même lorsque l'on dispose de peu d'espace. La vapeur utilisée, contenant moins de 5 % d'eau ne renferme pas de produit chimique dangereux. Le pouvoir solvant de la vapeur sèche peut être amélioré par l'ajout d'un détergent dans l'eau, dans des proportions très faibles.

4.2.3. Nettoyage par sablage

Le sablage est une technique industrielle de nettoyage de surfaces utilisant un abrasif projeté à très grande vitesse, au travers d'une buse, à l'aide d'air comprimé. L'objectif principal de cette

technique est le décapage de la surface du matériau. Il existe deux types de sablages effectués au sein de l'atelier d'Algesco :

➤ Sablage à l'oxyde d'Aluminium / Corindon :

Le corindon est un abrasif très résistant qui permet l'élimination totale des traces d'oxydation ou de peinture sur des pièces. C'est un minéral entièrement naturel caractérisé par une haute teneur en titane. Il a la faculté d'être extrêmement dur, lui conférant des qualités décapantes appréciées lors d'un aérogommage sur une surface tenace. Le sablage à l'oxyde d'Aluminium présente plusieurs avantages, dont un bon rapport qualité/ prix. [22]

La projection de corindon permet de préparer les surfaces pour les rendre propres, homogènes et rugueuses. La résistance de ses grains à l'impact, lui donne une efficacité remarquable et génère beaucoup moins de poussières. Il ternit la surface et laisse une rugosité plus ou moins grande selon la granulométrie utilisée. Par ailleurs, les particules de sable ne s'oxydent pas contrairement au grenailage.

➤ Sablage au Carbure de Silicium :

Le carbure de silicium est le seul composé chimique constitué de carbone et de silicium. Il est fabriqué en combinant du sable de silice avec du carbone par réaction électrochimique à haute température dans un four à résistance électrique. Ce matériau a été développé en une céramique technique de haute qualité avec de très bonnes propriétés mécaniques. Il s'agit d'un excellent abrasif, chimiquement inerte qui est aussi plus dur que n'importe quelle alumine, ce qui en fait un média idéal pour attaquer les surfaces à traiter rapidement.

Il est ainsi préconisé pour le nettoyage, le dépolissage, la suppression des traces de corrosion et des dépôts de surface des matériaux les plus durs.

Le carbure de silicium est un abrasif de haute qualité qui est utilisé là où aucune contamination ferreuse ne peut être tolérée. Il est idéal pour le sablage de l'acier inoxydable, le titane, le verre de cristal au plomb, et les autres matières où la propreté de la surface est impérative. [23]

Le processus d'inspection des segments de directrices comprend également une étape importante : le traitement thermique de mise en solution. Ce traitement thermique est effectué dans le four sous vide et a pour objectif la relaxation des contraintes et l'homogénéisation de la microstructure de l'alliage. [7]

4.4. Processus de réparation des segments

4.3.1. Soudage GTAW (TIG)

Le soudage est un processus d'assemblage dans lequel les composants métalliques sont assemblés par fusion (fusion) ou recristallisation du métal de base et du métal d'apport, par application de chaleur, pression ou les deux. Ce processus diffère du brazing, où seul le métal d'apport fond au cours du traitement. Le soudage est utilisé de façon générale en cas de fissures ou de manque de matière dans les pièces de turbines. La restauration des segments se fait le plus souvent par soudage. [24]

Le GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) ou TIG (Tungsten Arc Welding) est la méthode de soudage la plus utilisée dans la réparation.

Un arc électrique qui produit la chaleur nécessaire au soudage est maintenu entre une électrode non consommable de Tungsten et la pièce à souder. La zone affectée thermiquement, le métal fondu et l'électrode de Tungsten sont protégés de l'atmosphère par un gaz inerte fourni par la torche de soudage. Le gaz de protection est chimiquement inerte et ne réagit pas avec d'autres gaz, il est transparent et inodore, permettant au soudeur une visibilité maximale de l'arc. Ce gaz a pour rôle de protéger la soudure des particules présentes dans l'atmosphère environnante. [9] L'avantage dominant du soudage GTAW est qu'il permet de souder plus de métaux et d'alliages que tout autre type de soudage à l'arc électrique. Il permet de souder la plupart des aciers, y compris les aciers inoxydables ainsi que les superalliages et permet également de souder des matériaux différents tels que le cuivre et le laiton. [11]

4.3.2. Procédé « Renew Alloy Brazing »

- Définition :

Le « Renew Alloy » est un procédé qui produit une liaison métallurgique entre les métaux en utilisant un métal d'apport avec une température de fusion (liquidus) supérieure à 450 ° C (840 ° F), mais inférieure à la température de fusion du métal de base. Les métaux d'apport sont généralement des alliages d'argent (Ag), d'aluminium (Al), d'or (Cu), de cobalt (Co) ou de nickel (Ni). L'application du Renew Alloy est suivie d'un cycle de brazing dans un four sous vide, à une température strictement inférieure au solidus du métal de base. [25]

Le métal d'apport « mouille » la surface, et s'infiltré dans les fissures par action capillaire. L'action capillaire est le phénomène qui assure la distribution du métal d'apport dans les fissures, c'est le mouvement d'un liquide le long d'une surface solide causé par l'attraction entre les molécules du liquide et celles du solide. Elle ne fonctionne correctement que lorsque les surfaces des métaux sont propres. Si elles sont « contaminées » par des graisses, des oxydes ou tout simplement des impuretés, les contaminants doivent obligatoirement être retirés car ils forment une barrière entre les surfaces métalliques de base et le métal d'apport.

Ainsi, une bonne préparation de la surface s'impose avant de procéder à l'application du Renew Alloy. La rugosité de surface est également un paramètre important. Cette rugosité agrandit la surface et augmente le nombre de voies capillaires pour le métal d'apport.

Parmi les techniques utilisées pour préparer la surface des segments :

- Le sablage :

Le sablage au corindon (oxyde d'Aluminium) est déconseillé du fait que les particules d'oxydes peuvent s'incruster dans le matériau et former une couche d'oxyde qui constitue une contamination de la surface.

Par ailleurs, le sablage au carbure de Silicium représente une bonne méthode de nettoyage des pièces et ne constitue aucun obstacle à l'opération de brazing.

- Le nettoyage à l'hydrogène :

Cette opération s'effectue dans un four sous vide.

Un four sous vide est un outil de traitement thermique important.

Le chauffage électrique peut être réglé avec précision pour obtenir des taux de chauffage précis et permettre de contrôler la température à quelques degrés près pendant les périodes d'attente.

Le refroidissement est effectué en injectant du gaz inerte dans le four puis en le faisant circuler à travers un échangeur de chaleur. En raison du coût et de la disponibilité, l'Argon est le gaz inerte le plus communément utilisé pour cette opération. Ce four permet des vitesses de refroidissement extrêmement rapides, qui sont contrôlées en faisant varier la pression du gaz. L'atmosphère pure peut nettoyer les pièces pendant le traitement thermique à travers la décomposition et la vaporisation des contaminants.

Généralement, les fours sous vide sont utilisés pour des traitements thermiques dont la température dépasse 1000°C. [25, 27]

Si le sablage demeure le moyen le plus efficace pour le nettoyage de la surface des pièces, il ne permet pas un nettoyage en profondeur des surfaces internes des fissures. Les fissures dues à la fatigue thermique possèdent une couche d'oxydes à la surface des parois internes, qui sont difficilement accessibles pendant l'opération de sablage. C'est la raison pour laquelle le nettoyage à l'Hydrogène ou « Hydrogen Cleaning » est effectué. C'est un traitement thermique au cours duquel l'Hydrogène transforme les oxydes en métal + eau. [21]

Le processus de nettoyage à l'hydrogène réduit efficacement les oxydes à l'intérieur des fissures dans les superalliages à base de Cobalt. C'est une opération nécessaire à effectuer avant l'application de la pâte de brazing.

Le processus de nettoyage à l'hydrogène est le suivant :

- Les segments sont chargés dans le four sous vide ;
- Chauffage jusqu'à 1200°C environ, suivi d'un maintien pendant plusieurs heures ;
- Pendant ce maintien, du dihydrogène est propulsé dans le four sous vide, suivant plusieurs cycles, pendant des durées déterminées et suivant des fluctuations de pression. Chaque cycle sert à éliminer une couche d'oxydes encore plus importante.
- Le mécanisme d'élimination des oxydes est tel que le dihydrogène s'allie à l'oxygène présent dans les oxydes et forme de la vapeur d'eau.
- Ces nombreux cycles d'injection d'Hydrogène sont ensuite suivis d'un refroidissement à l'Argon.

