

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique

Complexe de liquéfaction du gaz naturel d'Arzew GL2/Z

Talleres Mecánicos Comas

Mémoire de projet de fin d'études

Pour de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie mécanique.

***Méthodologie de maintenance du rotor d'un
compresseur centrifuge – Complexe GL2/Z, Arzew***

Etude de cas : Rotor X04J

Zoheir SLAMANI

Sous la direction de :

Said RECHAK Professeur

Mohamed BEN BRAIKA M A A

Présenté et soutenu publiquement le 06/07/2019

Composition du jury

<i>Président</i>	B. Guegueb	M A A
<i>Examineur</i>	D.Saidi	M C B
<i>Co-Promoteur</i>	H. Mahouni	Ing. TMComas

ENP 2019

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique

Complexe de liquéfaction du gaz naturel d'Arzew GL2/Z

Talleres Mecánicos Comas

Mémoire de projet de fin d'études

Pour de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie mécanique.

***Méthodologie de maintenance du rotor d'un
compresseur centrifuge – Complexe GL2/Z, Arzew***

Etude de cas : Rotor X04J

Zoheir SLAMANI

Sous la direction de :

Said RECHAK Professeur

Mohammed Benbraika M A A

Présenté et soutenu publiquement le 06/07/2019

Composition du jury

<i>Président</i>	B. Guegueb	M A A
<i>Examineur</i>	D.Saidi	M C B
<i>Co-Promoteur</i>	H. Mahouni	Ing. TMComas

ENP 2019

ملخص

هذا المشروع هو محصول تعاون بين المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات وشركة سونا تراخ- مجمع تمييع الغاز الطبيعي ج ل2/ز والشركة الإسبانية ت م كوماس. تتمثل المنهجية المطورة أولاً في اكتساب المعرفة من تجربة على عينات من نفس التكوين المعدني كتلك الخاصة بالدوار الذي تمت دراسته باستخدام طريقتي التلبيس الأكثر ملاءمة " التلبيس بالليزر و التلبيس بوقود الأكسجين عالي السرعة" ومقارنة أدائها استناداً إلى العديد من المعايير بما في ذلك التصاق ووجود العيوب والتجانس والسّمك وأخيراً سلوك التلبيس ضد البلى. المعدات المستخدمة لهذا الغرض هي مجهر الإلكتروني المسح ، ومقياس الإشعاع ، مطياف الموجات فوق الصوتية للاختبارات الغير المدمرة. بعد اكتساب المهارات المطلوبة ، درسنا حالة الدوار الذي تم إصلاحه لشرح بدقة العمليات المختلفة لاستعادة الدوار.

الكلمات الدالة: التلبيس، الصيانة، الآلات الدوارة، الاختبارات الغير مدمرة.

Abstract

This project is a fruit of collaboration between the Ecole Nationale Polytechnique and Sonatrach - GL2 / Z natural gas liquefaction complex and the Spanish company TMComas. The methodology developed for the maintenance of rotors consists at first in acquiring know-how by conducting experiments on samples of the same metallurgical constitution as that of the analysed rotor by the use of the two most suitable methods of coating "HVOF and Laser Cladding", in order to compare their performances based on several criteria including adhesion, presence of defects, homogeneity, thickness and finally the behavior of the coating against wear. Experiments were performed using equipments such as The equipments used for this purpose is the scanning electron microscope, tribometer, spectrometer and ultrasonic probes for non-destructive testing. After acquiring those skills, we analyse the case study of the X04J rotor repaired by TMComas to meticulously explain, discuss and comments all the steps of the restoration of the rotor.

Key words: Coating, maintenance, rotary machines, non-destructive testing.

Résumé

Ce projet est le fruit d'une collaboration entre l'Ecole Nationale Polytechnique et l'entreprise Sonatrach – Complexe de liquéfaction du gaz naturel GL2/Z ainsi que l'entreprise Espagnole TMComas. La méthodologie développée pour la maintenance des rotors consiste en premier à acquérir des savoir-faire à partir d'expérimentation sur des échantillons de même constitution métallurgique que celle du rotor étudié en utilisant les deux méthodes de revêtement les plus adéquate « HVOF et Laser Cladding », afin de comparer leurs performances en se basant sur plusieurs critères dont l'adhérence, la présence de défauts, l'homogénéité, l'épaisseur et enfin le comportement du revêtement face à l'usure. Les équipements utilisés pour ce faire sont le microscope électronique à balayage, le tribomètre, le spectromètre ainsi que des sondes ultrasonores pour contrôle non destructif. Après avoir acquis ces compétences, nous avons analysé l'étude de cas du rotor X04J réparé par TMComas pour expliquer, discuter et commenter méticuleusement les différentes opérations de restauration du rotor.

Mots clés : Revêtement, maintenance, machines tournantes, contrôle non destructif

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents en signe de reconnaissance et de gratitude envers tous les efforts qu'ils ont fournis pour nous voir réussir ma sœur, mon frère et moi. Puisse Dieu les garder.

Je dédie aussi ce travail à ma sœur et mon frère ainsi que toute ma famille qui m'ont encouragé et soutenu pendant tout mon cursus scolaire.

Finalement, j'aimerais dédier ce travail à tous ces hommes et femmes qui ont eu la noble et pénible tâche de m'inculquer le savoir tout au long de mon cursus et qui m'ont toujours encouragé et soutenu tout au long de mes études.

REMERCIEMENTS

Louange, au seul et unique Dieu, en premier et en dernier lieu ; pour tout ce dont je suis conscient et tout ce que j'acquis.

Je remercie mes parents pour leur patience, leur innombrables sacrifices et leur incessant soutien depuis ma naissance.

Toutes les personnes, que j'avais l'honneur d'avoir comme enseignants et coachs durant toute ma vie, sont respectueusement remerciées pour leurs orientations et leur transmission de savoir ; en commençant par mes deux promoteurs Mr Said RECHAK et Mr Mohammed BENBRAIKA pour leur aide, leur disponibilité et leurs conseils au long de ce travail.

Je tiens aussi à remercier Mr Hakim MAHOUNI pour m'avoir orienté tout au long de ces derniers quatre mois et me faire visiter l'atelier TComas spécialisé dans la réparation des machines tournantes à Blanes en Espagne.

Je tiens à remercier aussi l'équipe mécanique du complexe GL2/Z à leur tête Mr Abdelhak MEBARKI, Mr Mammam Lahouari, Mme Kheira CHAYAH ainsi que les membres du département inspection Mr Abdelmadjid MEDJAHDI, Mr Rachid MAGSH pour leur réception et leur bonne collaboration pour la réussite de ce projet.

Ma gratitude va également aux chercheurs du Centre de Recherche en Technologie Industrielle (CRTI) Mr Mammam Hakem, Mr Nacer TALA IGHIL, Mr Rafik HALIMI et Mr Nacer BOUCHEROU qui ont montré un énorme intérêt pour la réussite de ce projet.

Mes remerciements vont aussi aux chercheurs du Centre de Recherche et Développement de l'électricité et du gaz (CREDEG) Mr Rabeh DRIF et Mr Takie Eddine DRIS.

Toutes mes reconnaissances et mes profonds remerciements pour :

Mr Said GACEM directeur de l'IAP Arzew

Mr Tahar ALLAL chef subdivision formation a MEI M'sila

Mr Lakhdar ZOGHLACH responsable à MEI M'sila

Mr Khaled ZOUYED inspecteur contrôle non destructive au laboratoire ZOUYED

Mr Jaume NIN directeur technique à TComas

Mr Djamel MIROUD Professeur à Université des sciences et technologies USTHB

Enfin, j'aimerais remercier Mr Brahim GUERGUEB, président de jury et Mr Djamel SAIDI, examinateur pour avoir accepté d'examiner et de juger mon travail, ainsi que l'ensemble des enseignants du département de génie mécanique pour la formation d'excellence qu'ils m'ont dispensée durant les trois années de spécialité.

Je suis convaincu que la moitié qui séparent les entrepreneurs qui réussissent et ceux qui échouent est purement la persévérance.

Steve Jobs

L'honneur appartient à ceux qui jamais ne s'éloignent de la vérité, même dans l'obscurité et la difficulté, ceux qui essayent toujours et qui ne se laissent pas décourager par les insultes, l'humiliation ou même la défaite.

Nelson Mandela

Le secret du changement c'est de concentrer toute son énergie non pas à lutter contre le passé, mais à construire l'avenir.

Socrate

Table des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Abréviations	
Introduction générale.....	- 15 -
Chapitre 1 : Etat de l’art et fondements théoriques des compresseurs centrifuges.....	17
1.1. Généralités sur la maintenance	17
1.1.1. Définition.....	17
1.1.2. Types de maintenance.....	17
1.1.3. Niveaux de la maintenance :	19
1.2. Techniques de surveillance des machines tournantes	20
1.2.1. Introduction	20
1.2.2. Analyse du lubrifiant	20
1.2.3. Analyse par thermographie infrarouge.....	20
1.2.4. Analyse de l’émission acoustique	21
1.2.5. Analyse vibratoire.....	21
1.3.Généralités sur les compresseurs	21
1.3.1. Introduction	21
1.3.2. Classification des compresseurs	22
1.3.3. Généralités sur les compresseurs centrifuges	22
1.4.Procédé de liquéfaction du gaz naturel.....	28
Chapitre 2 : Procédés, techniques de contrôle et maintenance des machines tournantes	30
2.1.Techniques de préparation et traitements de surface	30
2.1.1. Introduction	30
2.1.2. Définition d’une surface propre	30
2.1.3. Les principales opérations de préparation de surface	31
2.2.Méthodes de contrôle non destructif	36
2.2.1. Introduction	36
2.2.2. Contrôle visuel :	40
2.2.3. Contrôle par ressuage	41
2.2.4. Contrôle par magnétoscopie avec particule magnétique	43
2.2.5. Contrôle par magnétoscopie avec fuite de flux magnétique.....	45

2.2.6.	Contrôle par courants de Foucault	47
2.2.7.	Contrôle par ultrasons.....	49
2.2.8.	Contrôle par émission acoustique	51
2.2.9.	Contrôle par radiographie	53
2.2.10.	Autres méthodes de contrôle non destructif	54
2.3.	Analyse de la matière par différentes méthodes	56
2.3.1.	Introduction	56
2.3.2.	Différentes méthodes d'identification :.....	57
2.4.	Méthodes de revêtements	62
2.4.1.	Introduction	62
2.4.2.	Revêtement par projection thermique	64
2.4.4.	Revêtement par Laser cladding.....	67
2.5.	Equilibrage des rotor.....	72
2.5.1.	Définition.....	72
2.5.2.	Déséquilibre statique	72
2.5.3.	Moment du déséquilibre	73
2.5.4.	Méthodes d'équilibrage	73
2.5.5.	Qualité d'équilibrage G	74
Chapitre 3 : Etude comparative des revêtements par HVOF et Laser		
Cladding.....		75
3.1.	Analyse chimique des échantillons	75
3.2.	Revêtement des échantillons	76
3.2.1.	Paramètres du revêtement.....	76
3.2.2.	Constitution chimique de la poudre du revêtement.....	76
3.3.	Contrôle non destructif des échantillons	77
3.4.	Observation microscopique des échantillons	80
3.5.	Comportement des échantillons face à l'usure	88
Chapitre 4 : Etude de cas de la maintenance du rotor compresseur X04J . 92		
4.1.	Inspection du rotor	92
4.1.1.	Contrôle de la position des roues	92
4.1.2.	Contrôle dimensionnel du rotor	93
4.1.3.	Contrôle par CND :.....	94
4.1.4.	Analyse chimique de l'arbre :.....	99
4.2.	Réparation du rotor	100
4.2.1.	Rechargement de zones endommagées de l'arbre par Laser Cladding	100

4.2.2.	Construction de quatre chemises entre étages de même constitution chimique et mêmes caractéristiques mécaniques	101
4.2.3.	Construction de trois chemises pour l'arbre du rotor	101
4.2.4.	Montage du rotor avec les chemises entre étages, et celles pour l'arbre et les impulseurs :	102
4.2.5.	Rectification en ligne de toutes les zones récupérées et les éléments construits selon la cote d'origine	102
4.2.6.	Contrôle de la position des roues	102
4.2.7.	Contrôle dimensionnel du rotor	103
4.2.8.	Equilibrage du rotor.....	104
	Conclusion générale	107
	Perspective et recommandation.....	109
	Références Bibliographiques	109
	Sitographie.....	111

Liste des figures

Figure 1.1 Différents types de la maintenance.....	17
Figure 1.2 Classification des compresseurs.....	21
Figure 1.3 Rotor de compresseur centrifuge.	22
Figure 1.4 Coupe transversale du compresseur.	22
Figure 1.5 Description de compresseur centrifuge	23
Figure 1.6.a volute d'aspiration	25
Figure 1.6.b diaphragme d'aspiration.....	25
Figure 1.6.c diaphragme intermédiaire.....	25
Figure 1.6.d Volute de refoulement	25
Figure 1.7 Procédés de liquéfaction du gaz naturel	27
Figure 2.1 Différents abrasifs utilisés par grenailage.....	31
Figure 2.2 Différents abrasifs utilisés par sablage.....	32
Figure 2.3. Bille de verre.....	32
Figure 2.4. Jet d'eau à haute pression	35
Figure 2.5. Endoscopes (à gauche) et fibroscope (à droite)	39
Figure 2.6. Principe du test de ressuage: (A) fissure de rupture, (B) application du pénétrant, (C) l'excès de pénétrant enlevé, (D) l'application du révélateur.....	41
Figure 2.7. Principe de la magnétoscopie.....	43
Figure 2.8 : Un outil MFL.....	44
Figure 2.9. Principe de la méthode de fuite de flux magnétique.....	45
Figure 2.10. Génération des courants de Foucault.....	46
Figure 2.11. Principe d'émission et réception des ondes ultrasonores	49
Figure 2.12. Equipements pour le contrôle par émission acoustique.....	50
Figure 2.13. Contrôle par radiographie.....	52
Figure 2.14. Contrôle par RFT.....	54
Figure 2.15. Contrôle par ACFM.....	54
Figure 2.16. Contrôle par PA.....	55
Figure 2.17. Contrôle par GW.....	55
Figure 2.18. Interactions des rayons X avec la matière.....	57
Figure 2.19. Excitation d'un atome.....	57
Figure 2.20. Equipement d'analyse par Rayon-X.....	59
Figure 2.21. Equipement de spectrométrie à émission optique.....	59
Figure 2.22. Différentes manières de revêtement.....	62

Figure 2.23. Photo réel de projection thermique.....	63
Figure 2.24. Projection HVOF.....	64
Figure 2.25. Revêtement laser cladding.....	66
Figure 2.26. Représentation du revêtement LC.....	67
Figure 2.27. Différentes étapes du revêtement LC.....	68
Figure 2.28. Laser cladding a deux et une seul étape.....	69
Figure 3.1. Configuration expérimentale du test.....	78
Figure 3.2. Photos réelles du contrôle par ultrason de l'échantillon 2.....	78
Figure 3.3. Image C-scan e l'échantillon.....	79
Figure 3.4. Observation de l'adhérence de l'échantillon 1.....	80
Figure 3.5. Observation de l'homogénéité de l'échantillon 1.....	80
Figure 3.6. Observation de défauts de l'échantillon 1.....	81
Figure 3.7. Observation de l'épaisseur de l'échantillon 1.....	81
Figure 3.8. Spectre du substrat de l'échantillon 1.....	82
Figure 3.9. Spectre du revêtement de l'échantillon 1.....	82
Figure 3.10. Spectre de l'interface de l'échantillon 1.....	83
Figure 3.11. Observation de l'adhérence de l'échantillon 2.....	83
Figure 3.12. Observation de l'homogénéité de l'échantillon 2.....	84
Figure 3.13. Observation de défauts de l'échantillon 2.....	84
Figure 3.15. Observation de l'épaisseur de l'échantillon 2.....	85
Figure 3.15. Spectre du substrat de l'échantillon 2.....	85
Figure 3.16. Spectre du revêtement de l'échantillon 2.....	86
Figure 3.17. Spectre de l'interface de l'échantillon 2.....	86
Figure 3.18. Dispositif du test d'usure.....	87
Figure 3.19. Evolution du coefficient de friction en fonction du temps pour l'échantillon 1..	88
Figure 3.20. Evolution du coefficient de friction en fonction du temps pour l'échantillon 2..	88
Figure 3.21. Profil de la zone usée de l'échantillon 1.....	89
Figure 3.22. Profil de la zone usée de l'échantillon 2.....	89
Figure 4.1. Contrôle de la position des roues.....	92
Figure 4.2. Contrôle dimensionnel du rotor.....	92
Figure 4.3. Contrôle de l'arbre par ressuage.....	94
Figure 4.4. Contrôle de l'arbre par ultrason.....	94
Figure 4.5. Contrôle de la roue 1 par ressuage.....	95
Figure 4.6. Contrôle de la roue 2 par ressuage.....	95
Figure 4.7. Contrôle de la roue 3 par ressuage.....	96

Figure 4.8. Contrôle de la roue 4 par ressuage.....	96
Figure 4.9. Contrôle de la roue 5 par ressuage.....	97
Figure 4.10. Contrôle de la roue 6 par ressuage.....	97
Figure 4.11. Analyse chimique de l'arbre du rotor.....	98
Figure 4.12. Contrôle de la position des roues après réparation.....	100
Figure 4.13. Contrôle dimensionnel après réparation.....	101
Figure 4.14. Rotor en plein équilibrage.....	104

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Niveaux de la maintenance.....	18
Tableau 2.1 Défauts détectés par chaque contrôle.....	36
Tableau 2.2 étapes de création des courants de Foucault.....	47
Tableau 2.3 techniques recommandes et non recommandés par API 687.....	62
Tableau 3.1 Analyse chimique de l'échantillon 1.....	74
Tableau 3.2 Analyse chimique de l'échantillon 2.....	74
Tableau 3.3 Paramètres du revêtement de l'échantillon 1.....	75
Tableau 3.4 Paramètres du revêtement de l'échantillon 2.....	75
Tableau 3.5 Analyse chimique de la poudre du revêtement.....	75
Tableau 3.6 Contrôle par ressuage de l'échantillon 1.....	76
Tableau 3.7 Contrôle par ultrason de l'échantillon 1.....	76
Tableau 3.8 Contrôle par ressuage de l'échantillon 2.....	77
Tableau 3.9 Paramètres du test d'usure.....	87
Tableau 3.10 Coefficient de frottement de l'échantillon 1.....	87
Tableau 3.11 Coefficient de frottement de l'échantillon.....	88
Tableau 4.1 position des roues de rotors.....	92
Tableau 4.2 dimensions de chaque point de rotors avant réparation.....	93
Tableau 4.3 paramètres mécaniques de l'arbre du rotor avant la réparation.....	98
Tableau 4.4 dimension de rechargement en longueur et en épaisseur.....	99
Tableau 4.5 constitution chimique de la poudre de revêtement pour l'arbre.....	99
Tableau 4.6 paramètres mécaniques de l'arbre des rotors après la réparation.....	99
Tableau 4.7 constitution chimique de la poudre de revêtement pour les chemises entres les étages.....	100
Tableau 4.8 paramètres mécaniques des chemises entres les étages.....	100
Tableau 4.9 nombres d'unités de chemise entre les étages réparée.....	100
Tableau 4.10 constitution chimique de la poudre de la chemise N°1.....	100
Tableau 4.11 paramètres mécaniques de la chemise N°1.....	100
Tableau 4.12 constitution chimique de la poudre des chemises N°2et3.....	100

Tableau 4.13 paramètres mécaniques des chemise N°2et3.....	100
Tableau 4.14 nombres d'unités de la chemise N°2et3.	100
Tableau 4.15 erreur de la position des roues après réparation.	102
Tableau 4.16 dimensions de chaque point de rotors après réparation.....	102
Tableau 4.17 paramètres de rotos utilisé lors d'équilibrage.....	103
Tableau 4.18 dimension des deux plans.....	103
Tableau 4.19 vibration avant équilibrage à haute vitesse.....	104
Tableau 4.20 vibration après équilibrage à haute vitesse.....	105

Abréviations

CND	Contrôle non destructive
MFL	Magnetic flux leakage
PA	Phased array
RFT	Remote field testing
GW	Guided wave
ACFM	Alternating Courant Field Measurement
HVOF	High velocity oxy fuel
HVLF	High velocity liquid fuel
UAV	Unmanned aerial vehicle
TIG	Tungstene inert gas
SAW	Submerged arc welding

Introduction générale

Ce projet de fin d'études étant le fruit d'une collaboration entre le département du génie mécanique de l'Ecole Nationale Polytechnique et la société algérienne de production gaz naturel liquéfié connu comme complexe GL2Z qui est une filiale du groupe Sonatrach, ainsi que l'entreprise espagnole TMComas spécialisée dans la maintenance des machines tournantes.

Le complexe GL2Z du groupe Sonatrach chargé de la liquéfaction du gaz naturel situé à Arzew-Oran a rencontré ces dernières années des problèmes récurrents pour maintenir une stabilité d'exploitation des trains de production de gaz naturel liquéfié suite aux déclenchements fréquents des machines stratégiques, à savoir les compresseurs centrifuges; par l'augmentation de l'amplitude des vibrations, bruits anormaux, consommation importante d'huile, élévation de la température et usure des paliers radiaux et axiaux, engendrant des pannes fréquentes ce qui influe sur la production.

En effet, ces phénomènes sont une conséquence directe d'usure profonde des rotors de ces compresseurs au niveau des soies d'arbre, des portées des labyrinthes d'étanchéité et pistes des sondes de vibrations

A cet effet et dans l'optique de la fiabilité et la disponibilité des six (6) trains de production il était plus que nécessaire de recourir à la réparation des rotors des compresseurs X01J, X02J et X04J auprès d'un des grands spécialistes dans le domaine de maintenance des rotors similaires, TM Comas.

Une réparation d'un tel type de rotor est un besoin critique pour maintenir une stabilité de production du GNL et une fiabilité conséquente du complexe, ainsi cette maintenance nous évite les couts excessifs d'achat d'un nouveau équipement qui peut couter jusqu'à 15 fois le prix de cette réparation avec un temps d'attente pour l'acquisition du rotor qui peut atteindre les 2 ans ce qui va causer un manque de production et en conséquence une perte de revenu pour le pays.

Notre étude se fera exclusivement sur le rotor du compresseur centrifuge X04J du train de production N°3 du complexe GL2Z qui a subi une réparation sur l'arbre par rajout de matière avec la technique laser cladding.

A travers ce projet nous allons nous approfondir davantage sur la réparation faite sur ce rotor, faire une analyse critique de ce qui a été fait que ça soit en qualité de méthode ou de matière utilisé par rechargement, et pour approfondir notre étude nous ferons une étude comparative sur deux échantillons revêtus par les deux méthodes les plus utilisées dans le domaine de la réparation des machines tournantes : HVOF et Laser Cladding, de constitution chimique qui se rapproche à celle de l'arbre du rotor où nous allons faire des contrôles non destructifs,

observation microscopique avec le MEB ainsi qu'un contrôle par tribométrie. Pour y parvenir, nous avons organisé notre travail en quatre chapitres :

- Nous commencerons par un premier chapitre où nous présenterons un état d'art de la maintenance, ses types ainsi que ses niveaux, ensuite nous aborderons des généralités sur les compresseurs centrifuges similaires à celui de notre projet.
- Au chapitre deux, certains concepts nécessaires de traitements de surface, de contrôle non destructif et d'analyse chimique de la matière ainsi que les généralités concernant l'équilibrage des machines tournantes seront abordés.
- Le chapitre trois prendra en charge l'étude comparative des deux méthodes de revêtements HVOF et Laser Cladding faites sur un échantillon de constitution chimique similaire à celui du rotor réparé.
- Une étude de cas concernant la réparation faite sur le rotor du compresseur sera présentée dans le chapitre quatre.

Une conclusion générale viendra finalement couronner notre étude.

Chapitre 1 : Etat de l'art et fondements théoriques des compresseurs centrifuges

Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter des généralités sur la maintenance des machines tournantes, les techniques de surveillance d'un équipement ainsi que des généralités sur les compresseurs centrifuges, leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs types les plus utilisés, ensuite nous aborderons le compresseur qui a subi une maintenance, ses caractéristiques et les problèmes qui puisse rencontrer lors son fonctionnement et les mesures à faire pour agir contre ses perturbations, ultérieurement nous expliquerons le rôle de ce compresseur ainsi que les autres compresseurs utilisés dans le procédé liquéfaction.

Une explication brève sur la liquéfaction du gaz naturel sera faite dans son chapitre.

1.1. Généralités sur la maintenance

1.1.1. Définition

D'après la norme NF-X60-010, « *la maintenance est définie comme étant un ensemble d'activités destinées à maintenir ou rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement pour accomplir une fonction requise* »

1.1.2. Types de maintenance

Il existe deux façons complémentaires d'organiser les actions de maintenance :

La maintenance préventive : qui consiste à intervenir sur un équipement avant que celui-ci ne soit défaillant, afin de tenter de prévenir toute panne. On interviendra de manière préventive soit pour des raisons de sûreté de fonctionnement (les conséquences d'une défaillance étant inacceptables), soit pour des raisons économiques (cela revient moins cher) ou parfois pratiques (l'équipement n'est disponible pour la maintenance qu'à certains moments précis).

La maintenance préventive se subdivise à son tour en :

1. maintenance systématique, qui désigne des opérations effectuées systématiquement, soit selon un calendrier (à périodicité temporelle fixe), soit

- selon une périodicité d'usage (heures de fonctionnement, nombre d'unités produites, nombre de mouvements effectués, etc.) ;
2. maintenance conditionnelle, réalisée à la suite de relevés ou de mesures (kilométrage, temps de fonctionnement, etc.), de contrôles révélateurs de l'état de dégradation de l'équipement (thermographie infrarouge, analyse vibratoire, mesure d'épaisseur, analyse d'huile, etc.) ;
 3. maintenance prévisionnelle, réalisée à la suite d'une analyse de l'évolution de l'état de dégradation de l'équipement (par exemple contrôle périodique défini par le constructeur ou l'expérience).

La maintenance corrective, qui consiste à intervenir sur un équipement une fois que celui-ci est défaillant, elle-même subdivisée en :

1. maintenance palliative : dépannage (donc provisoire) de l'équipement, permettant à celui-ci d'assurer tout ou partie d'une fonction requise ; elle doit toutefois être suivie d'une action curative dans les plus brefs délais.

2. maintenance curative : réparation (donc durable) consistant en une remise en l'état initial, au moins d'un point de vue fonctionnel

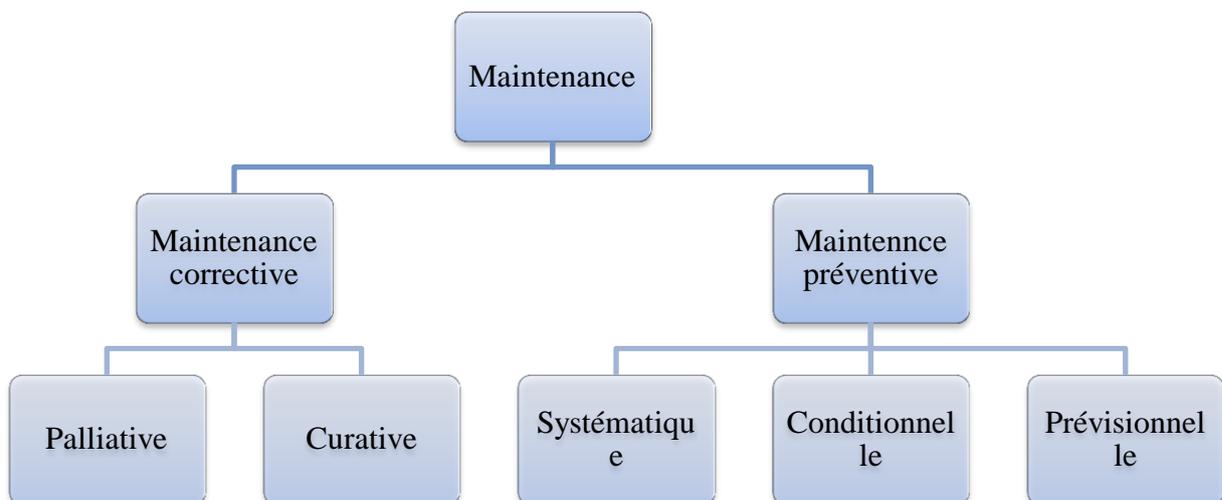


Figure 1.1 Différents types de la maintenance

1.1.3. Niveaux de la maintenance :

La norme NF X 60-010 définit, à titre indicatif, cinq « niveaux de maintenance », le tableau suivant énumère les différents niveaux :

Tableau 1.1 Niveaux de la maintenance

	Travaux	Lieu	Personnel	Exemple
Niveau 1	-réglages simples - pas de démontage ni ouverture du bien	-sur place	-exploitant du bien	-remise à zéro d'un automate après arrêt d'urgence, -changement de consommable
Niveau 2	-dépannage par échange standard -opérations mineures de maintenance préventive	-sur place	-technicien habilité	-changement d'un relais - contrôle de fusibles - réenclenchement de disjoncteur
Niveau 3	-identification et diagnostic de pannes - réparation par échange standard - réparations mécaniques mineures - maintenance préventive	-sur place ou dans atelier de maintenance	-technicien spécialisé	-identification de l'élément défaillant, recherche de la cause, élimination de la cause, remplacement
Niveau 4	-travaux importants de maintenance corrective ou préventive sauf rénovation et reconstruction - réglage des appareils de mesure - contrôle des étalons	-atelier spécialisé avec outillage général, bancs de mesure, documentation	-équipe avec encadrement technique spécialisé	-intervention sur matériel dont la remise en service est soumise à qualification
Niveau 5	- reconstruction - réparations importantes	-constructeur ou reconstruteur	-moyens proches de la fabrication	-mise en conformité selon réglementation d'équipements lourds

1.2. Techniques de surveillance des machines tournantes

1.2.1. Introduction

Pour le cas des machines tournantes les sources d'information représentatives de leurs modes de fonctionnement sont nombreuses, et leurs techniques d'exploitation encore plus. Le choix d'une bonne source d'information ainsi que d'une technique d'exploitation adéquate est un facteur de premier plan afin de construire un système de surveillance et de diagnostic efficace. Ce choix est fait en fonction de plusieurs paramètres tel que : les paramètres de coût d'installation ; les paramètres relatifs à la dynamique et la cinématique de la machine ; les paramètres environnementaux et d'encombrement ; et le niveau de criticité de l'application. Dans ce qui suit seront décrites les principales sources d'information pour la surveillance et le diagnostic des machines tournantes ainsi que leurs principales techniques d'exploitations.

1.2.2. Analyse du lubrifiant

Le rôle principal du lubrifiant est d'assurer un contact fluide entre les différents composants d'une machine et ainsi diminuer le risque d'usure. Il peut aussi assurer d'autres tâches telles que le refroidissement, la protection contre la rouille et la corrosion, mais aussi le contrôle non destructif de l'état de fonctionnement de la machine.

Dans le cas d'apparition d'une défaillance dans un organe de la machine, le suivi des caractéristiques physico-chimiques du lubrifiant peut contenir des informations sur son type et son niveau de dégradation, notamment dans le cas de dégradation, liée à l'oxydation du lubrifiant, ou de contamination, liée à la présence de débris d'usure. Ces informations peuvent provenir de vérifications et visites quotidiennes, avec des tests simples à base d'examen visuels, d'observations de l'odeur et de la couleur du lubrifiant, ou d'analyses plus poussées en laboratoire tels que la chromatographie, photométrie ou spectrométrie. Les principaux inconvénients de l'utilisation de l'analyse des lubrifiants pour le diagnostic des défauts dans les machines tournantes sont, la difficulté de localisation et d'isolation de l'organe défaillant, ainsi que la lenteur des analyses réduisant les possibilités de suivi dans le cas d'avaries à progression rapide.

1.2.3. Analyse par thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge part du principe que tout corps dont la température est supérieure à 0°C émet une énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Cette énergie est fortement corrélée avec sa température de surface. La thermographie infrarouge consiste à relever ce rayonnement, le quantifier et, s'il est bien calibré, le reconstituer avec une cartographie des températures à la surface de l'objet observé.

La thermographie infrarouge est plus généralement utilisée pour la surveillance des installations électriques sous tension, des réseaux de chauffage, ou de certains procédés industriels tels que le soudage et le laminage. Son application pour le suivi de l'état de fonctionnement des machines tournantes est plus réduite. Une des principales raisons est l'obligation de ne rencontrer aucun obstacle entre la caméra et la surface de l'organe à surveiller.

1.2.4. Analyse de l'émission acoustique

L'étude de l'émission acoustique est une technique de surveillance qui tend à se généraliser, surtout avec l'apport de techniques avancées pour le traitement et le dé-bruitage des signaux. Bien qu'elle se soit avérée efficace, notamment pour le diagnostic des défauts de roulements et d'engrenages à un stade précoce, elle a aussi montré certains inconvénients. En plus de sa forte sensibilité au bruit, l'émission acoustique s'atténue à travers les différentes interfaces, ce qui requiert un placement des capteurs au plus près de l'installation à surveiller pour une acquisition fiable

1.2.5. Analyse vibratoire

Une machine tournante en fonctionnement engendre forcément l'apparition d'efforts plus ou moins variables. Ces efforts peuvent être cause de défaillances ultérieures comme ils peuvent être conséquence de défaillances antérieures.

Les vibrations des machines sont considérées comme la réponse de la fonction de transfert de leurs structures aux différents efforts auxquels elles sont sollicitées. La surveillance des vibrations de ces structures peut permettre donc de déceler l'apparition d'efforts perturbateurs à un stade précoce, permettant par la même occasion, de détecter ou d'avorter l'apparition de défaillances. En plus de son efficacité, la facilité relative de son installation rend l'analyse des signaux vibratoires une des techniques les plus utilisées pour la surveillance et le diagnostic des défauts des machines tournantes. Lors de l'acquisition de l'information vibratoire, le choix des éléments constitutifs de la chaîne de mesure ne doit pas être négligé, et ce afin de pouvoir enregistrer des signaux englobant l'information vibratoire la plus complète. Les techniques d'exploitation et de traitement des signaux vibratoires diffèrent d'un cas à l'autre en fonction de la dynamique et de la cinématique de la machine surveillée ainsi que de la nature des défauts soupçonnés. Dans les sections suivantes, seront décrites dans cet ordre la chaîne de mesure des signaux vibratoires ainsi que les principales techniques de leurs exploitations.

1.3. Généralités sur les compresseurs

1.3.1. Introduction

Un compresseur est une machine qui a pour fonction d'élever la pression du fluide compressible qui le traverse. Son nom traduit le fait que le fluide se comprime (son volume diminue) au fur et à mesure de l'augmentation de pression.

L'élévation de pression d'un gaz pour un compresseur est utilisée pour atteindre un niveau de pression déterminé par des processus tels que :

- Les réactions chimiques (pression convenable le catalyseur) ;
- Le stockage dans les cavités ;
- La liquéfaction ou la séparation ;
- Les cycles de réfrigération ;
- L'alimentation des réseaux d'air comprimé...etc.

1.3.2. Classification des compresseurs

Les compresseurs peuvent être classés selon les caractéristiques suivantes : voir figure I.4

- le principe de fonctionnement (volumétrique, dynamique) ;
- mouvement des pièces mobiles (mouvement linéaire, rotatif) ;
- les compresseurs d'air ;
- les compresseurs des gaz.

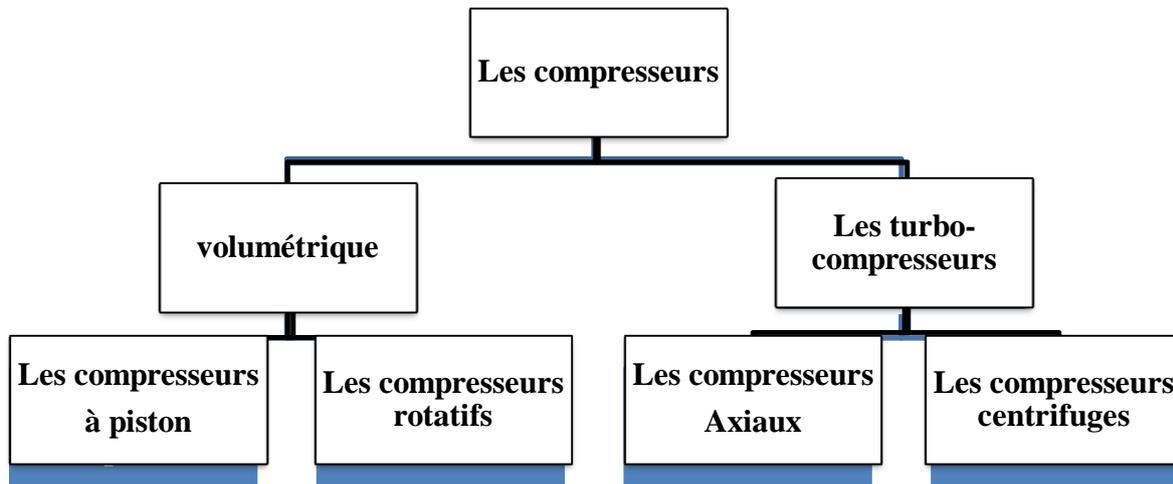


Figure 1.2 Classification des compresseurs

Toutes les machines roto-dynamiques (turbocompresseur) possèdent un organe tournant appelé "Impulseur", ou "rotor" ou encore simplement "roue", à travers lequel le fluide s'écoule de façon continue. La direction du flux par rapport au plan de rotation de l'impulseur permet de distinguer différentes classes de turbocompresseur :

- Les turbocompresseurs axiaux
- Les turbocompresseurs radiaux (centrifuges ou centripètes)

Dans ce projet nous n'aborderons que les compresseurs centrifuges similaires à celui qui fait l'objet de notre étude.