La durée totale du cycle de nettoyage à l'Hydrogène est comprise entre 8 et 12 heures. [11]

Les oxydes présents dans les fissures sont donc considérablement réduits dans cet atmosphère d'hydrogène, comme nous pouvons le constater dans les images suivantes :

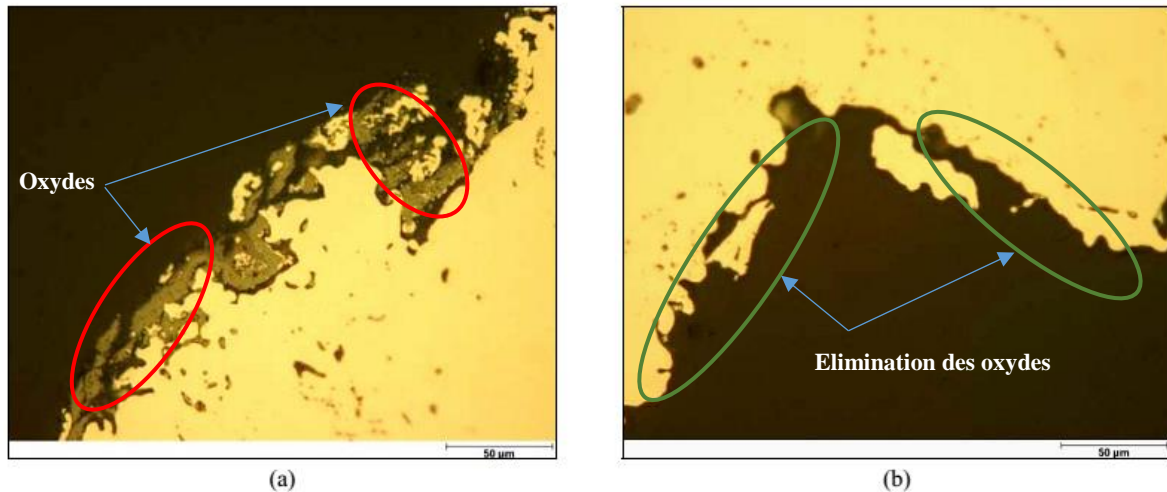


Figure 4-11 (a) oxydes de chrome à la surface de la fissure, (b) Réduction des oxydes sur les parois internes de la fissure après le cycle de nettoyage à l'hydrogène [27]

Généralement, environ 80% des oxydes présents sur les surfaces des parois internes des fissures sont éliminés. [11]

L'objectif de ce processus est d'exposer le métal de base afin de permettre à la pâte 'Renew Alloy Brazing' d'y adhérer. Une fois que les pièces sont parfaitement propres, il est important de procéder à l'opération de brazing le plus vite possible, de sorte à éviter une recontamination.

- Explication du procédé « Renew Alloy Brazing » :

Le RenewAlloy (brazing) est un procédé exclusif de General Electric qui utilise un mélange de poudres métalliques, utilisées sous diverses formes, pour réparer les fissures jusqu'à **1,5 mm** de largeur et restaurer les dimensions de la surface des composants de la turbine. Les alliages en poudre sont choisis en fonction des besoins de performance et de la compatibilité avec le métal de base.

Les alliages utilisés pour le brazing ont généralement une composition similaire au matériau de base mais avec de meilleures propriétés de diffusion, permettant un résultat homogène après le traitement thermique. [28]

Les produits qui peuvent être utilisés pour les opérations de Renew Alloy (brazing) sont, selon le type d'endommagement et l'emplacement de celui-ci dans le segment :

La pâte Renew Alloy :

La pâte Renew Alloy, également appelée « slurry », est constituée d'une poudre d'alliage spécifique qui doit être mélangée avec un gel liant neutre pour créer une pâte épaisse, à appliquer sur les fissures à l'aide d'une seringue. Le dosage poudre métallique/ gel liant est un paramètre d'une grande importance car plus la quantité de gel liant est grande, plus la porosité sera importante, ce qui amoindri la qualité de la réparation.

Les principaux types de fissures réparés à l'aide de la pâte Renew Alloy sont les suivants :

- ➔ Wide crack : toute fissure ayant une largeur supérieure à 0,5 mm ;
- ➔ Narrow crack : toute fissure ayant une largeur inférieure ou égale à 0,5 mm ;
- ➔ Craze crack : « Craze cracks » est le nom donné à des zones qui contiennent un réseau de nombreuses microfissures résultantes des contraintes thermiques et qui sont sujettes à un phénomène de corrosion.

Ces microfissures sont étroites et peu profondes (largeur inférieure à 0.1 mm environ),

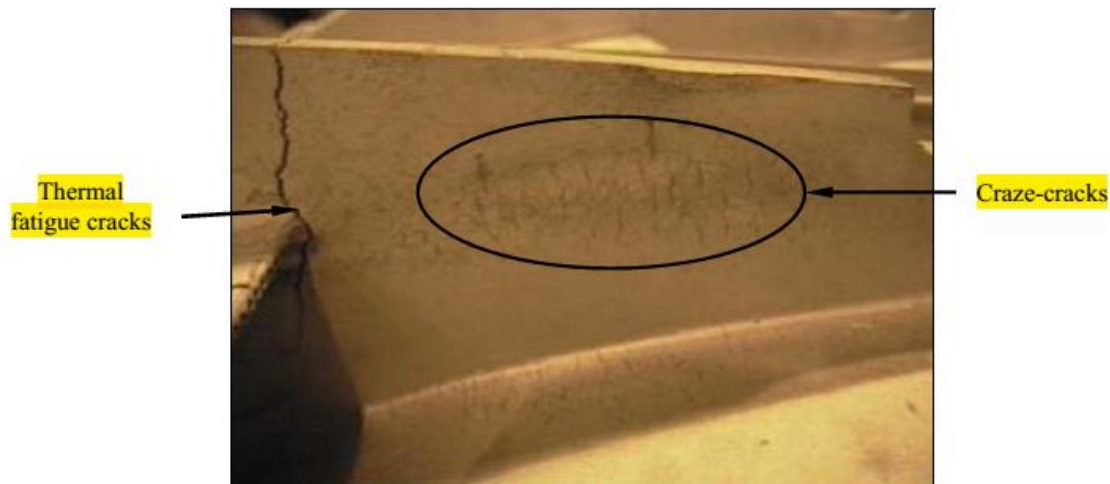


Figure 4-12 Exemple de microfissures (craze cracks), et d'une grande fissure due à la fatigue thermique dans un segment premier étage [27]

Les matériaux métalliques d'apport sont disponibles en poudre, pâte, ruban ou préformes. Dans le cas du brazing Renew Alloy, les poudres métalliques suivantes sont utilisées pour la préparation de la pâte de brazing :

- MarM509 : c'est un superalliage de cobalt avec une excellente combinaison de propriétés mécaniques, y compris une résistance élevée à la traction, une résistance à la rupture et au fluage.
- MarM509B est également un alliage de brazing à base de Co avec une composition chimique nominale pratiquement identique à celle de MarM509, avec 2,5% en poids de B ajouté comme abaisseur de point de fusion.
Les documents de certification de l'alliage de brazing MarM509B attribuent à l'alliage une température de solidus de 1121C et une température de liquidus de 1160C.
- Amdry MM509B-C ou Amdry MM509B-F peuvent être utilisés comme alliages de brazing par diffusion activés. Ils peuvent être mélangés avec Amdry MM509, Amdry MM509-C ou d'autres matériaux de matrice de superalliage Amdry. [28]

Les compositions chimiques de MarM509 et MarM509B sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau 4-1 Composition chimique des poudres utilisées dans le procédé "Renew Alloy Brazing" [28]

	Amdry MM509	Amdry MM509-C	Amdry MM509 B-C	Amdry MM509 B-F
--	-------------	---------------	-----------------	-----------------

Co	Balance	Balance	Balance	Balance
Cr	22.5 – 24.25	22.5 – 24.25	22.5 – 24.25	22.5 – 24.25
Ni	9.0 – 11.0	9.0 – 11.0	9.0 – 11.0	9.0 – 11.0
W	6.5 – 7.5	6.5 – 7.5	6.5 – 7.5	6.5 – 7.5
Ta	3.0 – 4.0	3.0 – 4.0	3.0 – 4.0	3.0 – 4.0
B	-	-	2.0 – 3.0	2.0 – 3.0
Ti	0.15 – 0.30	0.15 – 0.30	0.15 – 0.30	0.15 – 0.30
Zr	0.30 – 0.60	0.30 – 0.60	0.30 – 0.60	0.30 – 0.60
C	0.55 – 0.65	0.55 – 0.65	0.55 – 0.65	0.55 – 0.65

- Les feuilles de brazing ou « braze foil » :

Il s'agit d'un matériau flexible qui ne contient pas de liant et dont l'épaisseur ne dépasse pas 0.06mm. Si une épaisseur plus grande est requise, plusieurs feuilles peuvent être superposées. Ce sont des feuilles métalliques flexibles qui peuvent être découpées selon la forme recherchée.