1.3.3. Généralités sur les compresseurs centrifuges

1.3.3.1. Introduction

Le compresseur centrifuge est une machine "dynamique" à écoulement continu de fluide. Des roues solidaires à l'arbre fournissent de l'énergie à ce dernier. Une partie de cette énergie est transformée en augmentation de pression directement dans les roues, le reste dans le stator, c'est-à-dire dans le diffuseur.

Les compresseurs centrifuges augmentent l'énergie du gaz comprimé grâce à la force centrifuge qui est provoquée par le mouvement de rotation des roues à aube.

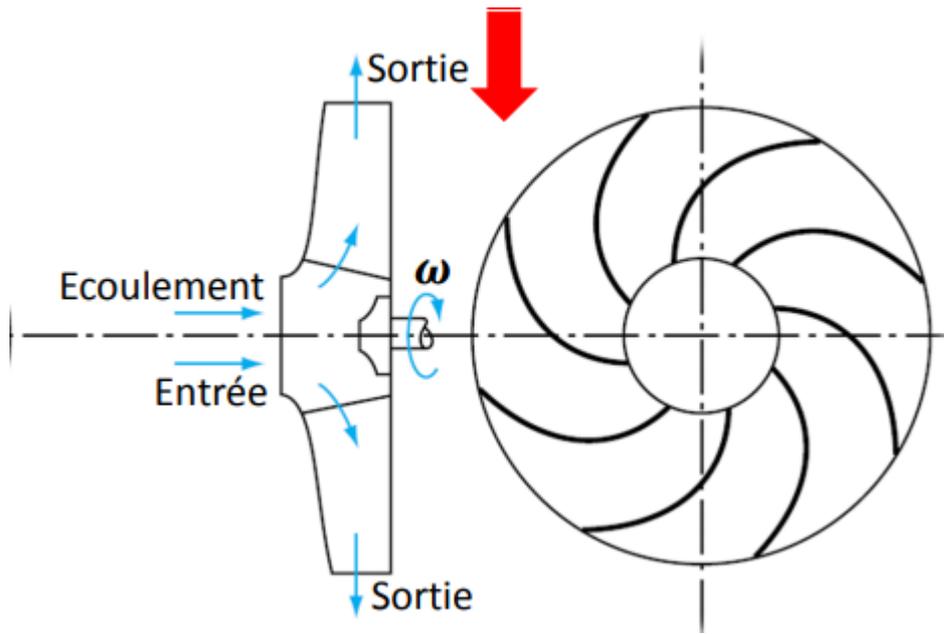


Figure 1.3 Rotor de compresseur centrifuge [2].

Dans un turbocompresseur centrifuge, même si à l'approche de l'impulseur, le fluide arrive dans la direction axiale, il est réorienté à l'entrée de la machine de façon à s'écouler à travers l'impulseur dans le plan de rotation, c'est-à-dire dans la direction centrifuge.

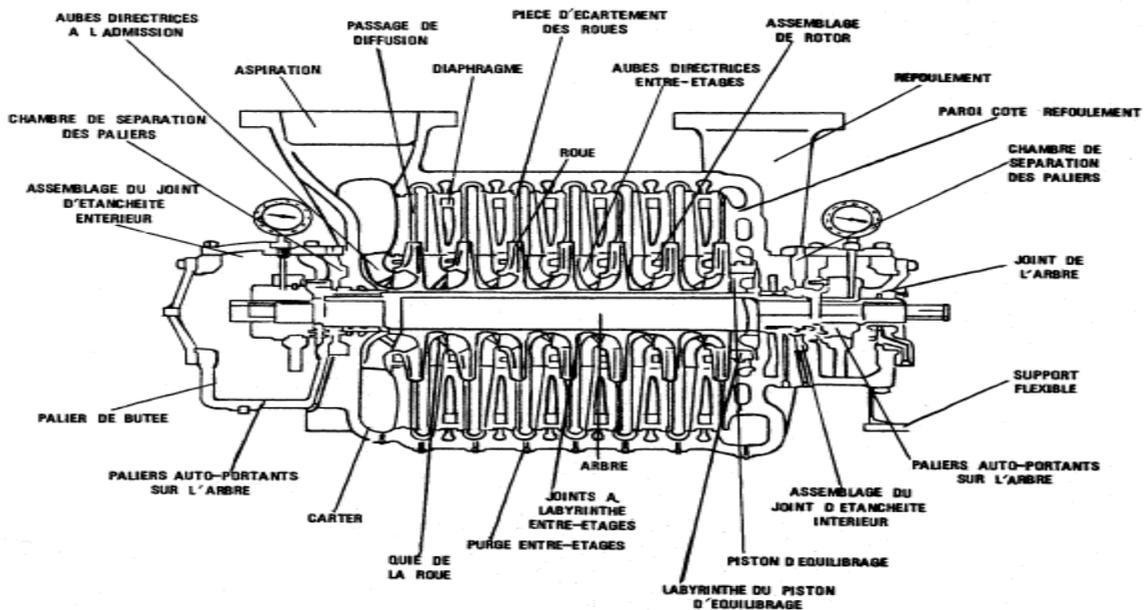


Figure 1.4 Coupe transversale du compresseur [3].

1.3.3.2. Types des compresseurs centrifuges :

La construction de ces compresseurs étant adapté au cas particulier de chaque réalisation, on distingue :

- Compresseur centrifuge avec enveloppe à plan de joint horizontal
- Compresseurs avec corps ouverts verticalement
- Compresseurs avec corps en forme de cloche
- Compresseurs pipeline
- Compresseurs SR

1.3.3.3. Description des compresseurs centrifuges

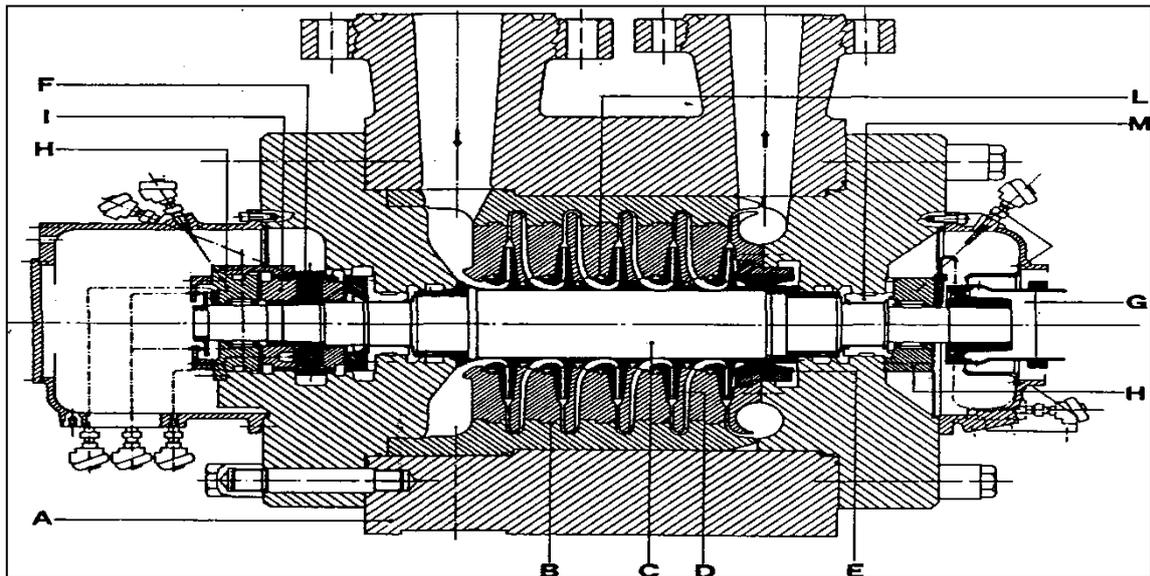


Figure 1.5 Description de compresseur centrifuge [4]

Ce type de machine est constitué par un corps extérieur (A) contenant la partie du stator dite ensemble de diaphragmes (B) où est introduit un rotor formé par l'arbre (C), une ou plusieurs roues (D), le piston d'équilibrage (E) et le collet (F) du palier de butée.

Le rotor entraîné par la machine motrice moyennant le moyeu (G) tourne sur les paliers porteurs (H) et est gardé dans sa position axiale par le palier de butée (I). Des dispositifs d'étanchéité à labyrinthe (L) et, si nécessaire, des étanchéités huile d'extrémité agissent sur le rotor (voir figure I.7).

A - corps extérieur; B - diaphragmes; C - arbre; D - roues; E - piston d'équilibrage ; F - collet du palier de butée; G - rotor; H - paliers porteurs; I - palier de butée; L-labyrinthe

1.3.3.4. Principe de fonctionnement du compresseur X04J

Le gaz est aspiré par le compresseur à travers la bride d'aspiration, il entre dans une chambre annulaire appelé volute d'aspiration figure 1.6.a et converge uniformément vers le centre de toutes les directions radiales. Dans la chambre annulaire du côté opposée par rapport à la bride d'aspiration, il existe une ailette pour éviter la formation de tourbillons du gaz.

Le gaz entre dans le diaphragme d'aspiration figure 1.6.b et donc aspiré par la première roue. La roue pousse le gaz vers la périphérie en augmentant sa vitesse et sa pression ; la vitesse à la sortie aura une composante radiale et une composante tangentielle. Ensuite, d'un mouvement en spirale, le gaz parcourt une chambre circulaire formée d'un diffuseur où la vitesse diminue avec une augmentation de la pression. Puis le gaz parcourt le canal de retour, celui-ci est une chambre circulaire délimitée par deux anneaux formant le diaphragme intermédiaire figure 1.6.c où se trouvent les aubes qui ont à tâche de diriger le gaz vers l'aspiration de la roue suivante. La disposition des aubes est telle qu'elle permet de redresser le mouvement en spirale du gaz de manière à obtenir une sortie radiale et une entrée axiale vers la roue suivante. Ensuite le gaz est aspiré par la deuxième roue et, pour chaque roue, le même parcours se répète. Pour réduire au minimum les fuites internes de gaz, des joints labyrinthes formés de 2 ou plusieurs segments de bagues, sont montés sur le diaphragme. La dernière roue de l'étage envoie le gaz dans un diffuseur qui mène à une chambre annulaire appelée volute de refoulement figure 1.6.d, qui collecte le gaz de la périphérie des diffuseurs et le dirigeant vers la bride de refoulement, près de cette dernière il y a une autre ailette qui empêche le gaz de continuer à retourner dans la volute et qu'il envoie à la bride de refoulement.

Le compresseur 304-J a six étages marche à vitesse variable, entraîné par la turbine à vapeur 304-JT. La vitesse de service de la turbine peut être réglée manuellement entre 5153 et 8324 tr/min.

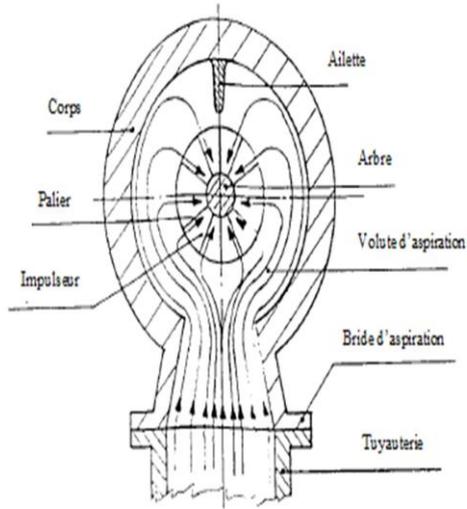


Figure 1.6.a volute d'aspiration [4]

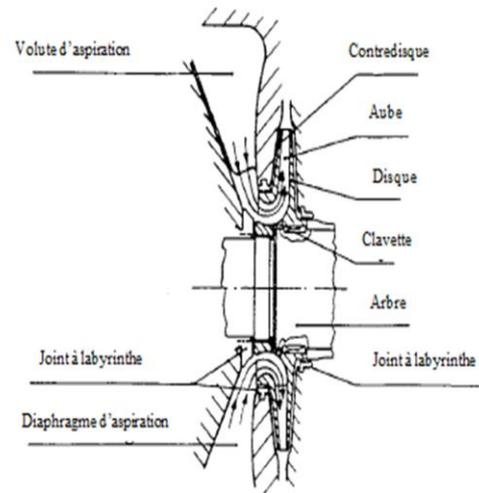


Figure 1.6.b diaphragme d'aspiration [4]

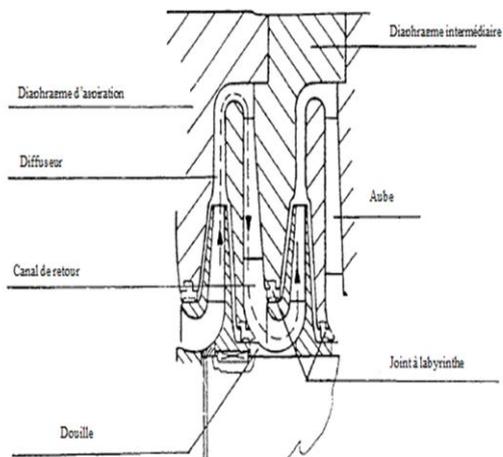


Figure 1.6.c diaphragme intermédiaire [4]

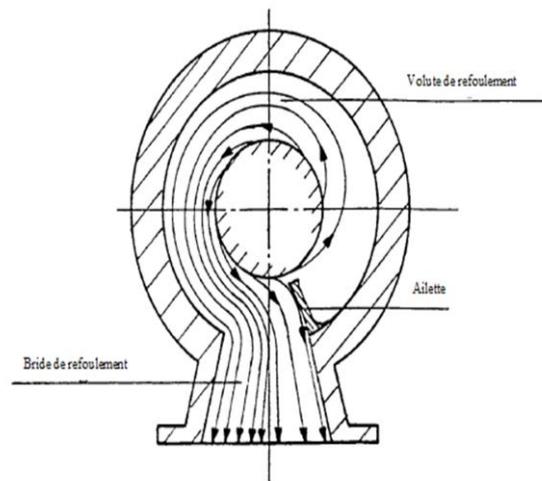


Figure 1.6.d Volute de refoulement [4]

1.3.3.5. Spécifications du compresseur

Fabricant	Dresser Rand
Modèle	3M8-6
Gamme de vitesse	5153 à 8324 tr/min
Première vitesse critique	3350 tr/min
Poids	15.872 kg
Poids du rotor	685 kg
Pression d'admission et refoulement	0.2 bar eff (± 0.1 bar) - 2.6 bar eff (± 0.4 bar)
Température d'admission et refoulement	-34 °C ($\pm 10^{\circ}\text{C}$) - 69 °C ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)
Débit	30.000 kg/h (± 10.000 kg/h)
Nombre de roués	6
Diamètre de la plus grande roué	685 mm
Consommation	2362 KW

1.3.3.6. Rôle du compresseur X04J ainsi que les autres compresseurs utilisés dans le procédé de liquéfaction.

Chaque train de production est équipé de quatre compresseurs X01J, X02J, X03 et le X04J

L'ensemble du turbocompresseur propane (X01J) fait partie intégrante du système de réfrigération au propane. On utilise le système propane comme agent de refroidissement pour la liquéfaction du gaz naturel. Le compresseur multi-étagé sert à augmenter la pression du propane sous forme de vapeur afin de permettre sa liquéfaction par échange de chaleur avec l'eau de refroidissement des condenseurs propanes.

Les systèmes de réfrigération au propane et au MCR (multi composant réfrigérant) fonctionnent en boucle fermée sur le principe d'un cycle d'un fluide frigorigène

Deux compresseurs assurent la compression au cycle MCR : le compresseur premier étage MCR1 (X02J) et le compresseur deuxième étage MCR2 (X03J) qui sont entraînés par des turbines utilisant de la vapeur à haute pression (62 Bars).

Un compresseur supplémentaire (**X04J**) entraîné également par turbine à 62Bars permet d'augmenter la pression du gaz combustible récupéré dans l'unité de liquéfaction avant de l'injecter dans le collecteur principale alimentant les chaudières de production de la vapeur.

1.4. Procédé de liquéfaction du gaz naturel

La liquéfaction de gaz naturel s'effectuera en cinq étapes.

1. le gaz naturel en provenance des champs d'Hassi R'mel entre d'abord dans la section de décarbonatation. Cette opération est nécessaire pour éviter la solidification du gaz carbonique dans la section de liquéfaction.
2. le gaz naturel passe ensuite dans la section de déshydratation où il est refroidi, après quoi une extraction du mercure est nécessaire.
3. le gaz naturel filtré, ensuite pré-refroidi par thermique avec le réfrigérant propane avant d'entrer dans l'extrémité chaude de la section de liquéfaction. Là, les hydrocarbures lourds se séparent de la partie légère constituée essentiellement de méthane.
4. la partie légère est refroidie et liquéfiée dans l'extrémité froide de la section de liquéfaction. Le GNL est alors comprimé et refroidi à -161°C ensuite pompé et stocké dans des bacs à une pression voisine de la pression atmosphérique, ensuite le GNL est transporté par des bateaux.
5. les hydrocarbures lourds liquides séparés de la partie légère dans l'extrémité chaude de la section de liquéfaction sont acheminés vers la section de fractionnement où ils subissent une séparation en sous-produits propane et butane de qualité commerciale et gazoline naturelle. Ces produits sont aussi stockés dans des bacs, pour être expédiés vers l'étranger.