Le métal d'apport Renew Alloy à utiliser doit répondre à plusieurs critères :

- Compatibilité métallurgique avec le métal de base ;
- Propriétés mécaniques ;
- Conditions d'utilisation des pièces sujettes au brazing ;
- Coût.

▪ Le traitement thermique « Renew Alloy Brazing » :

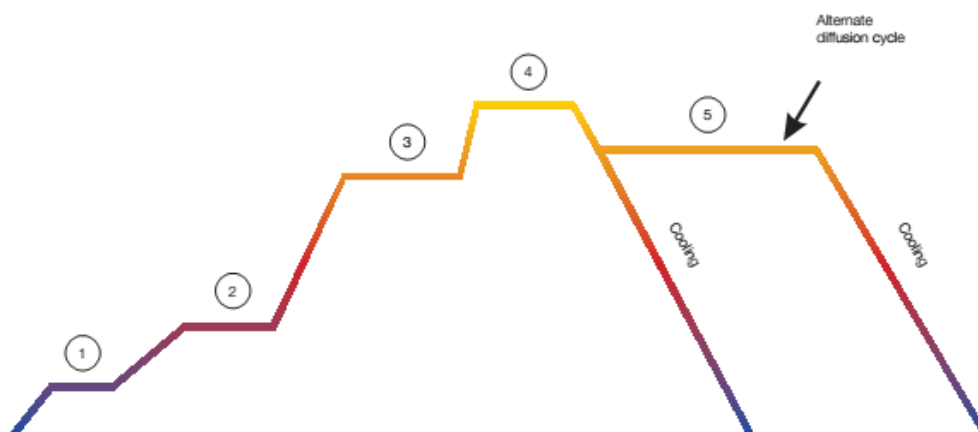


Figure 4-13 Cycle typique d'un traitement thermique « Renew Alloy Brazing » [25]

Le cycle de traitement thermique de brazing se fait dans un four sous vide. Il s'agit d'un four chauffé électriquement et qui chauffe le métal d'apport de brazing à l'état liquidus de sorte à obtenir un écoulement et une attraction capillaire. Pour permettre que l'opération s'effectue

normalement dans le cas des alliages sensibles à l'oxydation à haute température, le four est équipé d'un système de pompage qui élimine l'oxygène. [24]

Cycle de chauffage et de refroidissement typique pour traitement thermique de brazing :

- Faire le vide dans le four jusqu'à une pression de 5×10^{-4} torr ou moins.
- 1^{er} maintien : entre 150 et 260 °C pendant 10 à 15 minutes. Ce temps de maintien permet aux solvants, liants, ou eau, présents dans la pâte de brazing d'être évacués par évaporation, et par conséquent, d'éviter la formation de bulles dans le métal d'apport.
- 2^{ème} maintien : à environ 540°C pendant 10 à 15 minutes. Ce temps de maintien permet aux matières organiques non liquides de devenir gazeuses et d'être évacuées à travers le système de pompage et permet au four de retrouver une atmosphère de qualité.
- 3^{ème} maintien : entre 10 et 38°C en dessus du solidus du métal d'apport. Maintenir une température stable pendant un minimum de 10 minutes.
- Chauffage : élever la température le plus vite possible (sans compromettre les propriétés métallurgiques ou l'état des pièces) jusqu'à la température de brazing.
- 4^{ème} maintien : Généralement, un maintien de 0 à 60 minutes à la température de brazing est suffisant pour permettre à l'alliage du métal d'apport de fondre et de s'infiltrer dans les fissures.
- Refroidissement : Réduire progressivement la température du four pour permettre à l'alliage liquide de se solidifier. Begin to quench below the solidus temperature of the braze alloy.
- 5^{ème} maintien : Un maintien de deux à quatre heures entre 1065 et 1150 ° C (1950 à 2100 ° F) permettra au bore de diffuser et augmenter la température de refusion de l'alliage de brazing.
- Refroidissement : choisir la vitesse de refroidissement selon propriétés recherchées. [26, 28]

Le Renew Alloy Brazing permet un gain de temps et par conséquent une plus grande productivité ainsi qu'une minimisation voire une élimination de la distorsion des composants.

4.5. Conclusion

Nous venons de présenter les différents types d'endommagement que l'on peut retrouver sur des segments de directrice premier étage ainsi que le processus d'inspection et de préparation des pièces, pour les admettre en réparation et les restaurer suivant les différents procédés dont dispose ALGESCO. Chaque étape d'inspection et de nettoyage des pièces est très importante, et doit être conduite avec précaution pour permettre une bonne réparation.

CHAPITRE 5 : Diagnostic et propositions

5.1. Introduction

Toutes les pièces qui sont envoyées à Algesco sont soumises, tout d'abord, à la procédure d'inspection, qui a pour objectif de faire une vérification complète et minutieuse des pièces, pour décider, au final, de la nécessité d'une réparation selon le niveau d'endommagement constaté, et si tel est le cas, de la réparabilité des pièces. Les pièces qui ont subi un endommagement important, ne peuvent parfois pas être réparées et peuvent être remplacées par des pièces neuves. Le rapport d'inspection est alors préparé par les ingénieurs, et envoyé au client qui doit donner son accord pour procéder à la réparation.

5.2. Diagnostic et hypothèses

Le processus d'inspection et de réparation des segments de directrices de turbines comprend plusieurs étapes, du contrôle dimensionnel au soudage ou au brazing en passant par le nettoyage des pièces et le traitement thermique de mise de solution.

Ce processus nécessite quelques améliorations en raison des problèmes rencontrés lors de l'exécution des différentes étapes. Nous avons, de ce fait, suivi le déroulement des étapes selon la méthode de travail déjà existante et établi un diagnostic. Nous nous sommes penchés sur les deux obstacles majeurs dans le processus d'inspection des segments de turbines qui influent directement sur l'exécution et la qualité de la réparation :

- **Couche d'oxyde** persistante sur les segments après nettoyage :

Le nettoyage selon la méthode de travail utilisée dans l'atelier consiste à effectuer un nettoyage aux ultrasons utilisant un détergent spécifique, un traitement thermique de mise en solution, sous vide, qui conduit à la coloration, en vert, de la couche d'oxyde présente en surface. Un cycle d'hydrogène cleaning est alors effectué, mais ne donne pas de résultats satisfaisants quant à l'élimination de la couche de contaminations présente à la surface des pièces. Cette contamination représente un obstacle à la réparation par brazing notamment qui ne tolère aucune impureté, qui risquerait d'empêcher l'adhérence du métal d'apport au le métal de base, et par conséquent, de compromettre la réparation.



Figure 5-1 Couche d'oxyde sur un segment de directrice 1er étage

- Fusion du matériau des core plug après l'opération de traitement thermique de mise en solution qui suit le sablage.



Figure 5-2 Fusion des « core plug » des segments après traitement thermique (Directrice modèle 9001)

Ainsi, après observation et suivi des étapes de l'inspection, nous avons procédé à des recherches et à des expériences concernant les deux problématiques sus-citées.

5.3. Démarche expérimentale et résultats

Les deux expériences suivantes ont été conduites afin de vérifier nos hypothèses à propos des deux problématiques posées :

- Expérience pour vérifier l'influence des détergents utilisés lors du nettoyage à ultrasons sur le matériau des segments de turbines. Recherche d'une alternative efficace pour le nettoyage et la préparation de surface des segments de turbines.
- Expérience pour vérifier l'influence du sablage et des résidus de sables sur le matériau des core plug à haute température.