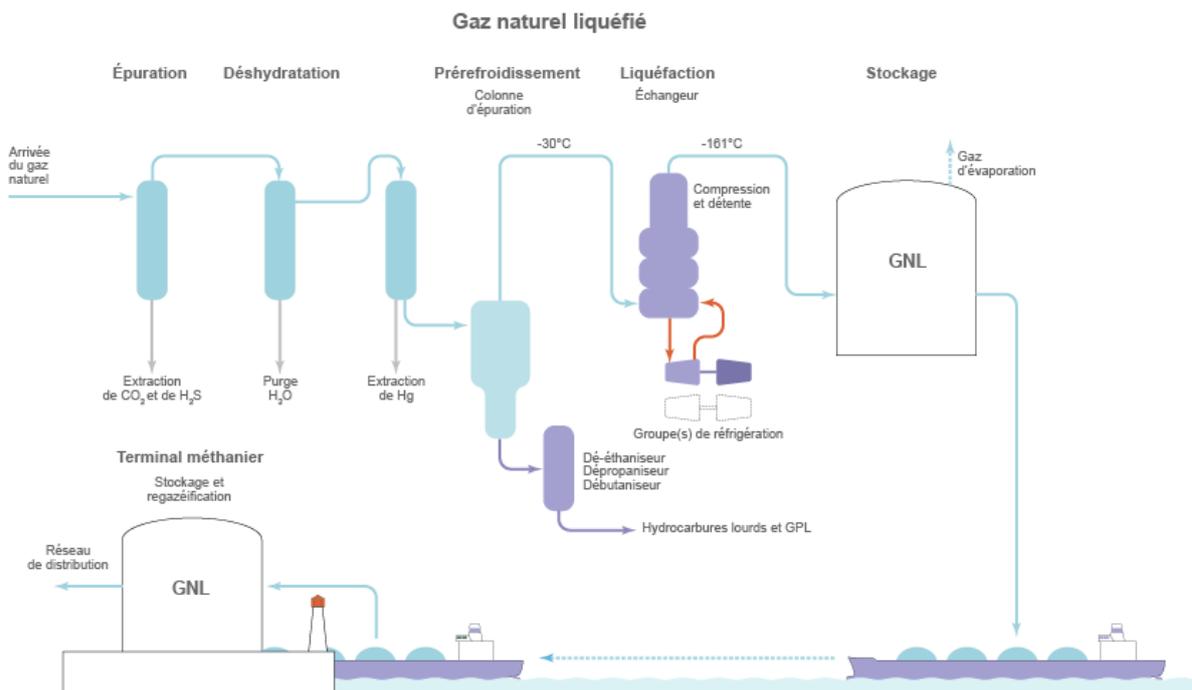


Figure 1.7 Procédés de liquéfaction du gaz naturel [5]

Conclusion :

Le taux de production du GNL est en relation directe avec le rendement des compresseurs. La défaillance d'un seul compresseur entraîne l'arrêt immédiat du train.

Aucun système de secours n'étant prévu, la défaillance du turbocompresseur entraîne l'arrêt immédiat du train de production du GNL, il faut veiller alors pour une disponibilité permanente des trains de production.

Chapitre 2 : Procédés, techniques de contrôle et maintenance des machines tournantes

Introduction

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser aux procédés et techniques de maintenance et de contrôle des machines tournantes en général. Nous commencerons par les méthodes de traitements de surface, une étape importante qui précède le contrôle non destructif pour identifier les défauts, ensuite nous présenterons les méthodes d'analyse de matière et les méthodes de revêtement qu'on peut utiliser sur les machines tournantes.

En dernier lieu, nous parlerons de l'équilibrage des machines tournantes qui est une étape très importante pour garantir l'intégrité du rotor pour des éventuelles compressions.

2.1. Techniques de préparation et traitements de surface

2.1.1. Introduction

Une préparation de surface est une opération qui a pour conséquence de modifier l'aspect ou la fonction de la surface des matériaux afin de l'adapter à des conditions d'utilisation données.

Une préparation adéquate de la surface de la pièce, utilisant la technique adaptée, avant l'application d'un revêtement protecteur, est tout à fait essentielle pour sa résistance dans le temps. Une préparation incorrecte de la surface conduit à des conséquences néfastes qui comprennent:

- L'altération des caractéristiques adhésives entre le revêtement et la surface
- L'altération de l'aspect lisse de la surface
- Le développement de corrosion sous le revêtement

Les techniques de traitements de surface présentées ci-dessus ont pour objectif de préparer la surface avant d'agir avec un revêtement.

2.1.2. Définition d'une surface propre

Une surface sera dite propre lorsque tout ou partie des contaminants indésirables aura été éliminée en vue de satisfaire certaines exigences et rendre les matériaux métalliques aptes à l'application et au traitement visés. Rendre une surface propre est une étape essentielle pour l'obtention d'un traitement de qualité. Une mauvaise préparation de surface est dans la majorité des cas l'origine d'un revêtement de surface défaillant. Une surface propre est enfin

une qualité transitoire et le conditionnement doit être suivi dans les délais les plus brefs par le revêtement.

2.1.3. Les principales opérations de préparation de surface

Les principales opérations de préparation de surface peuvent être classées en deux catégories : les techniques mécaniques (grenailage, sablage, microbillage, polissage) et les techniques chimiques (dégraissage, nettoyage avec jet d'eau à haute pression). Toutes ces opérations sont suivies par le lavage, le rinçage et le séchage.

2.1.3.1. Les techniques mécaniques :

Le traitement mécanique consiste à préparer les surfaces de pièces métalliques avant qu'elles soient soumises à un traitement comme la peinture, la galvanisation, la métallisation et le revêtement.

Le but principal du traitement est d'enlever tout contaminant comme la rouille, les dépôts, la calamine et les vieux résidus. L'autre objectif est de donner une rugosité adaptée à la surface de la pièce pour permettre une bonne accroche de la couche protectrice et donc de renforcer son pouvoir de protection contre la corrosion.

Le traitement mécanique des surfaces à travers de l'air comprimé utilise un jet d'abrasif projeté à grande vitesse vers la surface à nettoyer. En dépit de leur faible masse, les particules abrasives atteignent la surface avec une énergie cinétique élevée en raison de leur grande vitesse qui permet de séparer les contaminants de la surface traitée.

En référence à l'origine de l'énergie cinétique transmise aux particules abrasives, on distingue les techniques à air comprimé (pneumatiques) et les techniques à turbines.

La technique à air comprimé repose sur la pression ou la succion comme source conférant l'énergie, tandis que le principe de fonctionnement des machines à turbines est fondé sur la force centrifuge (éjection), le jet d'abrasif est produit par une roue d'éjection à haute vitesse. Le périmètre de la roue comprend un orifice à travers lequel l'abrasif est dirigé sur la surface de la pièce.

En fonction de l'abrasif utilisé, on cite les techniques de traitement de surface mécaniques les plus répandues dans l'industrie comme suit :

1. Grenailage

Le grenailage est un procédé industriel utilisé pour préparer, ou nettoyer les surfaces de différents matériaux par projection d'abrasif. L'opération s'effectue en cabine entièrement fermée soit manuellement ou automatiquement.

Abrasif utilisé :

La Grenaille de Fonte hématite: alliage ferreux spécialement élaboré en vue d'une utilisation abrasive, les grains sont dits "angulaires" c'est à dire présentant plusieurs arêtes vives.

Sable acier: Grenaille acier moins lourde que la grenaille de fonte.

Grenaille inox: dernière arrivée dans le monde du grenailage (en 2003). Elle génère moins de poussière et semble moins sensible à l'usure.

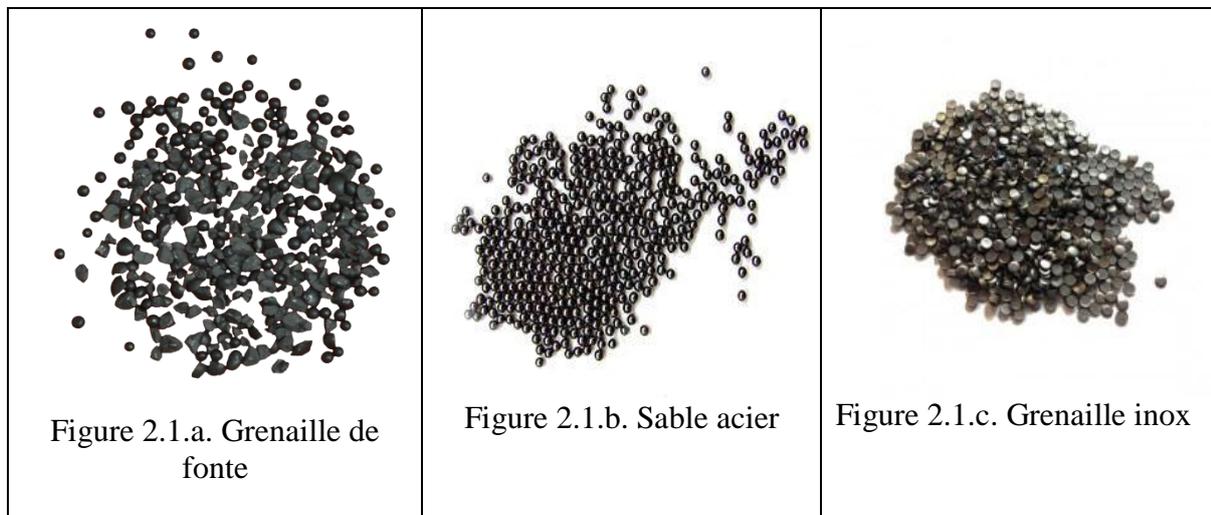


Figure 2.1 Différents abrasifs utilisés par grenailage [8]

2. Sablage

Le terme sablage vient du fait qu'à l'origine on utilisait du sable comme abrasif. Le sablage est une technique industrielle de nettoyage des grandes surfaces en utilisant un abrasif projeté à grande vitesse à l'aide d'air comprimé au travers d'une buse, sur le matériau à décaper.

Abrasif utilisé :

Le sable de Fontainebleau : C'est le plus ancien abrasif pour le sablage mais il a été interdit et abandonné depuis 40 à 50 ans à cause du risque sanitaire important de "silicose"

Le Silicate d'alumine noir utilisé pour les chantiers en abrasif perdu ou pour des opérations de sablage ponctuel. Il a une bonne dureté mais une usure rapide.

Le Corindon: c'est le remplaçant du sable, caractérisé par une bonne résistance à l'effritement.



Figure 2.2 Différents abrasifs utilisés par sablage [8]

3. Microbillage

Le microbillage est un procédé de traitement de surface par impact. Il consiste à projeter des microbilles (généralement en verre) sur une surface, dans le but de la décaper sans l'abîmer. La surface obtenue est satinée brillante.

Abrasif utilisé :

Bille de verre: Abrasif à usage unique. Pour des opérations de mise à blanc, décontamination de l'inox, l'aspect généré par l'impact des billes sur la surface décape et balaye les souillures en laissant un aspect satiné.

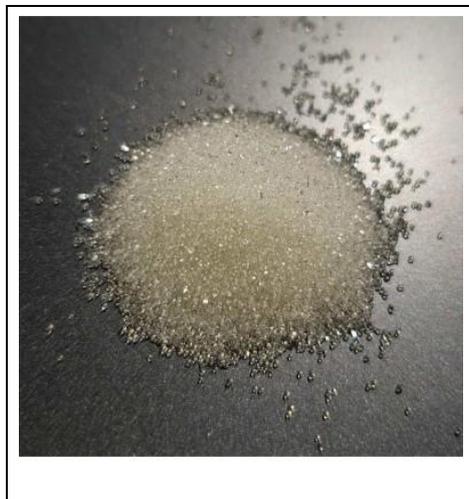


Figure 2.3. Bille de verre [8]

Une autre méthode de traitement de surface mécanique très répandu dans l'industrie qui est :

4. Le polissage

Le polissage mécanique est une technique très ancienne de mise en œuvre de la surface des métaux dont les modes d'action ont été étudiés au début du 20^{ème} siècle pour des applications en métallographie. Il existe plusieurs types de polissage suivant le type d'application visé :

- Le polissage spéculaire ou scientifique auquel appartient la préparation en vue d'observations métallographiques : cet état de surface, dont la rugosité n'excède pas $0.01\mu\text{m}$, permet d'assurer un certain nombre de propriétés comme la résistance au frottement et à l'écoulement des fluides dans les systèmes d'étanchéité, la résistance à la fatigue en liaison avec des phénomènes vibratoires ou la tenue à la corrosion. Il nécessite l'application de techniques spéciales telles que le rodage mécanique et la tribofinition.
- Le polissage industriel qui se décompose en plusieurs stades, le dégrossissage avec des abrasifs agglomérés (bandes et meules) et la finition par différentes techniques telles que le tamponnage (appliqué aux alliages d'aluminium et de cuivre), le brossage (appliqué aux métaux durs) pour avoir un état de finition brillant.

Outils de polissage :

Les principaux outils de polissage sont :

- Les meules sont un mélange d'abrasif et de liant moulé sous pression,
- Les bandes abrasives sont constituées par un support en tissu ou en papier sous forme de bande sans fin et des abrasifs collés dans la position de coupe la plus efficace,
- Les disques en feutre sont fabriqués en laine pressée avec différents grades de dureté avec des abrasifs fins collés sur la tranche,
- Les tampons sont constitués d'un empilement de rondelles de tissu que l'on enduit d'un mélange de graisse et de particules abrasives sous forme de pâtes,
- Les brosses sont composées de fibre métallique (acier et laiton) pour éliminer les traits lissés par disque en feutre ou tampon.

2.1.3.2. Les techniques chimiques

Le traitement chimique de surface est une étape importante de la protection anticorrosion, qui influence la qualité des opérations à effectuer et la qualité du revêtement final. Le processus peut utiliser des préparations à base de solvants ou à base d'eau. Dans un processus de fabrication, le traitement chimique de surface peut être inséré comme une étape :

- Entre des opérations de lavage,
- pour le décapage des agents protecteurs,
- pour le nettoyage avant application d'un revêtement,
- pour le lavage opérationnel ou d'entretien.

L'étape de traitement chimique de surface comprend:

1. Le dégraissage

Le dégraissage est le fait d'enlever les traces de graisse et les huiles superficielles, ainsi que les polluants solides tels que les fines métalliques et les poussières en évitant toute attaque du matériau métallique. Le dégraissage est une étape préparatoire indispensable à une opération de traitement thermique ou de traitement de surface tel que la métallisation ou laser cladding.

L'opération de dégraissage se subdivise en deux grandes classes :

- Un prédégraissage aux solvants qui contribue à éliminer l'essentiel des polluants organiques faisant appel à différents liquides organiques (solvants chlorés, hydrocarbures, dérivés oxygénés)
- Un dégraissage chimique réalisé en solutions alcalines ou neutres ; le mécanisme de dégraissage dans ce cas est la réalisation d'une émulsion par des phénomènes tensioactifs et une saponification avec une finition souvent électrolytique, qui contribue à détruire les résidus de corps gras de faible épaisseur. Cette dernière opération peut être activée par ultrasons, où leur pouvoir de nettoyage est une conséquence de phénomènes de cavitation dus à l'implosion de bulles à proximité des parois. Il y a formation de microjets dirigés à très grandes vitesses vers la surface métallique conduisant à un nettoyage plus poussé.

En plus de ces procédés classiques de dégraissage, il existe des moyens plus modernes tels que l'utilisation de fluides cryogéniques (glace, CO₂), les fluides supercritiques, ou des plasmas froids.

2. Le nettoyage avec jet d'eau à haute pression

La technique par jet d'eau à haute pression est une technologie éprouvée qui est encore fréquemment utilisée. On ne saurait se passer de ce procédé de nettoyage dans de nombreuses applications et tâches. Les appareils de nettoyage à jet d'eau haute pression avec une plage de pression jusqu'à 2500 bars permettent l'élimination efficace de saletés même les plus tenaces.

L'eau claire utilisée pour le jet d'eau à très haute pression passe à travers une pompe à très haute pression pour être comprimée à travers une buse et projetée sur la pièce à usiner. Lors de l'impact du jet d'eau, la saleté ou d'autres résidus se dissolvent. Contrairement au dégraissage, aucun agent de nettoyage chimique ou solvant n'est utilisé.

Le nettoyage à jet d'eau présente plusieurs avantages :

- Respect de l'environnement,
- Pas de solvant chimique ni de produits de nettoyage nécessaires,
- Adapté aux zones difficiles d'accès et autre structure complexes,

- Doux pour le substrat,
- Procédé rapide, efficace et personnalisé.



Figure 2.4. Jet d'eau à haute pression

Nous tenons à rappeler qu'il existe d'autres méthodes de traitement de surface mais nous n'avons présenté que celles qu'on peut adapter à notre étude.

2.2. Méthodes de contrôle non destructif

2.2.1. Introduction

Le contrôle non destructif (CND) est un mécanisme utilisé par les ingénieurs pour détecter les défauts de matériaux et structures, pendant la fabrication ou en service. Typiquement, les méthodes utilisées sont les ultrasons, la radiographie, les particules magnétiques, les courants de Foucault, les pénétrants et méthodes visuelles. Ce secteur important et en pleine croissance est impliqué dans l'application de ces techniques et procédures éprouvées pour toute la gamme des structures d'ingénierie.

Le tableau suivant explique les défauts détectés par chaque méthode :

Tableau 2.1 Défauts détectés par chaque contrôle [12]

Applications	Défauts	PT	MT	RT	UT	ET	VT
Fontes	Porosité	x		x			
	Discontinuités de surface	x	x	x	x		
	Vides			x	x		
	Impuretés, inclusions			x	x		
Pièces forgées	Coutures de surface, pliages					x	
	Inclusions			x	x		
	Eclatements			x	x		
	Fissures	x	x	x	x		
Pièces laminées	Fissures, repliements	x	x		x		
	Marques de laminage	x	x		x		
	Inclusions	x	x		x		
	Défauts internes alignés	x	x		x		
	Alignements d'oxydation	x	x		x		
Soudures	Fusions incomplètes		x	x	x		
	Manques de pénétration		x	x	x		
	Fissures	x	x	x	x		
	Impuretés non métalliques	x		x	x		
	Porosité	x		x	x		
Produits finis	Fissures de TTh	x	x	x	x	x	
	Fissures de rectification	x	x			x	
	Fissures de déformation à froid	x	x			x	

	Fissures du revêtement métallique	X	x	x		x	
Maintenance	Fissures de fatigue	X	x	x	x	x	
	Concentration de contraintes	X	x	x		x	x
	Corrosion				x	x	x
Matériaux composites	Fissures et inclusions			x	x		
	Décollages, délaminages				x		
	Epaisseurs de couches non ferromagnétiques sur substrats ferromagnétiques					x	
	Epaisseurs de couches non conductrices sur substrats non ferromagnétiques					x	

- ET: test par courants de Foucault
- MT: test magnétique
- PT: test par ressuage
- RT: test de radiographie
- UT: contrôle par ultrasons
- VT: contrôle visuel

Référence normative

Les normes définissant l'application du contrôle non destructif, qualification du personnel et la spécification de chaque méthode sont nombreuses, nous citons :

EN 473: Qualification and certification of NDT personal - General principles

ISO 9712: Non-destructive testing - Qualification and certification of personal

IACS: International Association of Classification societies - Rec. No. 69 Guidelines for nondestructive examination of marine steel castings

ASN: SNT-TC-JA American Society for Nondestructive testing Recommended Practice

EN 10160: Ultrasonic testing of steel and flat product of thickness equal or greater than 6 mm (reflection method)

PrEN 1956 Non-destructive testing - Penetrant testing- Magnetic Particle testing

AEND Asociación Española de Ensayos No Destructivos

Qualification du personnel:

Le personnel effectuant les tests doit être qualifié et certifié pour un niveau approprié selon EN 473, ISO 9712 ou autres normes ou systèmes de certification reconnus et équivalents par exemple PCN et NORDTEST. D'autres certifications nationales reconnues peuvent être envisagées.

Le personnel effectuant des essais non destructifs conformément avec cette note de classification doit être qualifié et certifié pour un niveau approprié comme spécifié pour chaque méthode.