➤ **Expérience 1 :**

Afin de vérifier l'influence des détergents utilisés dans l'atelier pour le nettoyage aux ultrasons, nous avons effectué une série d'expériences. 2 types de détergents différents étaient disponibles.

Dans ce cas, des segments de directrice PGT10 (« Small frames ») ont été utilisés, pour des raisons de disponibilité des pièces au niveau de l'atelier. Ces segments sont constitués du même matériau que les segments des « large frames ».

Tous les essais sont effectués dans un dispositif de nettoyage à ultrasons à une fréquence de 40KHz, et pendant une durée de 50 minutes en moyenne.

- **Essai 1 :**

Nettoyage des segments dans le bac à ultrasons contenant de l'eau déminéralisée uniquement. Le nettoyage est suivi du traitement thermique de mise en solution.



Figure 5-3 Segments dans le bac à ultrasons



Figure 5-4 : Segment *avant* nettoyage aux ultrasons



Figure 5-5 : Segment *après* nettoyage aux ultrasons

- Essai 2 :

Nettoyage des segments dans le bac à ultrasons contenant de l'eau déminéralisée et la quantité nécessaire du détergent Turco. Le nettoyage est suivi d'un rinçage des segments et du traitement thermique de mise en solution.



Figure 5-6 Dérroulement de l'expérience



Figure 5-7 : Segment **avant** nettoyage aux ultrasons



Figure 5-8 : Segment **après** nettoyage aux ultrasons

- Essai 3 :

Nettoyage des segments dans le bac à ultrasons contenant de l'eau déminéralisée et le dosage adéquat du détergent Microson qui se distingue par une couleur verte. Le nettoyage est suivi d'un rinçage des segments à l'eau, et du traitement thermique de mise en solution.



Figure 5-9 Détergent utilisé (de couleur verte)

- Essai 4 :

Les deux essais précédents ont également été effectués sans rincer les pièces après l'opération de nettoyage aux ultrasons.



Figure 5-10 : Segment *avant* nettoyage aux ultrasons



Figure 5-11 : Segment *après* nettoyage aux ultrasons

A la fin de ces expériences, les segments sont introduits dans le four sous vide pour subir un cycle de traitement thermique de mise en solution.

Observations et résultats :

-Après le cycle de traitement thermique, les résultats suivants sont observés :





Figure 5-12 Etat de surface des segments *après* le traitement thermique

On observe une couche d'oxyde présente sur la surface des segments ainsi qu'une coloration verte de la surface. Les résultats sont identiques pour tous les essais, quel que soit la nature du détergent utilisé pour le nettoyage aux ultrasons. Le détergent n'a donc aucune influence sur le comportement des segments pendant le traitement thermique.

Le traitement thermique est effectué sous vide. La température est donc le facteur qui influe sur la couche d'oxyde présente à la surface et qui entraîne sa coloration.

➤ **Expérience 2 :**

Durant cette expérience, nous avons cherché à comprendre la cause de la fusion des « core plug » durant le traitement thermique. Le processus de sablage qui précède le traitement thermique a été soupçonné. Nous avons donc conduit des expériences sur plusieurs « core plugs » (extraits des segments), en effectuant 2 techniques de sablages différentes, en laissant des résidus de chaque type de sable à l'intérieur des core plug.

Pour cet essai, les échantillons suivants ont été utilisés :

- Un « core plug » témoin qui n'a subi aucune opération de sablage. (1)
- Un « core plug » sablé au corindon (oxyde d'Aluminium) (2)
- Un « core plug » sablé au carbure de Silicium (3)



1



2

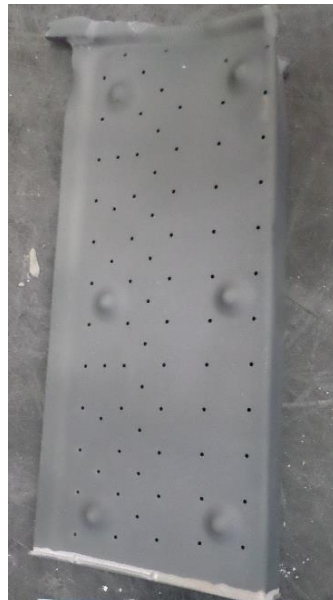


3

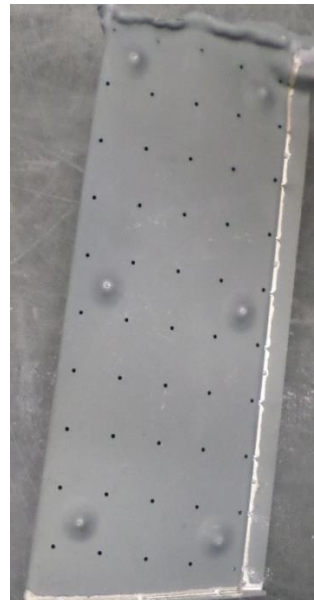
Figure 5-13 « core plug » utilisés pour l'expérience, (1) core plug témoin, (2) core plug sablé à l'oxyde d'Aluminium, (3) core plug sablé au carbure de Silicium.

Ces 'core plug' ont été introduits dans le four sous vide afin de subir un traitement thermique (cycle d'Hydrogen Cleaning) sous vide. A la sortie du four, l'observation visuelle a démontré que :

- Les deux 'core plug' (1 et 2) sont restés intacts :



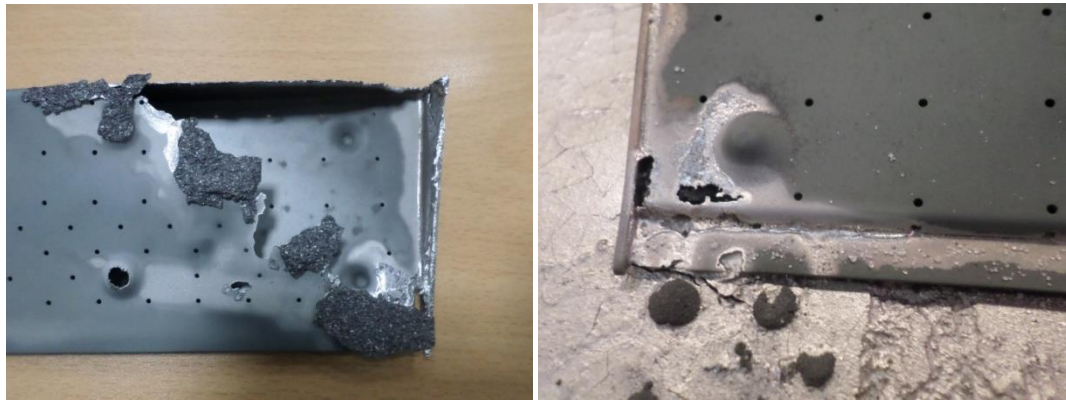
1



2

Figure 5-14 "Core plug" 1 et 3 après le traitement thermique

- Le troisième 'core plug' (3), qui a été sablé au carbure de silicium présente des zones entièrement fondues.



**Résidus de sable
(carbure de
silicium)**



Figure 5-15 "Core plug" présentant plusieurs zones fondues après le traitement thermique

L'expérience a été reproduite plusieurs fois, et avec plusieurs types de traitements thermiques, et également sans résidus de sable les résultats observés étaient identiques. Le sablage au carbure de silicium est donc responsable de la fusion des 'core plug'.

5.4. Interprétation des résultats et conclusions

Les résultats obtenus nous permettent de conclure que :

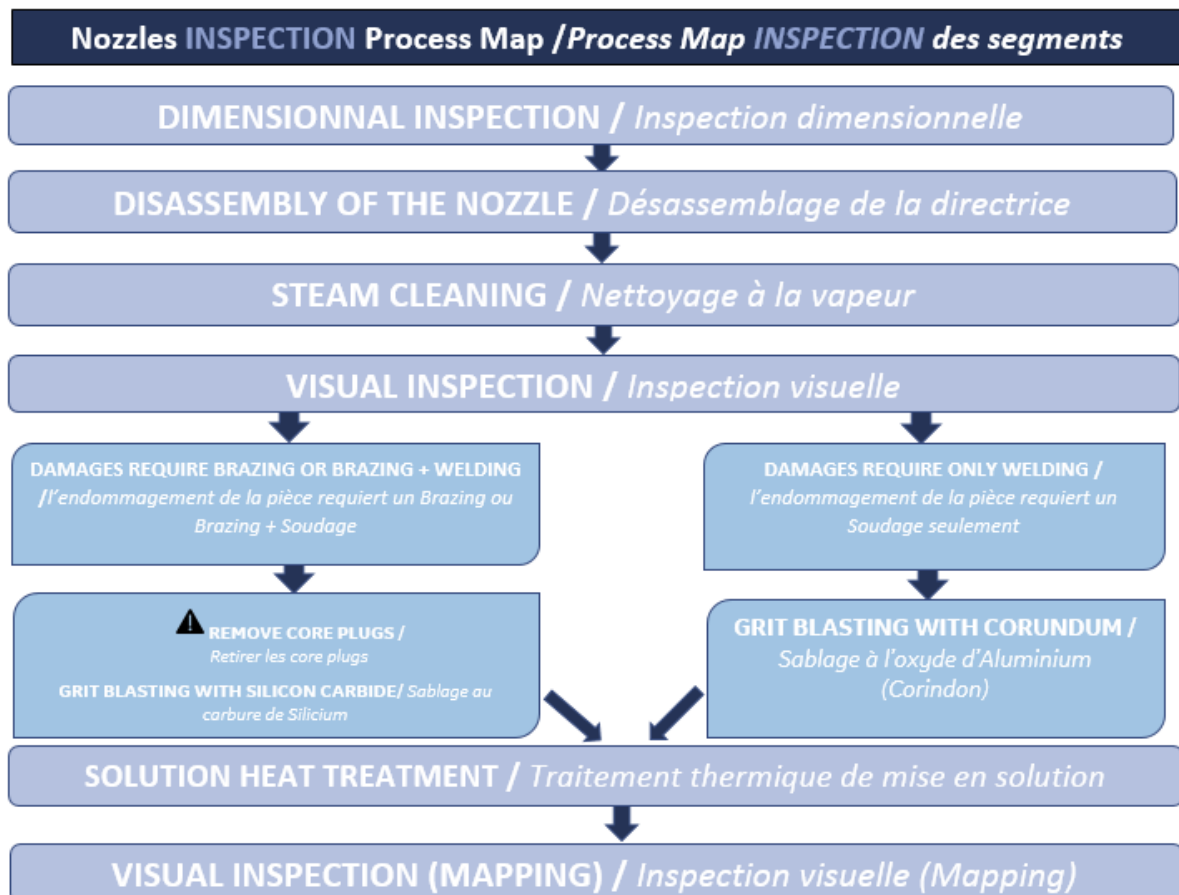
- Le détergent utilisé dans le bac à ultrasons n'a aucune influence sur la coloration de la surface oxydée lors du traitement thermique. Les deux détergents peuvent être utilisés aussi bien l'un que l'autre, en veillant à respecter le dosage conseillé.
- Le nettoyage des segments aux ultrasons permet une élimination complète des graisses et des impuretés légères qui se trouvent à la surface de la pièce. Cependant, cette technique de nettoyage n'est pas efficace quant à l'élimination de la couche d'oxydes présente à la surface.
- Une autre alternative de nettoyage des surfaces telle que le sablage, qui est la méthode la plus efficace pour éliminer toutes sortes de contaminations de la surface des pièces, doit être mise en place afin d'obtenir un état de surface optimal. [22]

- Le sablage à l'oxyde d'Aluminium n'influe aucunement sur l'acier inoxydable à haute température. Le « core plug » n'a subi aucune déformation suite au traitement thermique.
- Le sablage au carbure de silicium est responsable de la fusion du matériau des « core plug » (acier inoxydable 321). Ce phénomène s'explique par le fait que, lors du sablage, les particules de carbure de silicium propulsées sur la surface s'incrusteront dans le métal pour former, par diffusion à haute température (environ 1200°C) avec le fer, des ferro-silicium qui abaissent la température de fusion de l'acier inoxydable. La présence de résidus de sable (carbure de silicium) peut aggraver la situation et entraîner une fusion encore plus importante du métal.

5.5. Propositions d'amélioration et recommandations

Suite aux observations des résultats des expériences et des interprétations de celles-ci, nous avons émis une proposition d'amélioration, et suggéré une nouvelle méthode de travail pour l'étape d'inspection de segments de directrices premier étage.

Les étapes à suivre pour un bon déroulement de l'étape d'inspection et une bonne préparation de la surface pour l'étape de réparation sont détaillées dans le « Process Map » suivant :



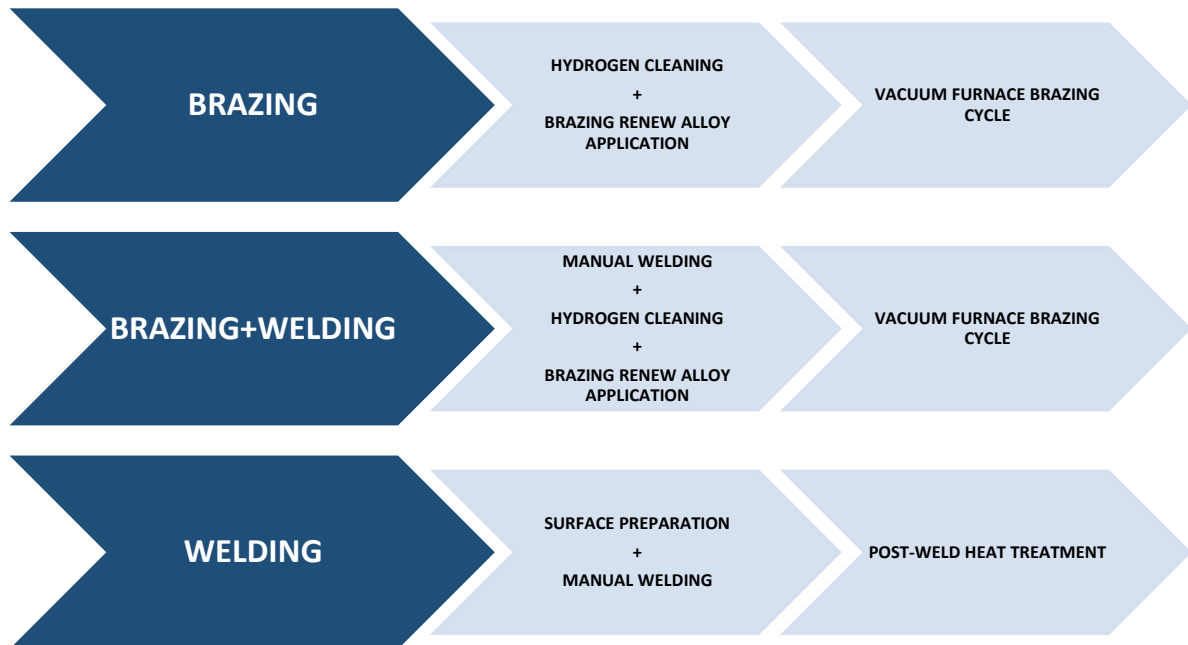
Le processus commence donc par une inspection dimensionnelle suivie du désassemblage de la directrice, comme le stipulent les instructions de travail GE. Le nettoyage des segments s'effectue ensuite à la vapeur. Le nettoyage à la vapeur (steam cleaning) a été choisi afin de remplacer le nettoyage aux ultrasons, car l'expérience a démontré que ce procédé donne de bons résultats (dégraissage & élimination des impuretés), en beaucoup moins de temps (environ 2h pour le « steam cleaning » contre 10h pour le nettoyage aux ultrasons). Cette étape de nettoyage permet une bonne inspection de la pièce et des endommagements qu'elle présente. Ainsi, la suite de l'inspection dépendra des résultats de l'observation visuelle de l'état de la pièce et des types d'endommagement constatés. Les décisions suivantes sont prises par l'équipe d'ingénieurs :

- Si les dégradations observées sur les segments peuvent être réparées par soudage ou par soudage et Renew Alloy Brazing, les « core plug » doivent alors être retirés et les segments doivent être sablés au Carbure de Silicium.
- Par ailleurs, si l'endommagement de la pièce requiert une réparation par soudage, le segment doit être sablé au corindon (oxyde d'Aluminium) et il n'y a pas nécessité de retirer les « core plug ».