Au minimum, les conditions suivantes s'appliquent:

Niveau 1 :

Un individu certifié au niveau 1 a démontré sa compétence à effectuer des contrôles non destructifs conformément à des instructions écrites et sous la supervision de personnel de niveau 2 ou 3. Comme défini sur le certificat, le personnel de niveau 1 peut être autorisé à:

- Mettre en place des équipements de CND,
- Effectuer le test,
- Enregistrer et classer les résultats des tests,
- Rappporter les résultats,
- Le personnel certifié de niveau 1 ne sera pas responsable du choix de la méthode ou de la technique d'essai à utiliser, ni l'évaluation des résultats du test.

Niveau 2 :

Un individu certifié au niveau 2 a démontré sa compétence à effectuer des tests non destructifs selon les normes établies ou des procédures reconnues. Comme défini sur le certificat, le personnel de niveau 2 peut être autorisé à:

- Sélectionner la technique de CND pour la méthode de test à utiliser,
- Définir les limites d'application de la méthode de test,
- Traduire les normes et les spécifications des CND en instructions,
- Configurer et vérifier les paramètres de l'équipement,
- Effectuer et superviser des tests,
- Interpréter et évaluer les résultats selon les besoins en normes, codes ou spécifications,
- Préparer des instructions écrites pour les CND,
- Effectuer et superviser toutes les tâches de niveau 1.

Niveau 3 :

Un individu certifié au niveau 3 a démontré sa compétence à effectuer et diriger des opérations de contrôle non destructif pour lequel il est certifié. Un individu certifié au niveau 3 peut être autorisé à:

- Assumer l'entière responsabilité d'une installation d'essai ou d'un examen de contrôle non destructif,

- Établir et valider les instructions et les procédures relatives aux CND,
- Interpréter les normes, les codes, les spécifications et les procédures,
- Désigner les méthodes d'essai, les procédures et les instructions de CND à utiliser,
- Effectuer et superviser toutes les tâches des niveaux 1 et 2.

2.2.2. Contrôle visuel :

Introduction

L'inspection visuelle permet de caractériser optiquement la surface des pièces à tester. Principalement une sorte d'inspection visuelle doit être effectuée avant toutes les autres méthodes CND.

Le contrôle visuel doit être effectué dans de bonnes conditions assurant avant tout un éclairage suffisant. Le niveau d'éclairage minimum requis est de l'ordre de 350 Lux. L'accessibilité de la partie à examiner doit permettre d'approcher l'œil à au moins 60 cm, sous une incidence de 30°. Lorsque la partie de la pièce à contrôler n'est pas accessible par un examen direct, on utilise un appareil appelé endoscope. Il s'agit d'un appareillage constitué de miroirs et lentilles. La méthode est appelée contrôle par endoscopie.

Équipement pour le contrôle visuel

Les équipements possibles pour les tests assistés sont des miroirs, lentilles, endoscopes ou fibres optiques.

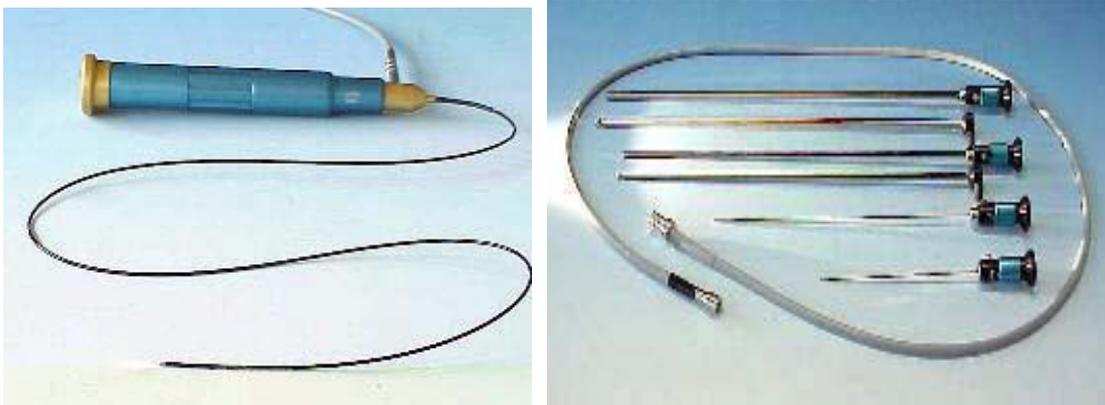


Figure 2.5. Endoscopes (à gauche) et fibroscope (à droite)

L'inspection à distance est également effectuée avec un UAV (véhicule aérien sans pilote), également appelé drone, qui utilise des appareils photo numériques (2D ou 3D), caméras vidéo ou caméras thermiques. Techniquement, l'application est pour les endroits où l'accès direct est compliqué ou coûteux, comme pour les lignes électriques, les ponts et les panneaux photovoltaïques.

Avantages

- Procédé simple,
- Coût de l'opération faible,

Inconvénients

- Automatisation difficile et influence de l'opérateur.

2.2.3. Contrôle par ressuage

Introduction

Apparu dans l'industrie vers 1930, le contrôle par ressuage met en œuvre un liquide d'imprégnation vivement coloré dit « pénétrant » qui doit être appliqué sur la totalité des surfaces à inspecter. Les caractéristiques physico-chimiques de ce liquide lui permettent de pénétrer à l'intérieur des anfractuosités de la matière et de s'y maintenir partiellement après que ce liquide ait été entièrement éliminé de la surface extérieure de la pièce. L'application d'un produit « révélateur » sur cette surface débarrassée de l'excès de pénétrant favorise l'extraction du liquide d'imprégnation contenu dans les défauts débouchant qui « ressue » alors par diffusion dans ce révélateur. Apparaît alors progressivement l'image fortement colorée et dilatée du défaut.

Principe de la méthode

- La méthode consiste à appliquer un pénétrant de faible tension superficielle (de bonne capillarité) sur la surface de la pièce.
- On lui laisse un certain temps de sorte qu'il puisse s'introduire dans les discontinuités aboutissant à la surface
- On élimine ensuite le pénétrant sur la surface mais cette opération laisse cependant en place la partie qui a réussi à s'infiltrer dans les discontinuités.
- Un révélateur, produit opaque et absorbant est appliqué sur la surface, le pouvoir absorbant du révélateur fait que le pénétrant qui a réussi à s'infiltrer dans les discontinuités est alors aspiré vers la surface (effet buvard) et y laisse une trace.
- Cette trace à cause de la diffusion du pénétrant dans le révélateur, est toujours plus importante que la discontinuité.
- L'efficacité de cette méthode de contrôle repose sur la possibilité de détecter les indications de discontinuité afin d'améliorer cette détectabilité.
- Le pénétrant contient en général un produit coloré visible à la lumière blanche ou un produit fluorescent visible à la lumière noire (ultraviolet).



Figure 2.6. Principe du test de ressuage: (A) fissure de rupture, (B) application du pénétrant, (C) l'excès de pénétrant enlevé, (D) l'application du révélateur [12]

Le champ d'application

Le champ d'application du ressuage est très vaste, car le procédé est simple d'emploi et permet de détecter la plupart des défauts débouchant en surface sur les matériaux métalliques non poreux, ainsi que sur les autres matériaux, à condition toutefois qu'ils ne réagissent pas chimiquement ou physiquement avec le pénétrant.

Sa sensibilité est très bonne, puisqu'on peut estimer obtenir une détection fiable de défauts de 80 μm de largeur pour 200 μm de profondeur pour un ressuage coloré pratiqué en atelier sur une surface usinée, alors que le ressuage fluorescent conduit dans les mêmes conditions à une limite de détection de l'ordre de 1 μm en largeur pour 20 à 30 μm en profondeur.

Avantages :

- Simplicité de mise en œuvre
- Localisation précise des défauts et appréciation de leur longueur
- Seule méthode globale en CND autorisant un examen de la totalité de la surface de la pièce sans influence notable sur l'orientation du défaut par rapport à la direction du faisceau de la source utilisée pour l'excitation
- Possibilité de ressuage à chaud (240 C)

Limitations :

- Méthode autorisant uniquement la mise en évidence de défauts débouchant à la surface de la pièce sur des matériaux non poreux
- L'appréciation de la profondeur des défauts n'est pas possible
- L'interprétation dans la phase de révélation est délicate, en particulier pour l'automatisation
- Nocivité des produits
- Influence de l'état de surface
- Procédé lent (10 à 45 min)

Normes :

- Les principaux documents sont :
- NF A 09 120 : essais non destructifs. Principes généraux de l'examen par ressuage
- NF A 09 122 : essais non destructifs. Ressuage. Vérification des caractéristiques des produits de ressuage
- NF A 09 123 : essais non destructifs. Ressuage. Sensibilité et mise en œuvre des produits
- NF A 09 130 : essais non destructifs. Moyens d'examens superficiels. Caractérisation des sources de lumière UV
- NF A 04 161 : Produits de fonderie. Contrôle par ressuage des pièces en acier moulé
- NF A 04 161 : Produits de fonderie. Contrôle par ressuage des pièces moulées en alliages cuivreux à haute résistance

2.2.4. Contrôle par magnétoscopie avec particule magnétique

Introduction

Les premières observations mettant en évidence la possibilité de détection de défauts dans les pièces métalliques à partir d'une excitation par champ magnétique ont été faites en 1920 aux états-unis. La 2^{ème} guerre mondiale a fortement influencé le développement de cette technique qui a fait son apparition dans l'industrie automobile, l'aéronautique et l'industrie de l'armement.

Actuellement, cette méthode reste très largement employée en raison de sa simplicité et de la qualité des services rendus.

Souvent, certaines imperfections de surface restent peu visibles au ressuage, malgré tout le soin apporté. Elles sont trop fermées et ne laissent pas ou peu pénétrer le pénétrant dans les discontinuités. Les anomalies sous-jacentes (défaut non débouchant) ne sont pas détectables par ressuage et peuvent devenir particulièrement dangereuses en évoluant vers l'intérieur de la pièce.

La magnétoscopie est en quelque sorte une méthode complémentaire au contrôle par ressuage.

Principe de la méthode

Cette méthode consiste à soumettre un matériau ferromagnétique à l'action d'un champ magnétique qui va ainsi créer des lignes de forces à l'intérieur du matériau.

Ces lignes vont être perturbées par l'existence d'un champ de fuite dû à la présence d'un défaut de la pièce. Ces champs de fuite pourront être mis en évidence et localisés en saupoudrant sur la surface de la pièce des particules ferromagnétiques qui viendront s'accumuler sur la zone d'attraction que représente le champ de fuite.

Cette méthode n'est utilisable que sur des matériaux ferromagnétiques et permet de détecter des défauts débouchant ou sous-jacents (environ 1mm sous la surface). Il y a nécessité de procéder à une démagnétisation de la pièce après le contrôle.

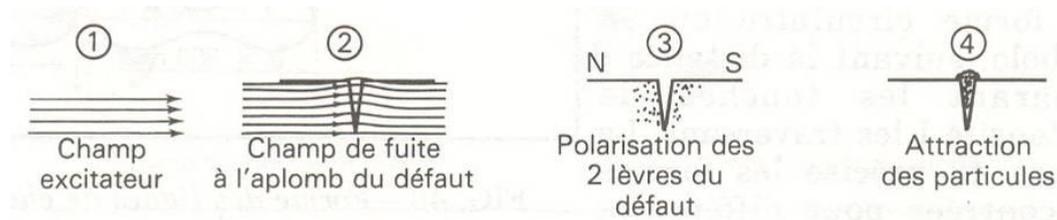


Figure 2.7. Principe de la magnétoscopie [12]

Méthode d'aimantation :

On classe habituellement les méthodes d'aimantation en deux catégories :

- les méthodes directes pour lesquelles l'aimantation de la pièce est réalisée directement à partir d'un champ d'excitation magnétique.
- les méthodes indirectes pour lesquelles l'aimantation de la pièce est réalisée indirectement par l'intermédiaire d'un courant traversant la pièce et donnant ainsi naissance à un champ d'excitation magnétique.

Champ d'application :

- Contrôle de bielles, biellettes ;
- Contrôle de tiges, ressorts ;
- Contrôle de soudures, piquages.

Avantages :

- Simplicité de mise en œuvre
- Localisation précise des défauts de surface ou légèrement sous-jacents et appréciation de leur longueur

Limitations :

- Méthode ne s'appliquant qu'aux matériaux ferromagnétiques
- Sensibilité dépendant de l'orientation des défauts par rapport à la direction générale des lignes d'induction
- Ne permet pas une appréciation de la profondeur et l'interprétation dans la phase de révélation est délicate

- L'automatisation de la phase de révélation n'a pas encore abouti industriellement
- Désaimantation obligatoire des pièces

Normes :

- NF A 09 125 : essais non destructifs des produits métallurgiques. Principes généraux de l'examen de magnétoscopie.
- NF A 04 121 : produits sidérurgiques. Détection des défauts superficiels des produits longs par examen de magnétoscopie.
- NF A 09 130 : essais non destructifs. Moyens d'examen superficiels des produits longs par examen de magnétoscopie.
- NF A 09 170 : essais non destructifs. Magnétoscopie : caractérisation des produits

2.2.5. Contrôle par magnétoscopie avec fuite de flux magnétique

Introduction

La fuite de flux magnétique est une méthode magnétique d'essais non destructifs qui est utilisée pour détecter la corrosion et les piqûres des structures en acier, le plus souvent des pipelines et des réservoirs de stockage. Le principe de base est qu'un puissant aimant est utilisé pour magnétiser l'acier. Aux endroits où il y a de la corrosion ou du métal manquant, le champ magnétique "fuit" de l'acier. Dans un outil MFL (ou Magnetic Flux Leakage), un détecteur magnétique est placé entre les pôles de l'aimant pour détecter le champ de fuite. Les analystes interprètent l'enregistrement sur carte du champ de fuite pour identifier les zones endommagées et estimer l'ampleur de la perte de métal.



Figure 2.8 : Un outil MFL, composé de trois sections principales:
Une section d'entraînement à l'avant de l'outil,
Une partie centrale section magnétiseur
Un enregistreur de données situé vers l'arrière de l'outil

Principe de la méthode

L'idée de base de l'inspection par fuite de flux magnétique est que le matériau ferromagnétique est magnétisé de façon proche à la saturation sous le champ magnétique appliqué. Les principes de base sont montrés sur la figure 2.9. S'il n'y a pas de défaut dans le matériau, la plupart des lignes de flux magnétiques traverseront l'intérieur du matériau ferromagnétique, sinon, par le fait que la perméabilité magnétique du site du défaut est beaucoup inférieure à celle du matériau ferromagnétique lui-même, la résistance magnétique augmentera dans la zone du défaut, de sorte que le champ magnétique dans la région est déformé. Les lignes de flux magnétiques seront pliées, certaines fuiront hors de la surface du matériau et un champ de fuite magnétique se formera au niveau de la zone du défaut. En utilisant des capteurs magnétiques sensibles pour détecter le champ de fuite magnétique, les signaux électriques correspondant peuvent être obtenus. Ensuite, ces signaux détectés sont analysés afin que l'état du défaut puisse être déterminé.

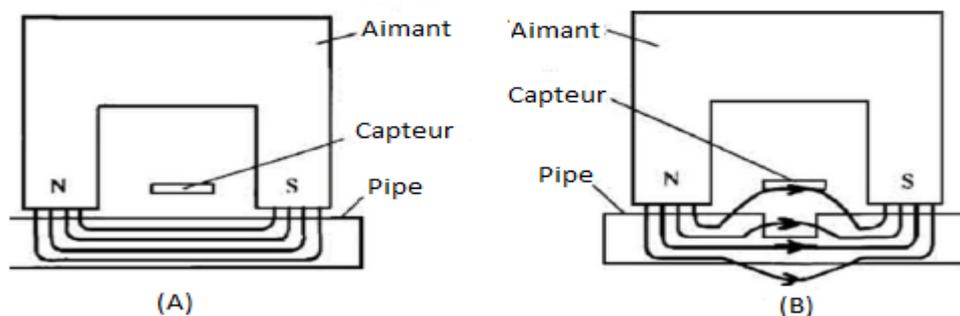


Figure 2.9. Principe de la méthode de fuite de flux magnétique [12]

Champ d'application :

- Contrôle des pipes
- Contrôle tuyauterie
- Contrôle des réservoirs de stockage

Avantages

- Haute sensibilité pour détecter les défauts sur les surfaces internes et externes.
- Détection des défauts jusqu'à une profondeur de 15 mm

Inconvénients

- Il est très sensible à la vitesse de déplacement du véhicule.
- La paroi du tuyau doit atteindre une saturation magnétique complète.
- La hauteur du défaut dépend parfois de l'expérience de l'opérateur.

2.2.6. Contrôle par courants de Foucault

Introduction

C'est une méthode de contrôle qui consiste à créer, dans un matériau conducteur, un courant induit par un champ magnétique variable. Ces courants induits, appelés courants de Foucault, circulent localement, à la surface du matériau. La présence d'une discontinuité à la surface de la pièce contrôlée perturbe la circulation des courants, entraînant une variation de l'impédance apparente de la sonde de mesure.

Les courants de Foucault permettent l'examen non destructif des matériaux conducteurs de l'électricité.

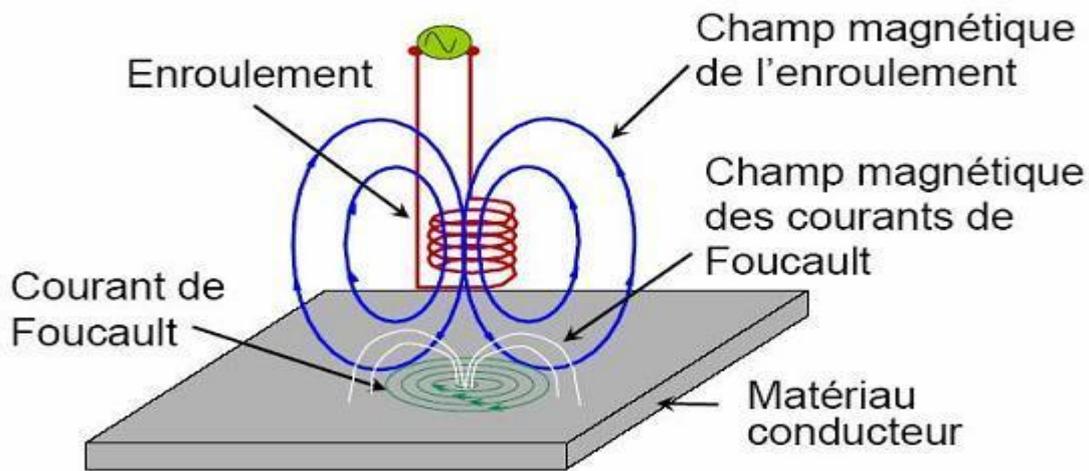


Figure 2.10. Génération des courants de Foucault [12].

Principe de la méthode

Lorsque l'on place un corps conducteur dans un champ magnétique variable dans le temps ou dans l'espace, des courants induits se développent en circuit fermé à l'intérieur de celui-ci : ce sont les courants de Foucault (physicien français 1819 - 1868).

Ainsi une bobine parcourue par un courant variable, alternatif par exemple, génère de tels courants induits qui, créant eux-mêmes un flux magnétique qui s'oppose au flux générateur modifiant l'impédance de cette bobine.

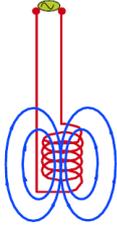
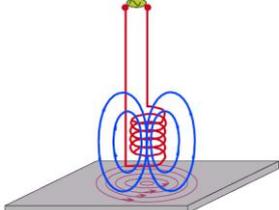
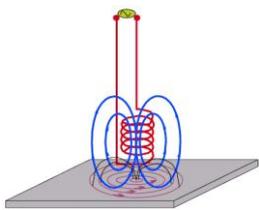
C'est l'analyse de cette variation d'impédance qui fournira les indications exploitables pour un contrôle. En effet le trajet, la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des caractéristiques physiques et géométriques du corps considéré ainsi que des conditions d'excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage).

On conçoit en présence d'un défaut constituant une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants de Foucault qui engendre une variation d'impédance décelable au niveau de la bobine d'excitation (ou de tout autre bobinage situé dans le champ). Ce principe simple est surtout utilisé pour détecter des défauts superficiels dans la mesure où les courants de Foucault ont tendance à se rassembler à la surface des corps conducteurs.

L'observation est réalisée par visualisation sur un oscilloscope des variations de l'impédance électrique de la sonde entre une zone saine et une zone défectueuse.

Cette méthode est applicable sur tous matériaux conducteurs de l'électricité et ne permet de mettre en évidence que des défauts superficiels.

Tableau 2.2. étapes de création des courants de Foucault [12]

<p>Pour générer des courants de Foucault, une sonde est utilisée. À l'intérieur de cette sonde se trouve un solénoïde.</p>	<p>Ce solénoïde est alimenté avec une source de tension alternative.</p>	<p>Un flux magnétique alternatif est donc produit dans et autour du solénoïde.</p>
		
<p>Lorsqu'une plaque conductrice est exposée à une portion de ce flux magnétique alternatif, un courant alternatif est induit dans la plaque. Ce courant est, en fait, un courant de Foucault.</p>		<p>En circulant, les courants de Foucault produisent leur propre flux magnétique (flux secondaire). Le sens des courants de Foucault fait en sorte que le flux secondaire s'oppose au flux initial.</p>
		

Champ d'application

La technique de contrôle par courants de Foucault est utilisée dans l'industrie en fabrication et en maintenance. Les principales applications sont :

- Le contrôle santé (recherche d'éventuels défauts pouvant affecter la tenue mécanique de pièces)
- La mesure d'épaisseur de couches de revêtement,
- Le tri de nuances,
- Le contrôle de profondeur de traitement (par exemple, la profondeur de trempe).

Avantages

- Grande sensibilité de détection ;
- Contrôle rapide ;
- Enregistrement de résultats (suivi dans le temps).

Limitations

- Méthode limitée aux contrôles de matériaux conducteurs ;
- Faible pénétration dans la matière (quelques mm) ;
- Sensible aux phénomènes perturbateurs (écrouissage, dépôts superficiels)
- Nécessité d'un étalon propre à chaque contrôle.

Normes :

- NF A 49 872 : tubes en acier. Méthode de CND. Contrôle automatique par courants de Foucault, pour la recherche des imperfections ou pour la vérification de l'étanchéité à l'aide de bobines encerclantes.

2.2.7. Contrôle par ultrasons

Introduction

C'est une méthode de contrôle qui consiste à transmettre des impulsions acoustiques de hautes fréquences (supérieures à 30 kHz) appelées « ultrasons » dans un matériau.

Ces ondes se propagent dans le matériau.

La présence d'une discontinuité (défaut interne) sur le trajet des ultrasons provoque la réflexion partielle des impulsions.

Le signal réfléchi est recueilli par un capteur appelé « transducteur ultrasonore ».

Cette méthode permet de localiser les défauts internes avec précision et d'en apprécier leur forme avec une bonne rapidité et sans précautions particulières.

Principe de la méthode :

Soit une pièce qui comporterait deux défauts : d1 et d2.

Le processus d'examen se compose de 2 étapes : l'émission puis la réception.

- L'émission : le palpeur est mis en vibration pendant un court instant. Une vibration prend naissance dans la pièce au niveau du contact avec le palpeur et va se propager vers la face opposée. Cette vibration après un certain temps de parcours, va rencontrer le défaut d1. Une réflexion d'une partie du faisceau va se produire pendant que le reste de la vibration va poursuivre son chemin pour rencontrer un peu plus tard d2 (où une seconde réflexion se produira) puis sur le fond de la pièce (où une troisième réflexion se produira).

La réception : l'onde ultrasonore réfléchie par d1, d2 puis par le fond, va se propager vers le palpeur. La première vibration que le palpeur recevra sera celle provenant de d1 (puisque celle-ci a le moins de chemin à parcourir) puis suivra celle venant de d2 et puis celle venant du fond (appelé écho de fond).

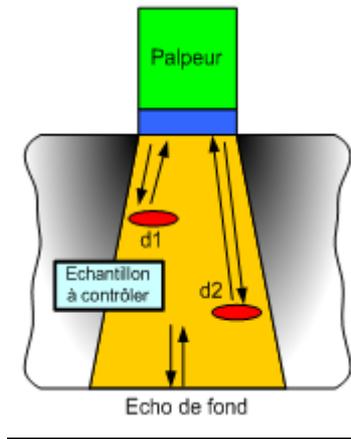


Figure 2.11. Principe d'émission et réception des ondes ultrasonores [12]

Le contrôle par contact :

C'est la méthode la plus employée. On déplace le traducteur directement en contact avec la pièce, en assurant la transmission des ondes US par un couplant (huile, eau, etc.).

Dans cette technique, on distingue 3 méthodes :

- Méthode par résonance (méthode peu utilisée et réservée à la mesure d'épaisseur)
- Méthode par réflexion,
- Méthode par transmission,

Champ d'application

- Le contrôle des soudures,
- La mesure d'épaisseur,
- La recherche des défauts

Avantages :

- Détection des défauts localisés dans le volume de la pièce
- Grande sensibilité, mais qui dépend de l'orientation de la surface du défaut vis-à-vis de la direction principale du signal acoustique
- Peut s'utiliser aussi bien sur des chantiers que dans un atelier
- Méthode qui se prête bien à l'automatisation

Limitations :

- Nécessité d'interposer un milieu de couplage intermédiaire entre le traducteur et la pièce afin d'assurer une continuité de la propagation
- Nécessité d'un personnel expérimenté et qualifié afin d'interpréter correctement la nature des défauts et leurs dimensions
- La mise en œuvre est difficile sur certains matériaux.

Normes :

Norme NF A 09-300 : vocabulaire utilisé en CND par ultrasons

Une norme sur les principes généraux du contrôle par ultrasons est en cours d'élaboration.

2.2.8. Contrôle par émission acoustique

Introduction

L'émission acoustique est un phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires résultant des micro-déplacements locaux internes à un matériau (fissures, inclusions, corrosion, délaminage, etc.). Ce phénomène se manifeste au sein de nombreux matériaux, quand ils sont soumis à des sollicitations d'origines mécaniques, thermiques ou chimiques.

L'application d'une charge et/ou la présence d'un environnement agressif produit des modifications internes telles que l'évolution de fissure, des déformations plastiques locales, de la corrosion et, dans certains cas, des transformations de phase qui génèrent l'émission acoustique. Cela donne, de ce fait, certaines informations sur le comportement interne des matériaux considérés. Les ondes se propagent dans la structure puis sont détectées au moyen de capteurs spécifiques qui permettent la conversion des mouvements de surface du matériau en signaux électriques. Ces signaux sont traités par des instrumentations adaptées en vue d'indiquer et de localiser les sources d'émission acoustique.

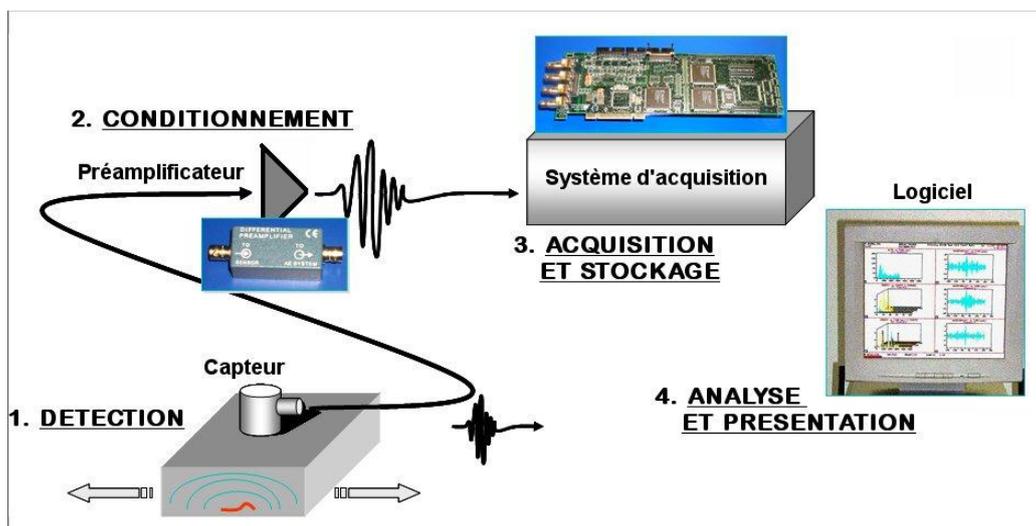


Figure 2.12. Equipements pour le contrôle par émission acoustique [12]

Principe de la méthode:

Lorsqu'une structure est soumise à une force extérieure (contrainte, changement de température, etc.), elle émet des ondes acoustiques (ondes vibratoires) en provenance d'un défaut (fissure, déformation plastique) qui est activé et / ou qui progresse. Ces ondes se propagent dans la structure à une vitesse qui dépend du type de matériau et du mode de propagation vibratoire de la pièce. Ces ondes, connues sous le nom d'émissions acoustiques (EA), sont détectées à l'aide de transducteurs attachés à la surface de la structure. Ces signaux sont généralement faibles. Des capteurs de grande sensibilité et un système de

préamplification électronique sont donc souvent requis afin de pouvoir les détecter et les analyser.

L'émission acoustique résulte donc d'une libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau comportant une dégradation active ou se propageant sous l'effet d'une sollicitation externe.

Le principe de mesure de l'émission acoustique réside dans la détection des ondes ultrasonores générées par l'activité de la structure. La détection est généralement réalisée par des capteurs de type piézoélectrique placés au contact de la structure. L'acquisition et le traitement des données enregistrées sont alors réalisés par le système proprement dit.

Champ d'application

Les champs d'applications de l'émission acoustique sont multiples :

- contrôle des structures industrielles telles que les réacteurs nucléaires ;
- surveillance des installations en fonctionnement ;
- détection des fuites ;
- applicable sur de nombreux matériaux (aciers, composites, céramiques, etc.).

Avantages :

- Evaluation globale de l'état d'un appareil lors d'essais de pressurisation,
- Localisation des sources d'émission acoustique générées par des défauts de la structure.
- le suivi en temps réel de l'évolution des indications, d'où une amélioration de la sécurité des installations et des personnels,
- l'évaluation de l'intégrité globale d'une structure
- le temps de réalisation,

Limitations :

- Applicable uniquement à des pièces sous contraintes
- Etalonnage délicat
- Instrumentation complexe

Normes associées

NF EN 1330-9, Essais non-destructifs - Terminologie - Partie 9 : termes utilisés en contrôle par émission acoustique

NF EN 13554, Essais non destructifs - Émission acoustique - Principes généraux

2.2.9. Contrôle par radiographie

Introduction

La radiographie peut être décrite comme étant un examen qui utilise un faisceau de radiations électromagnétiques pénétrantes dirigé vers la pièce à inspecter. Suivant la nature et la géométrie de la pièce, une portion du faisceau est absorbée et/ou déviée.

En créant une image à partir de l'intensité de la radiation derrière la pièce, des variations d'intensité sont donc observées. Ces variations correspondent à l'ombrage produit par les différentes structures (internes et externes) de la pièce inspectée.

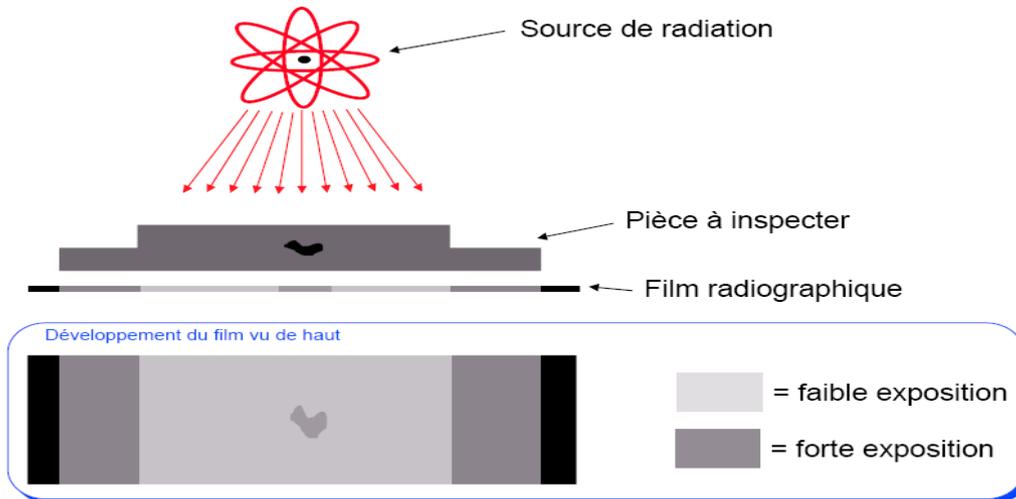


Figure 2.13. Contrôle par radiographie [12]

Principe de la méthode :

La radiographie met en œuvre des sources émettrices de rayonnements ionisants. Ces rayonnements ont une énergie très grande qui leur permet de traverser la matière.

Lors de la traversée de la matière, les éventuels défauts contenus dans celle-ci constituent des obstacles qui absorbent plus aux moins le rayonnement.

Le contrôle détecte la différence d'absorption provoquée par la présence du défaut par rapport au reste de la pièce. Cette différence peut être mise en évidence par : l'impression de films photographiques, l'utilisation d'écrans fluorescents et caméras de télévision, l'utilisation de détecteurs de rayonnements.

Champ d'application :

Recherche d'anomalies internes :

- Pièces moulées : retassures, criques, restes de noyaux...
- Soudures : fissures, manques de fusion, manque de pénétration, soufflures, inclusions, défauts de formes ;
- Tuyauterie : corrosions ou érosions internes, dépôts internes, défauts de soudure ;
- Parois en béton armé : cavité, fissures, armatures; ;

- Vérification d'un assemblage monté en aveugle.

Avantages

- Détection des défauts de surface ou volumique dans tous les matériaux ;
- Energies X disponibles : de quelques Kev jusqu'à 15 Mev ;
- Possibilité de radiographier des formes complexes et des épaisseurs d'acier variant de quelques micromètres à 600 mm ;
- Dimensionnement et identification possible des défauts ;
- Transportabilité (générateurs de rayons X de faibles énergies, appareils de radiographie gamma portatifs d'environ 20 Kg).

Limitations

- La sensibilité de détection des défauts dépend des dimensions de la source et de son énergie, de la position et de l'orientation des défauts dans la pièce, de l'épaisseur de la pièce, de la sensibilité du film...
- Difficulté de localiser les défauts en profondeur ;
- Coûts de fonctionnement élevés (sources de rayonnement, entretien du matériel, films radiographiques, contrôles obligatoires, radioprotection...) ;
- L'interprétation des radiogrammes est souvent délicate et nécessite
- Mesures de protection doivent être constamment prise
- Le temps de pose est long (1/2 h – 20h).

2.2.10. Autres méthodes de contrôle non destructif

1-Contrôle par champ distant

Le test de champ à distance (RFT) est une méthode de test non destructif utilisant un courant alternatif basse fréquence dont la principale application est de détecter les défauts dans les tubes et tuyaux en acier. La RFT est également appelée test de courant de Foucault sur site distant (RFEC ou RFET) .RFET est parfois étendu comme technique électromagnétique à distance, bien que l'on utilise un champ magnétique plutôt que électromagnétique. Une sonde RFT est déplacée vers l'intérieur d'un tuyau et est capable de détecter les défauts intérieurs et extérieurs avec une sensibilité approximativement égale (bien qu'elle ne puisse pas distinguer entre les deux). Les essais par courants de Foucault de sa technologie sœur sont préférés.

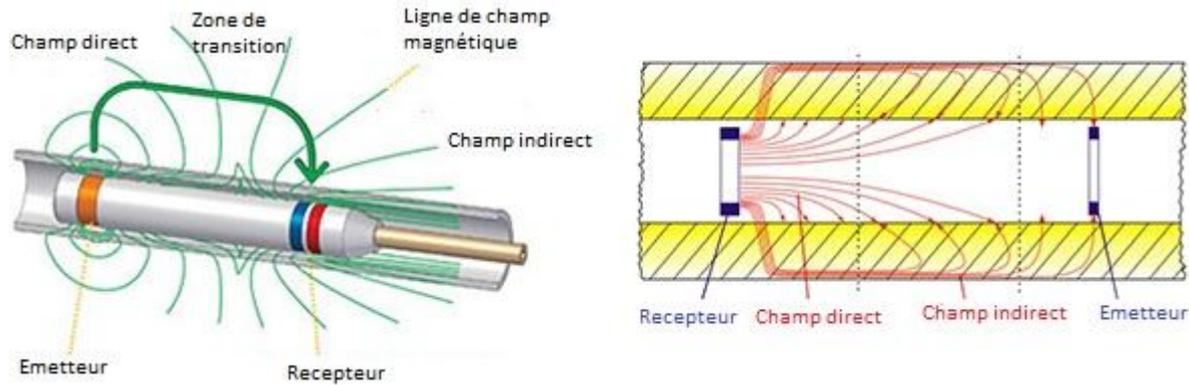


Figure 2.14. Contrôle par RFT [10]

2-Contrôle par mesure du champ en courant alternatif

La mesure du champ en courant alternatif (ACFM Alternating Current Field Measurement) est une technique électromagnétique pour la détection par essais non destructifs et le dimensionnement des fissures de rupture de surface. Il a été dérivé des méthodes utilisées dans les tests par courants de Foucault et fonctionne sur tous les métaux, ferreux ou non ferreux. Comme il ne nécessite pas de contact électrique direct avec la surface, il peut agir sur des revêtements tels que la peinture ou la rouille.