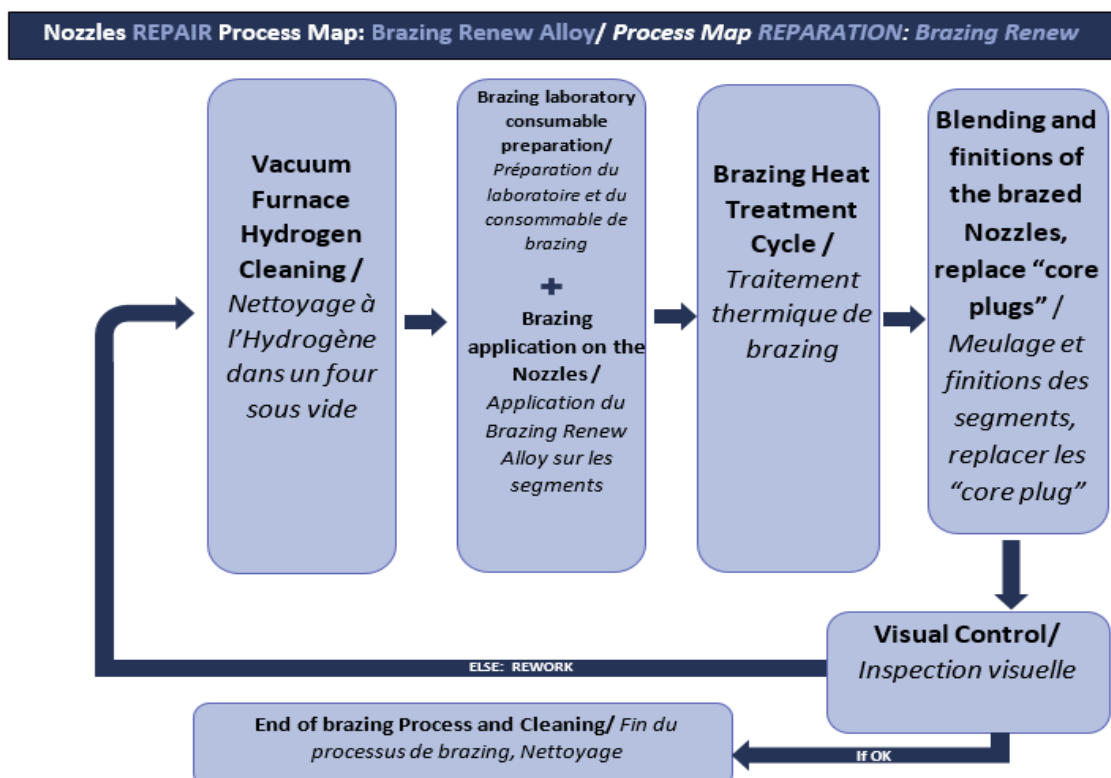
Ces opérations sont suivies d'un traitement thermique de mise en solution, impératif avant l'inspection visuelle finale, qui permet de repérer toutes les zones endommagées du segment et de les marquer en précisant le type de dégradation (par exemple : fissures, érosion, déformation, etc.)

Explication du processus de réparation :

La surface obtenue à la fin de l'inspection est propice à la réparation et représente aucune entrave à ce processus. Les différents moyens de réparation possibles sont :



En particulier, la réparation par brazing s'effectue selon les étapes suivantes :



Le processus de réparation par Renew Alloy Brazing des segments de directrice premier étage se déroule comme suit :

- Les segments sont tout d'abord introduits dans le four sous vide pour un cycle de nettoyage à l'Hydrogène ;

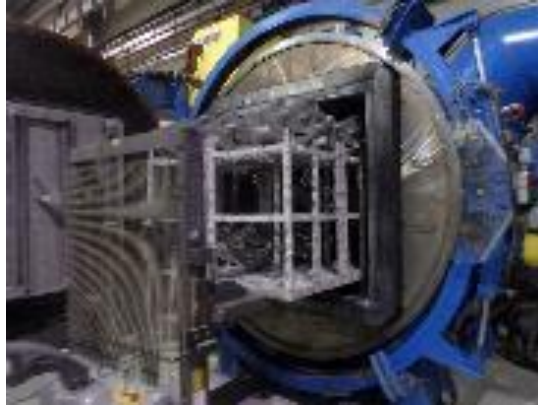


Figure 5-16 Four sous vide

- Le laboratoire de Renew Alloy Brazing ainsi que le matériel et les matériaux nécessaires à l'opération de réparation doivent être préparés ;



Figure 5-17 Préparation de la pâte "Renew Alloy"



Figure 5-18 Seringue utilisée pour l'application de la pâte "Renew Alloy"

- La pâte de Renew Alloy Brazing est alors appliquée sur les fissures des segments.

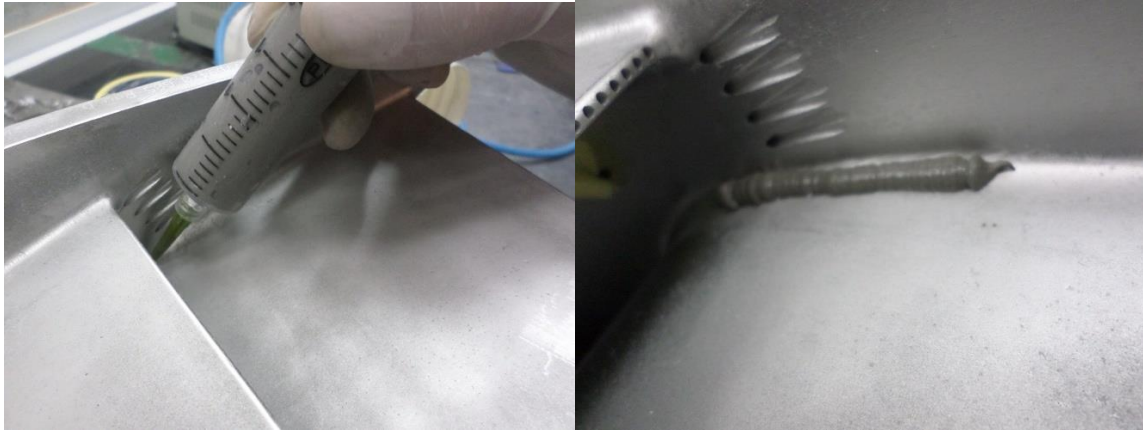


Figure 5-19 Application de la pâte "Renew Alloy"

- Le « stop-off » est appliqué à l'intérieur des trous de refroidissement et tout autour des zones où la pâte a été appliquée. Il s'agit d'une mousse, qui s'effrite à la suite du traitement thermique, et dont la fonction est d'empêcher la pâte de brazing d'obstruer les trous de refroidissement, ainsi que de délimiter les zones qui doivent contenir la pâte de brazing afin que celle-ci ne se disperse pas durant le traitement thermique qui suit cette étape.

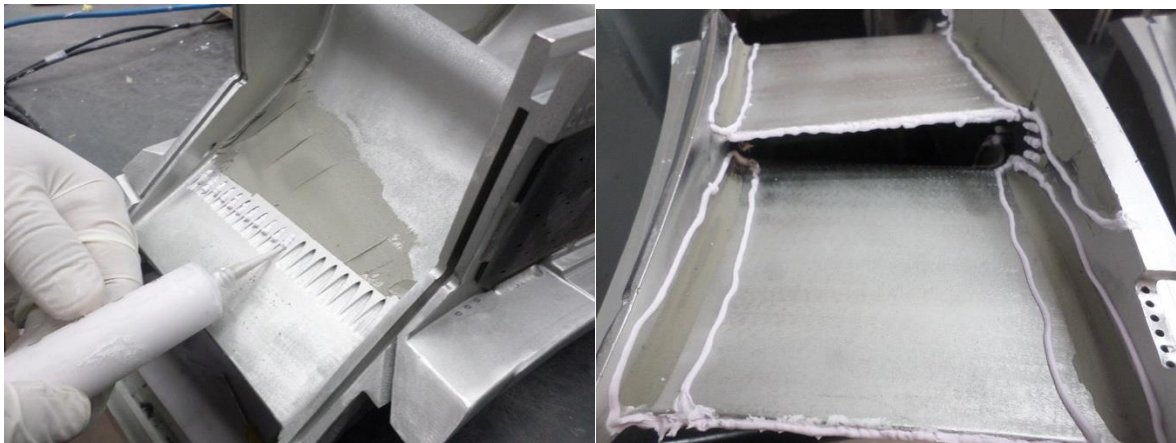


Figure 5-20 Application du "stop off"