Figure 2.15. Contrôle par ACFM

3-Contrôle par ultrasons multi éléments

Les ultrasons multiéléments (Phased array) sont une méthode avancée de test par ultrasons qui trouve des applications en imagerie médicale et dans les tests industriels non destructifs. Les applications courantes consistent à examiner le cœur de manière non invasive ou à rechercher des défauts dans des matériaux manufacturés tels que des soudures. Les sondes à un seul élément (réseau non phasé), techniquement connues comme monolithiques sondes, émettent un faisceau dans une direction fixe. Pour tester ou interroger un grand volume de matériau, une sonde conventionnelle doit être physiquement balayée (déplacée ou tournée) pour balayer le faisceau dans la zone d'intérêt. En revanche, le faisceau provenant d'une sonde multiéléments peut être focalisé et balayé électroniquement sans déplacer la sonde.



Figure 2.16. Contrôle par PA [11]

4-Contrôle par ondes guidées

Le test d'ondes guidées (GW) est une méthode d'évaluation non destructive. La méthode utilise des ondes acoustiques qui se propagent le long d'une structure allongée tout en étant guidées par ses limites. Cela permet aux ondes de parcourir une longue distance avec une perte d'énergie minimale. De nos jours, GW est largement utilisé pour inspecter de nombreuses structures d'ingénierie, en particulier pour l'inspection de pipelines métalliques dans le monde. Dans certains cas, des centaines de mètres peuvent être inspectés à partir d'un seul endroit. Il existe également certaines applications pour l'inspection des voies de chemin de fer, des barres et des structures en tôle.

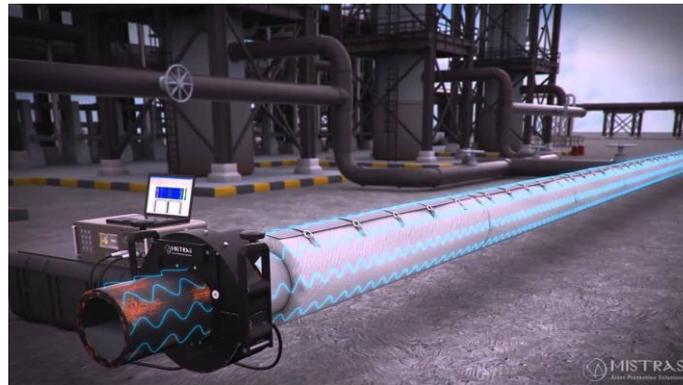


Figure 2.17. Contrôle par GW

2.3. Analyse de la matière par différentes méthodes

2.3.1. Introduction

L'identification positive des matériaux (PMI) est l'une des méthodes de contrôle non destructif les plus spécialisées. Avec l'identification positive du matériau, la composition de l'alliage de matériaux peut être déterminée.

Si le certificat des matériaux d'un équipement est manquant ou si la composition d'un matériau n'est pas clairement définie, PMI propose la solution.

Les spécifications des matériaux utilisés dans l'industrie étant de plus en plus complexes, d'où vient l'intérêt du PMI ou son utilisation est en augmentation depuis plusieurs années.

2.3.2. Différentes méthodes d'identification :

2.3.2.1. X rays fluorescence

Introduction

La XRF est une méthode analytique permettant de déterminer la composition chimique de toutes sortes de matériaux. Les matériaux peuvent être sous forme solide, liquide, en poudre.

La méthode est rapide, précise et non destructive et ne nécessite généralement qu'un minimum de préparation des échantillons. Les applications sont très larges et incluent les industries du métal, du ciment, du pétrole, des polymères, du plastique et de l'alimentation, ainsi que les industries minière, minéralogique et géologique, et l'analyse environnementale de l'eau et des déchets. La XRF est également une technique d'analyse très utile pour la recherche et la pharmacie.

Le temps de mesure dépend du nombre d'éléments à déterminer et de la précision requise. Il varie entre secondes et 30 minutes.

Principe de la méthode

Dans XRF, les rayons X produits par une source irradiant l'échantillon. Dans la plupart des cas, la source est un tube à rayons X mais il pourrait également s'agir d'un synchrotron ou d'un matériau radioactif. Les éléments présents dans l'échantillon émettront des rayons fluorescents d'énergies discrètes (équivalentes aux couleurs en lumière optique) caractéristiques de ces éléments. Une énergie différente équivaut à une couleur différente. En mesurant les énergies (déterminer les couleurs) du rayonnement émis par l'échantillon, il est possible de déterminer quels éléments sont présents. Cette étape s'appelle l'analyse qualitative. En mesurant les intensités des énergies émises (couleurs), il est possible de déterminer la quantité de chaque élément présent dans l'échantillon. Cette étape s'appelle l'analyse quantitative.

Interaction des rayons X avec la matière :

Il y a trois interactions principales lorsque les rayons X entrent en contact avec la matière: la fluorescence, la diffusion de Compton et la diffusion de Rayleigh (voir la figure 2.8). Si un faisceau de photons de rayons X est dirigé vers une plaque de matériau, une fraction sera transmise, une fraction sera absorbée (produisant un rayonnement fluorescent) et une fraction sera renvoyée. La dispersion peut se produire avec une perte d'énergie et sans perte d'énergie. la première est connue sous le nom de dispersion Compton et la seconde dispersion Rayleigh. La fluorescence et la diffusion dépendent de l'épaisseur (d), de la densité (ρ) et de la composition du matériau, ainsi que de l'énergie des rayons X. Les sections suivantes décrivent la production de rayonnement fluorescent et de diffusion.

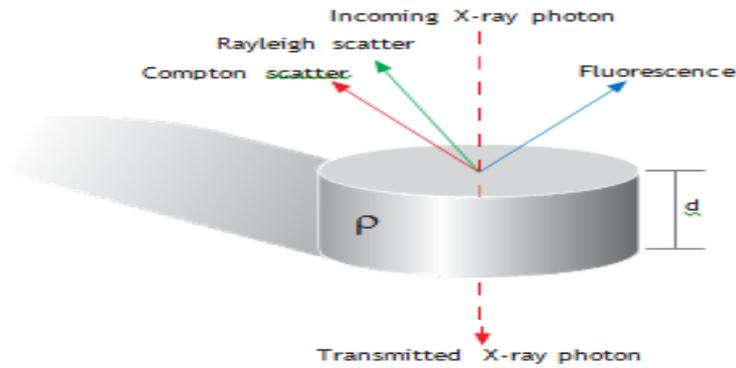


Figure 2.18. Interactions des rayons X avec la matière

Production de rayonnement fluorescent

Le modèle classique d'un atome est un noyau avec des protons chargés positivement et des neutrons non chargés, entourés d'électrons groupés dans des coquilles ou des orbitales. L'orbitale la plus interne s'appelle l'orbitale K, suivie des orbitales L, des orbitales M, etc. au fur et à mesure que l'on se déplace vers l'extérieur. L'orbitale en L comporte 3 sous-orbitales appelées L_I , L_{II} et L_{III} . L'orbitale M a 5 sous-orbitales M_I , M_{II} , M_{III} , M_{IV} et M_V . L'orbitale K peut contenir 2 électrons, l'orbitale L 8 et l'orbitale M. L'énergie d'un électron dépend de la l'orbitale qu'il occupe et de l'élément auquel il appartient. Lors de l'irradiation d'un atome, des particules telles que des photons à rayons X et des électrons d'une énergie suffisante peuvent expulser un électron de l'atome (Figure 2.19).

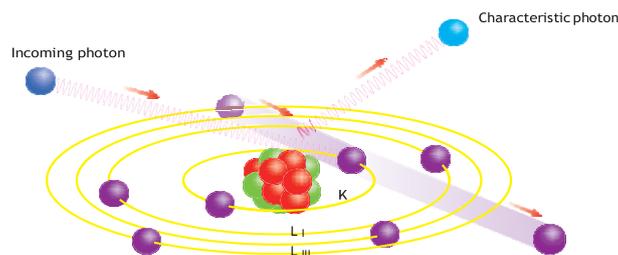


Figure 2.19. Excitation d'un atome

Ceci produit un "trou" dans une orbitale, dans l'exemple (Figure) un trou dans l'orbitale K, plaçant l'atome dans un état excité instable avec une énergie plus élevée. Le «trou» dans l'orbitale est également appelé la vacance initiale. L'atome veut restaurer la configuration d'origine, et cela se fait en transférant un électron d'une orbitale externe telle que la couche L vers le trou de la couche K. Un électron de l'orbitale L a une énergie supérieure à celle d'un électron de l'orbitale K, et lorsqu'un électron de l'orbitale L est transféré à l'orbitale K, le surplus d'énergie peut être émis sous la forme d'un photon à rayons X. Dans un spectre, cela est vu comme une ligne.

L'énergie des rayons X émis dépend de la différence d'énergie entre l'orbitale avec le trou initial et l'énergie de l'électron qui remplit le trou (dans l'exemple, la différence entre l'énergie

du K et du L). Chaque atome ayant ses niveaux d'énergie spécifiques, le rayonnement émis est caractéristique de cet atome. Un atome émet plus d'une seule énergie (ou ligne) car différents trous peuvent être produits et différents électrons peuvent les remplir. La collection de lignes émises est caractéristique de l'élément et peut être considérée comme une empreinte digitale de l'élément.

Pour expulser un électron d'un atome, les rayons X doivent avoir un niveau d'énergie supérieur à celui de l'énergie de liaison de l'électron. Si un électron est expulsé, le rayonnement entrant est absorbé et plus l'absorption est élevée, plus la fluorescence est élevée. Si, au contraire, l'énergie est trop élevée, de nombreux photons «passeront» l'atome et seuls quelques électrons seront éliminés.

Avantage :

- Capacité multi-élémentaire
- Préparation simple d'échantillons
- Faibles risques de contamination
- Test non destructif
- Peu de temps pour obtenir des résultats

Limitations :

- Nécessite d'une formation spécialisée
- Précaution d'exposition au rayonnement
- Impossible de mesurer le rayonnement de tous les éléments, notamment le carbone
- Coût élevé pour les équipements

Plage de détection

La présente méthode est applicable aux éléments suivants : Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, I, Cs, Ba, Ta, W, Hg, Tl, Pb, Bi, Th et U.

Norme

EN-15309. Détermination de la composition élémentaire par fluorescence X



Figure 2.20. Equipement d'analyse par Rayon-X

2.3.2.2 Spectrométrie à émission optique :

Introduction

La spectrométrie d'émission optique est une application instrumentale particulière de l'analyse spectrale qui appartient à la famille des méthodes physiques d'analyse de la matière.

Les **spectromètres à émission optique** analysent les éléments chimiques, et ce sur la plage complète (des valeurs inférieures aux ppm aux valeurs de l'ordre du pourcentage) et qu'il s'agisse de l'analyse de traces de métaux purs ou de l'analyse de métaux à forte teneur en alliages. Tous les éléments pertinents peuvent faire l'objet d'une analyse directe et simultanée.



Figure 2.21. Equipement de spectrométrie à émission optique

Principe de la méthode :

Sous l'action d'un apport d'énergie extérieure, l'un des électrons situés sur les couches périphériques de l'atome (électrons de Valence) peut être transporté sur une orbite extérieure à son orbite normale. L'atome se trouve alors dans un état excité où il possède une énergie plus grande que celle qu'il avait dans son état fondamental. Mais cet état est instable et, très rapidement, l'électron perturbé revient sur son orbite normale, soit directement, soit en passant par un certain nombre d'orbites intermédiaires. Ce retour de l'électron vers une orbite plus proche du noyau s'accompagne de l'émission par l'atome d'un rayonnement électromagnétique.

L'énergie extérieure qui provoque l'excitation de l'atome est appelée le potentiel d'excitation. Elle peut être fournie par l'énergie cinétique d'une autre particule (molécule, atome, électron, ion positif) qui entre en collision avec l'atome considéré ou par l'énergie d'un photon d'un rayonnement extérieur.

Quand cette énergie fournie "arrache" complètement l'électron à l'atome on dit que ce dernier est ionisé; il devient alors un ion positif qui peut, à son tour, être excité et émettre un rayonnement suivant le processus décrit ci-dessus. Pour un grand nombre d'éléments, le potentiel d'ionisation est inférieur ou égal à 10 électrons volts.

Selon la théorie quantique de Bohr, les électrons périphériques d'un atome donné ne peuvent occuper qu'un nombre fini d'orbites et à chacune de ces orbites correspond pour l'atome une énergie bien déterminée. Lorsqu'un électron revient d'une orbite extérieure sur une orbite plus interne, l'atome émet un rayonnement dont la fréquence μ est donnée par :

$$h \cdot \mu = W_1 - W_2$$

h : constante de Planck $6.626 \cdot 10^{-34}$ j/s

w_1 : niveau de départ orbite extérieur

w_2 : niveau de retour orbite intérieur

Source d'excitation :

Les sources spectroscopiques ont été classées selon la nature de l'énergie d'excitation.

- soit thermique (agitation thermique des particules)
- soit électrique (accélération de particules électrisées dans un champ électrique :
décharge électrique sous pression atmosphérique (sources d'arc, d'étincelle).
-

Equipements

Elle se compose de trois éléments de base suivants :

- la source d'excitation apportant à l'échantillon l'énergie nécessaire pour qu'il émette un rayonnement

- le spectromètre proprement dit comprenant :
 - Un système optique décomposant le rayonnement émis par l'échantillon en raies caractéristiques.
 - Un dispositif électronique qui transforme les intensités lumineuses en signaux électriques
- le système de mesure fournissant les données quantitatives de l'analyse à partir des signaux électriques reçus du spectromètre. Le traitement de ces derniers est fait par l'emploi d'un mini-ordinateur.

Avantage

- Détermination de la teneur en carbone (%) des aciers inoxydables ou faiblement alliés.
- Dispositif simple
- Calcule l'équivalent du ferrite de l'acier lorsque la méthode magnétique échoue.

Limitations

- Pas strictement "non destructif" - nécessite une légère préparation et réparation de la surface.
- Impossible de tester des pièces plus petites ou plus minces qu'un centime ou dans des endroits confinés.
- L'analyseur est portable mais pas à main.
- Coût initial de l'instrumentation ICP

Norme

ISO 11885 :2007 : Determination of elements by optical emission spectroscopy

2.4. Méthodes de revêtements

2.4.1. Introduction

Les méthodes de revêtements de surfaces sont nombreuses, chacune adapté pour un domaine précis, nous citons :

- Revêtement obtenus en voie liquide
- Revêtement obtenus en bains fondus
- Revêtement obtenus en phase gazeuse
- Revêtement par projection thermique
- Revêtement par soudage

Les méthodes de revêtement les mieux adaptés à notre sujet sont celles par projection thermique et par soudage, en effet la section suivante va aborder uniquement les revêtements par projection thermique HVOF ainsi qu'une autre méthode de haute technologie dite laser cladding.. Par ailleurs, avant toute intervention sur un rotor d'une machine tournante il faut consulter la norme API 687- Rotor Repair qui explique toute réparation et procédés de maintenance des rotor. Cette norme recommande des techniques de restauration des rotor et

déconseille l'utilisation d'autres techniques, le tableau suivant présente les techniques de réparation des rotor recommandé et non recommandé par la norme API 687.

Tableau 2.3 techniques recommandées et non recommandés par API 687.

Techniques recommandés par API 687	Techniques non recommandés par API 687
Soudage TIG-Tungsten Inert Gas	Soudage MIG- Metal Inert Gas
Soudage SAW	Metallization
The High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) Process.	Plasma Spray
The High Velocity Liquid Fuel (HVLF) Process.	Redressement de l'arbre par rouleaux
The Intermittent Combustion Process.	Chemisage
Laser cladding	Platinage

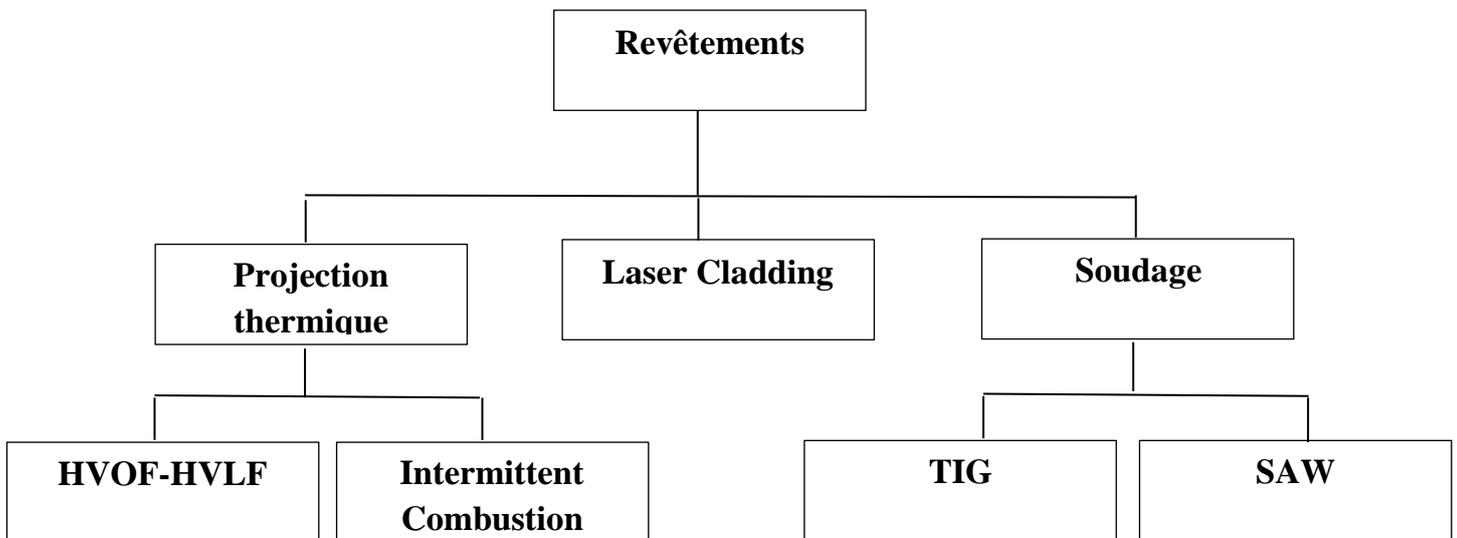


Figure 2.22. Différentes manières de revêtement

2.4.2. Revêtement par projection thermique

La projection thermique (ou à « pulvérisation thermique ») est une technologie permettant d'appliquer à bas coûts et dans le respect de l'environnement des revêtements aux propriétés très variées. Les matériaux déposés sont principalement des métaux, des céramiques, des polymères et des composites avec pour objectif de protéger le substrat contre divers phénomènes tels que la corrosion, l'attaque chimique, l'abrasion, l'usure et le transfert de chaleur. Les revêtements permettent ainsi d'allonger la durée de vie utile de la pièce, d'augmenter son efficacité et/ou de réduire les coûts de maintenance/réparation (par exemple dans l'aviation, l'automobile, la marine, la génération d'électricité). La technique de projection thermique peut également être utilisée pour donner une seconde vie à des pièces usées.