- Un cycle de traitement thermique de Renew Alloy Brazing, sous vide est effectué.
- Les finitions, la remise en place des core plug, ainsi que l'inspection visuelle, constituent l'étape finale de ce processus.
- A l'issue de l'inspection visuelle, si le résultat de la réparation est satisfaisant, le rapport de réparation est établi, et les segments sont nettoyés et préparés pour être livrés au client. Par ailleurs, si des anomalies sont observées à la surface de la pièce, toutes les étapes de la procédure de réparation doivent être répétées

5.6. Conséquences économiques et avantages

L'étude comparative entre la méthode de travail actuelle et la méthode de travail proposée nous a permis d'établir le tableau suivant :

Tableau 5-1 Tableau comparatif entre le nombre d'heures de travail de la méthode actuelle et celui de la méthode de travail proposée

METHODE DE TRAVAIL ACTUELLE	Nbre d'heures de travail	METHODE DE TRAVAIL PROPOSÉE	Nbre d'heures de travail
1) Receive & unpacking/ Réception des pièces	2h	1) Receive & unpacking/ <i>Réception des pièces</i>	2h
2) Preliminary inspection/ <i>Inspection préliminaire</i>	6h	2) Preliminary inspection/ <i>Inspection préliminaire</i>	6h
3) Disassembly/ <i>Désassemblage</i>	10h	3) Disassembly/ <i>Désassemblage</i>	10h
4) Ultrasonic cleaning / <i>Nettoyage par ultrasons</i>	10h	4) Steam cleaning/ <i>Nettoyage à la vapeur</i>	3h
5) Solution Heat treatment/ <i>Traitement thermique de mise en solution</i>	14h	5) Visual inspection/ <i>Inspection visuelle</i>	8h
6) Hydrogen cleaning / <i>Nettoyage à l'hydrogène</i>	24h	6) Dimensional check / <i>Inspection dimensionnelle</i> Decide if the repair process will be brazing or brazing + welding or only welding/ <i>Décider de la méthode de réparation appropriée</i>	8h
7) Grit blast cleaning (SiC)/ <i>Sablage au SiC (carbure de silicium)</i>	9h	7) Grit blasting / <i>Sablage</i> ➤ SiC (brazing or brazing+welding) and core plugs removal/ <i>au SiC (cas du brazing ou brazing + soudage) et enlèvement des 'core plug'</i> OR/ OU ➤ Corundum (welding)/ <i>Corindon (cas du soudage)</i>	9h 0h-72h 9h
8) Visual inspection/ <i>Inspection visuelle</i>	8h	8) Solution Heat treatment/ <i>Traitement thermique de mise en solution</i>	14h
9) Dimensional check/ <i>Inspection dimensionnelle</i>	8h	9) Visual inspection/ <i>Inspection visuelle</i>	8h

10) Inspection report/ <i>Rapport d'inspection</i>	4h	10) Inspection report/ <i>Rapport d'inspection</i>	4h
During the beginning of repair : core plug melting after hydrogen cleaning process/ <i>Au début de la réparation, problème de la fusion des 'core plug' après le traitement d'hydrogène cleaning</i>	8h 72h	/	/
→ Core plug inspection/ Inspection des 'core plug'			
→ 'Core plug' removal/ Enlèvement des 'core plug'			
Nombre total d'heures éliminées	123 h	Nombre total d'heures ajoutées	Entre 28h et 100h

Le tableau ci dessus met en relief les différentes étapes à éliminer de la méthode de travail actuelle, et qui, combinées, représentent un nombre total de 123h de travail.

Tandis que la méthode de travail proposée permet une répartition d'un même lot de pièces suivant les différents procédés de réparation. Ce qui se traduit par une réduction du nombre d'heures de travail, comprise entre 23h et 95h selon les procédés.

Cette réduction du nombre d'heures de travail induit, pour l'entreprise, des conséquences économiques directes sur le processus d'inspection et de réparation des segments 1er étage. Soit une baisse non négligeable des coûts.

La méthode de travail actuelle présente beaucoup d'inconvénients qui génèrent principalement des heures de travail et des coûts additionnels. Nous présentons dans ce qui suit ces inconvénients ainsi que les avantages apportés par la méthode de travail proposée pour palier aux problèmes rencontrés lors du processus d'inspection et de réparation.

INCONVÉNIENTS DE LA METHODE DE TRAVAIL ACTUELLE

- Processus de nettoyage aux ultrasons très long ;
- Perte de temps durant toute la phase Inspection ;
- Cycle de nettoyage à l'hydrogène non approprié lors de la phase d'inspection et inefficace pour l'élimination des oxydes sur la surface de la pièce. Coûts importants engendrés ;
- Sablage au carbure de silicium de lots de pièces entiers sans distinction ;
- Fusion des 'core plug' ;
- Temps additionnel pour l'inspection de tous 'core plug' ;
- Remplacement des 'core plug fondus.

AVANTAGES DE LA METHODE DE TRAVAIL PROPOSÉE

- ✓ Réduction du temps de nettoyage à travers le 'Steam cleaning' / nettoyage à la vapeur ;
- ✓ Elimination du cycle de nettoyage à l'hydrogène au cours de l'inspection ;
- ✓ Elimination du problème de la fusion des 'core plug' ;
- ✓ Procédure de travail claire et détaillée, tenant compte de toutes les possibilités et permettant un gain de temps et d'argent

5.7.Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons expliqué la méthode d'inspection et de réparation actuelle des segments de directrice 1^{er} étage et les problématiques qui y sont liées, puis exposé la démarche qui nous a permis de proposer des solutions et d'établir les étapes d'une nouvelle méthode de travail afin d'optimiser le processus. Ces propositions ont pour principales conséquences une économie de temps et une baisse des coûts.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les turbines fonctionnent dans des conditions extrêmes de température et dans des environnements agressifs. Bien que les éléments qui les composent soient fabriqués en superalliages et possèdent d'excellentes propriétés, ils sont néanmoins sujets à une dégradation après un certain nombre d'heures de service.

Les directrices 1^{er} étage sont particulièrement affectées par ce phénomène d'endommagement car ce sont les premiers éléments à affronter les gaz chauds, à très haute pression, émanant des chambres de combustion. Cet endommagement peut se présenter sous plusieurs formes et les segments qui composent la directrice doivent être réparés ou remplacés, selon le degré de dégradation.

Le centre de service ALGESCO intervient afin de remettre en état ces composants. La procédure consiste à faire une inspection des pièces et fournir un rapport d'inspection puis procéder à la réparation et fournir un rapport de réparation au client.

Nous avons étudié les différentes étapes du processus d'inspection et de réparation des segments de directrice 1^{er} étage et identifié deux problématiques : ***la difficulté d'obtenir une surface propre sans résidus d'oxydes à l'issue de l'inspection et la fusion des 'core plug'***. ***À travers ce travail, nous avons étudié les causes de ces phénomènes et fourni des solutions adaptées.***

Nous avons proposé des améliorations au niveau des étapes à suivre lors de la phase d'inspection en préconisant un nettoyage à la vapeur sèche (steam cleaning), qui remplacera le nettoyage aux ultrasons. Il permet un dégraissage et un nettoyage superficiel efficace des segments en beaucoup moins de temps que le nettoyage par ultrasons (en moyenne deux heures pour le « steam cleaning » contre 10). Cette opération est suivie d'une inspection visuelle et dimensionnelle des segments, à l'issue de laquelle l'équipe d'ingénieurs en charge de ces composants décide de la méthode de réparation requise ('Renew Alloy Brazing' ou soudage seulement ou la combinaison des deux) pour chaque segment, selon l'état de la pièce et de type d'endommagement.

Le type de sablage à effectuer est alors choisi en fonction du type de réparation prévu. Dans le cas d'un sablage au carbure de silicium, les 'core plug' doivent être retirés des segments. L'opération de sablage est suivie d'un traitement thermique de mise en solution puis d'une dernière inspection avant d'établir le rapport d'inspection.

L'objectif de ce projet étant une optimisation du processus d'inspection et de réparation des segments de directrices premier étage, ***nous avons pris en considération les paramètres de temps et de coûts pour proposer une méthode de travail permettant une augmentation de la productivité, une réduction des coûts ainsi qu'une économie de temps et d'énergie.*** Le « process map » d'inspection des segments proposé met en évidence toute la démarche à suivre de façon claire, pour l'obtention d'une surface optimale et favorable à la réparation. Les processus d'inspection et de réparation sont étroitement liés. Ainsi l'amélioration de la procédure d'inspection permet une meilleure qualité de réparation.

PERSPECTIVES

Nettoyage des surfaces par sablage :

Le nettoyage des surfaces des segments de directrices 1^{er} étage par sablage au carbure de silicium est la solution proposée dans le cas d'une réparation par « Renew Alloy Brazing » ou dans le cas de la combinaison des deux méthodes de réparation (« Renew Alloy Brazing » et soudage). Cependant, cette technique de sablage exige l'enlèvement des 'core plug', qui constitue une opération délicate et coûteuse.

Par conséquent, il serait intéressant de trouver une alternative idéale, qui n'aurait pas d'influence sur les 'core plug' et qui ne nécessiterait pas de les retirer du segment.

Parmi les techniques de nettoyage des surfaces, on retrouve le sablage à la glace carbonique qui est un procédé qui ne laisse pas de résidus sur la surface de la pièce puisque la glace disparaît par sublimation.

Des essais pourraient être conduits dans ce sens, dans un premier temps chez un prestataire afin de :

- Vérifier l'efficacité de ce type de sablage pour l'élimination de la couche d'oxydes présente sur la surface des pièces, par comparaison au sablage au carbure de silicium ;
- Estimer le temps nécessaire pour l'opération de sablage à la neige carbonique ;
- Etudier la rentabilité de cette technique de sablage et la possibilité –si l'efficacité est confirmée – d'acquérir l'équipement nécessaire au niveau de l'atelier d'ALGESCO.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] MANUEL DE FORMATION. TOTAL. EXPLOITATION ET PRODUCTION, LES EQUIPEMENTS, LES TURBINES. COURS EXP-PR6EQ140. RÉVISION 0.1.
- [2] ANTHONY GIAMPAOLO. GAS TURBINE HANDBOOK: PRINCIPLES AND PRACTICES, THIRD EDITION. UNITED STATES OF AMERICA, THE FAIRMONT PRESS, 2006. 451 p. ISBN 0-88173-5167
- [3] GE OIL & GAS. GAS TURBINES.
- [4] DAVID L.OATES. MICROSTRUCTURAL CHANGES AS A TIME TEMPERATURE INDICATOR IN COBALT SUPERALLOYS AND A NOCoCrAlTaY COATING. DOCTORAL THESIS. INSTITUTE OF POLYMER TECHNOLOGY. LOUGHBOROUGH UNIVERSITY. JULY 2007.
- [5] [HTTP://MAGPOWERSYSTEM.FREE.FR/TURBOREACTEUR/TURBOREACTEUR.HTML](http://MAGPOWERSYSTEM.FREE.FR/TURBOREACTEUR/TURBOREACTEUR.HTML)
- [6] CLAIRE M. SOARES. GAS TURBINES IN SIMPLE CYCLE & COMBINED CYCLE APPLICATIONS.
- [7] SH ZANGENEH, H. FARHANGI, H.R. LASHGARI. REJUVENATION OF DEGRADED FIRST STAGE GAS TURBINE NOZZLE BY HEAT TREATMENT. DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS ENGINEERING, UNIVERSITY OF TEHRAN, TEHRAN, IRAN. JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS. 2010. SCIENCE DIRECT, ELSEVIER, 1IER NOVEMBRE 2007.
- [8] P.W. SCHILKE. ADVANCED GAS TURBINE MATERIALS AND COATINGS. GE ENERGY. SCHENECTADY, NY.
- [9] DATA SHEET. NOZZLES EQUIVALENT TO GE MS6001FA+E, SULZER
- [10] DATA SHEET. NOZZLES EQUIVALENT TO GE MS9001E, SULZER
- [11] DOCUMENT INTERNE
- [12] CLAUDE MONS. TRAITEMENTS THERMIQUES DES SUPERALLIAGES. TECHNIQUES DE L'INGENIEUR. TRAITE MATERIAUX METALLIQUES.
- [13] DR. T.F. CHASE AND A.M. BELTRAN. THE HIGH-TEMPERATURE PROPERTIES OF WELDED CAST CO-BASE ALLOYS. GENERAL ELECTRIC, MATERIALS AND PROCESSES LABORATORY, SCHENECTADY, NEW YORK.
- [14] HENRY L. BERNSTEIN, R. CRAIG McCLUNG AND T. R. SHARRON. ANALYSIS OF GENERAL ELECTRIC MODEL 7001 FIRST STAGE NOZZLE CRACKING. MATERIALS AND MECHANICS DEPARTMENT, SOUTHWEST RESEARCH INSTITUTE. SAN ANTONIO, TEXAS. JAMES

M. ALLEN. COMBUSTION TURBINES PROGRAM. ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, PALO ALTO, CALIFORNIA.

[15] JI XIAO. ETUDE DU COMPORTEMENT ET DE CONTRAINTES RESIDUELLES DE L'INCONEL 600 OXYDE SOUS AIR HUMIDE. 179 P.

THESE DE DOCTORAT : CHIMIE : INSTITUT DE CHIMIE MOLECULAIRE ET DES MATERIAUX D'ORSAY, UNIVERSITE PARIS-SUD : 2014.

[16] STEEL EAGLE COMMERCE LTD. STAINLESS STEEL GRADE AISI 321.

[17] STEPHEN J. BALSONE. GAS TURBINES HANDBOOK, BUCKETS AND NOZZLES. GE GAS TURBINES.

[18] Z. MAZUR, A. HERNANDEZ-ROSSETTE, R. GARCIA-ILLESCAS, A. LUNA-RAMIREZ. ENGINEERING FAILURE ANALYSIS, FAILURE ANALYSIS OF A GAS TURBINE NOZZLE. SCIENCE DIRECT, ELSEVIER, 11ER NOVEMBRE 2007.

[19] G.C. WOOD, F.H. STOTT. OXIDATION OF ALLOYS. THE INSTITUTE OF METALS 1987. THE AUTHORS ARE WITH THE CORROSION AND PROTECTION CENTRE, UMIST, MANCHESTER.

[20] HEEYOON CHUNG, HO-SEONG SOHN, JUN SU PARK, KYUNG MIN KIM, HYUNG HEE CHO. THERMO-STRUCTURAL ANALYSIS OF CRACKS ON GAS TURBINE VANE SEGMENT HAVING MULTIPLE AIRFOILS. ENERGY, ELSEVIER, 2016.

[21] DAVID BALEVIC. STEVEN HARTMAN. ROSS YOUMANS. HEAVY-DUTY GAS TURBINE OPERATING AND MAINTENANCE CONSIDERATIONS. GE ENERGY. ATLANTA, GA.

[22] H.D. SOLOMON. R.E. DELAIR AND J. THYSSEN. THE HIGH TEMPERATURE WETTING BALANCE AND THE INFLUENCE OF GRIT BLASTING ON BRAZING OF IN718. WELDING JOURNAL 287-S.

[23] M. NEUBERGER. SILICON CARBIDE DATA SHEETS. JUNE 1965.

[24] J.S. DODGSON. REPAIR TECHNIQUES FOR HOT GAS PATH COMPONENTS IN INDUSTRIAL GAS TURBINES. THE NETHERLANDS, ASME, 1982.

[25] AN INTRODUCTION TO BRAZING, FUNDAMENTALS, MATERIALS, PROCESSING. OERLIKON METCO.

[26] K.J. PALLOS. GAS TURBINE REPAIR TECHNOLOGY. GE POWER SYSTEMS. GE ENERGY SERVICES TECHNOLOGY. ATLANTA, GA.

[27] UNIVERSITY OF PRETORIA. CHAPTER 15, EXPERIMENT 11. CHARACTERIZATION OF THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF ADH BRAZE JOINTS IN FSX-414 COBALT-BASE SUPERALLOY NOZZLE SEGMENTS USING NOVEL BRAZE ALLOYS.

[28] MATERIAL PRODUCT DATA SHEET, AMDRY MM509 SERIES OF BRAZE ALLOYS. OERLIKON, METCO.