Figure 2.23. photo réel de projection thermique [5]

2.4.2.1. Projection par procédés HVOF&HVLF

Ces procédés sont une technologie ayant moins de 35 ans sur le marché de la projection thermique. Initialement introduite par James Browning en 1982, cette technologie de pointe fait partie des techniques utilisant la flamme comme source de chaleur dans les procédés de déposition. Dans un système typique de projection HVOF (figure 2.24), un carburant (hydrogène, propylène, propane) est brûlé en présence d'oxygène à haute pression dans une chambre de combustion afin de générer une flamme qui atteint une vitesse supersonique. Cette flamme passe par un canon et se dégage dans l'atmosphère ouverte en utilisant une buse de différentes longueurs. La poudre est introduite dans le jet supersonique de façon radiale ou axiale. Les particules de poudre sont fondues, accélérées et dirigées vers la surface à recouvrir. Lorsque les particules impactent, elles se déforment, s'imbriquent et se solidifient à la surface du substrat, générant un recouvrement dense avec un faible pourcentage de porosité dans les dépôts.

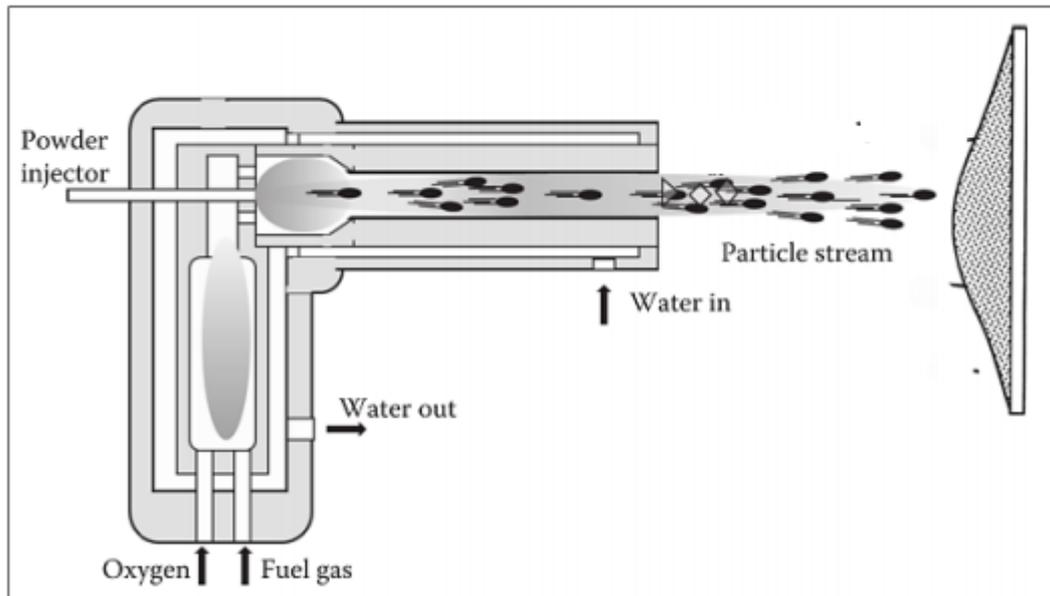


Figure 2.24. Projection HVOF [5]

Dans les procédés de projection thermique HVOF, des vitesses hypersoniques supérieures à 600 m/s et des températures inférieures à 2100 °C sont atteintes par les particules de poudre dans la flamme, ce qui représente un avantage en comparaison avec les autres techniques de projection thermique. Les grandes vitesses donnent une énergie cinétique plus élevée aux particules de poudre projetées, résultant d'un revêtement très dense. Les faibles températures garantissent une faible porosité inférieure à 1 % dans les revêtements.

Influence des principaux paramètres en projection thermique HVOF - HVLF

Dans la projection thermique HVOF, il y a de nombreux paramètres affectant la microstructure et les propriétés des revêtements. Cela concerne les propriétés du substrat, la préparation de surface, les propriétés des matériaux de projection, les caractéristiques de la source de chaleur, les conditions d'opération de la torche de projection, et ainsi de suite. Les principaux paramètres du procédé HVOF, contrôlables par l'opérateur, ainsi que les caractéristiques inhérentes à l'état des particules de poudre dans la flamme supersonique (vitesse et température) sont présentés aux paragraphes suivants. Ils consistent en les paramètres de la torche, le débit de matières premières, les propriétés des particules pendant le vol, la distance de projection, l'angle de projection et la température du substrat.

1. Paramètres de la torche

La torche est l'endroit où se mélangent les gaz ou le liquide avec la poudre alimentée et la combustion se produit. Le principal composant de la torche est la buse. On tient à préciser que, si on utilise le kérosène ou autre fuel à l'état liquide il s'agit bien de la méthode HVLF High velocity liquid oxy fuel

2. Débit de matières premières (Feedstock Spray Rate)

Le débit de matières premières (poudre), dans les différents procédés de projection thermique HVOF, établit le taux de déposition d'un revêtement lors du balayage avec le fusil sur les parois du substrat.

3. Propriétés inhérentes aux particules pendant la projection thermique HVOF

Les principales propriétés associées aux particules pendant la projection HVOF sont leur température (fusion) et leur vitesse (accélération) avant l'impact sur le substrat.

4. Distance de projection

La distance de projection est définie comme la distance existant entre la sortie de la buse et la surface du substrat à traiter. Généralement, pour les procédés HVOF elle se trouve dans une plage de 150 à 300 mm.

5. Angle de projection

Typiquement, les angles de projection utilisés dans les procédés thermiques HVOF sont de $90^\circ \pm 20^\circ$ afin d'obtenir le meilleur rendement de la projection.

6. Température du Substrat

Il a été montré que, sur des substrats à haute température (environ 400- 500 °C), les particules projetées ont tendance à former des disques bien formés et distribués. Tandis que, sur des substrats à température ambiante, les particules ont tendance à casser dans de nombreuses gouttelettes conduisant à la formation de flocs déformés.

Champ d'application

- Soies d'arbre des rotor
- Aubes fixes et mobiles de compresseur
- Étanchéité en nid d'abeille
- Disques de turbine

Avantages :

1. Chauffage des particules plus uniforme et plus efficace en raison de la turbulence élevée ressentie par les particules
2. Temps d'exposition en vol beaucoup plus court en raison de la vitesse élevée des particules
3. Court temps d'exposition aux particules dans l'air ambiant, une fois que le jet et les particules ont quitté le pistolet, ce qui entraîne une oxydation de la surface inférieure des particules
4. Température finale plus basse des particules par rapport aux autres procédés
5. Coût en capital et facilité d'utilisation inférieurs à ceux des autres processus

Limitations :

1. La quantité de chaleur contenue dans le système HVOF est très élevée, il est donc très probable que le substrat soit surchauffé.
2. Le masquage de la pièce reste un gros problème car seul le masquage mécanique est efficace. Il est très difficile et fastidieux de concevoir un masque efficace pour un composant complexe avec des zones qui ne nécessitent pas de dépôt.

2.4.4. Revêtement par Laser cladding

Le revêtement au laser est un procédé de surfaçage au laser dans lequel l'objectif est de recouvrir une partie particulière du substrat (matériau de base) avec un matériau aux propriétés supérieures, produisant une liaison par fusion entre les deux avec un minimum de mélange (dilution). , en d'autres termes, le procédé de revêtement consiste à obtenir une couche de surface homogène avec une forte liaison métallurgique au substrat et un faible degré de dilution.



Figure 2.25. Revêtement laser cladding

Le revêtement laser est utilisé à deux égards: production de pièces en matériaux composites et réparation de pièces usées. Dans la production de pièces en matériaux composites, cette technique est utilisée pour produire des couches de surface dures, résistantes à l'usure et / ou à la corrosion. Parmi les différents traitements de surface utilisés pour améliorer la résistance à la corrosion et à l'usure des matériaux métalliques, le revêtement au laser est une alternative attrayante aux techniques conventionnelles en raison des propriétés intrinsèques du rayonnement laser: énergie d'entrée élevée, faible distorsion, évitement des transformations de phase indésirables et dilution minimale entre le substrat et le revêtement.

La réparation par revêtement est une pratique courante et standard dans les industries des machines tournantes, où la durée de vie des éléments chargés et des pièces essentielles de l'outil peut être prolongée avec succès par la réparation en temps voulu des surfaces endommagées. Les principaux avantages de la réparation à l'aide de la procédure de revêtement sont bien connus: réduction du temps d'immobilisation et avantage économique par rapport à l'usinage d'un nouvel outil ou d'une nouvelle pièce.

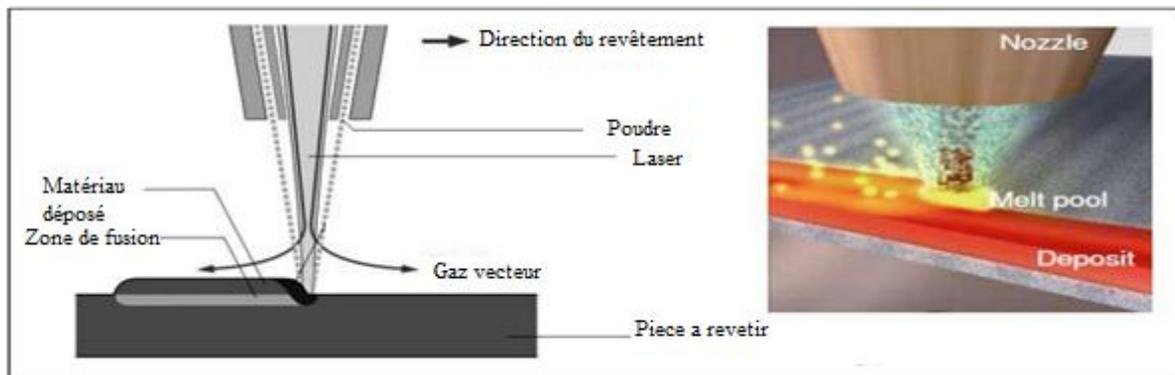


Figure 2.26. Représentation du revêtement LC [6]

Type de laser cladding

Laser cladding à deux étapes

Dans un procédé de revêtement au laser en deux étapes, la première étape consiste à déposer le précurseur de revêtement sur le substrat, tandis que la deuxième étape consiste à faire fondre la couche pré-placée par irradiation laser. Le matériau précurseur peut être fourni sous différentes formes: poudre ou pâte, fil, puce, bande ou feuille, etc. Parmi ceux-ci, le revêtement au laser avec poudre pré-placée est l'une des méthodes les plus simples et les plus courantes. Les poudres sont généralement appliquées sous forme de boues à base de poudre, d'eau et d'un liant, qui est souvent un alcool (par exemple le PVA). L'objectif est de garantir à la fois l'agglomération de la poudre et une bonne liaison entre la couche de poudre pré-placée et le substrat. Cela empêche l'élimination des particules de poudre dues au flux de gaz inerte au cours de la deuxième étape du processus et garantit ainsi la bonne qualité du revêtement final. L'eau et le liant organique s'évaporent respectivement par séchage à température élevée et par fusion laser.

Cela peut provoquer une porosité dans le revêtement final. En variante, le pré-dépôt de poudre peut être réalisé par une technique de revêtement conventionnelle telle que la pulvérisation thermique ou la galvanoplastie.

Au début de l'irradiation au laser, les particules de poudre en surface commencent à chauffer, mais aucune conduction de chaleur n'est autorisée entre les particules en raison du contact limité entre les particules. Par la suite, les particules irradiées fondent et, à l'état fondu, peuvent conduire de la chaleur aux particules voisines: cela permet au front fondu de se propager à travers la couche de poudre isolante (Figure 2.27.a).

Une fois que la masse fondue touche et mouille le substrat (Figure 2.27,b,c,d), l'effet de refroidissement du substrat entraîne une inversion de la propagation du front de fusion. En conséquence, la solidification de la masse fondue commence (Figure 1.9,e), mais l'interface fusion-liquide ne se propage dans le corps du substrat que si une puissance laser et / ou un temps d'interaction supplémentaire sont fournis. Si la source laser continue à irradier la surface de la masse fondue, l'énergie fournie pourrait suffire à faire redescendre l'interface

matière fondue-solide à travers la couche de revêtement et à travers le corps du substrat (Figure 2.27,f). La profondeur finale du front de fusion est donc représentative de la dilution du matériau de revêtement.

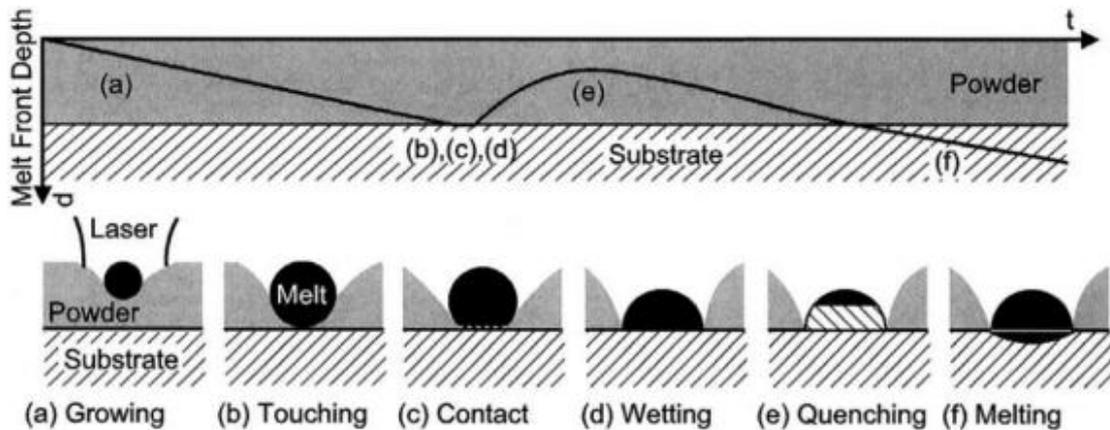


Figure 2.27. Différentes étapes du revêtement LC [6]

La figure 2.27 montre la variation de la profondeur du front de fusion en fonction du temps pour différentes puissances laser: augmentation de la puissance du laser et augmentation du temps d'interaction, ce qui signifie que la vitesse de balayage diminue, la profondeur de fusion (c'est-à-dire la dilution) augmente. Cependant, il est assez difficile de fournir la quantité appropriée de puissance ou de temps afin d'obtenir une liaison par fusion et d'éviter une dilution excessive.

Même si cette technologie garantit une efficacité matérielle élevée, les exigences énergétiques de la méthode de la poudre pré-placée sont beaucoup plus élevées que celles de la technique de la poudre soufflée. Pour ces raisons, en plus du fait que deux étapes sont nécessaires, un procédé de revêtement au laser en une étape est généralement préféré.

Laser cladding à une seule étape

Le revêtement laser avec alimentation en poudre est la méthode en une étape la plus répandue en raison de la large gamme de matériaux et d'alliages disponibles sous forme de poudre et du bon rendement de couplage entre la poudre elle-même et le faisceau laser. Dans un équipement typique de revêtement au laser à poudre soufflée (figure 2.28), trois composants principaux sont présents: le système laser, le système robotique à commande numérique par ordinateur (CNC) et le système de distribution de poudre.

Le but du système laser est de fournir l'énergie nécessaire au processus par le biais d'un faisceau laser. Les systèmes de focalisation les plus courants produisent des faisceaux circulaires, linéaires ou rectangulaires. Les faisceaux circulaires ont une intensité qui est fonction de la distance radiale, tandis que les faisceaux linéaires et rectangulaires ont une intensité uniforme. La forme du faisceau est contrôlée par l'optique du miroir de focalisation ou de la lentille et la zone du faisceau (ou la taille du point) peut être modifiée en faisant varier la distance de travail entre le dispositif de focalisation et la surface du composant.

Habituellement, le faisceau laser est perpendiculaire à la surface du substrat. Différentes configurations sont possibles, mais cela influe sur l'efficacité énergétique du processus car l'absorption laser de la plupart des matériaux est fonction de l'angle d'incidence entre le faisceau laser et la surface du bain de fusion.

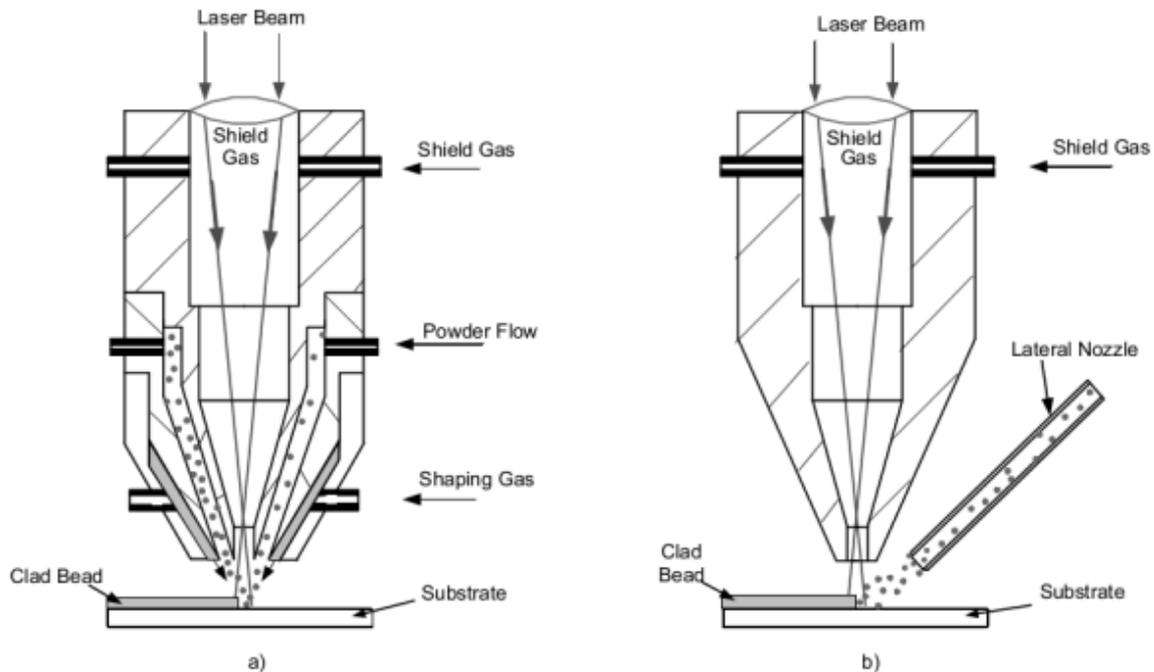


Figure 2.28. Laser cladding a deux et une seul étape [6]

Le système robotique CNC assure le mouvement relatif du composant et du faisceau laser. Deux configurations possibles existent: soit l'éprouvette est fixe et la tête laser ainsi que le système d'alimentation se déplacent grâce à un couplage bras-robot CNC; alternativement, l'échantillon est collé à une table CNC qui se déplace par rapport au système de délivrance de poudre laser.

Le système d'alimentation en poudre doit être capable de délivrer la quantité appropriée de poudre dans la zone d'interaction produite par le laser. La poudre peut être délivrée par gravité ou par un système sous pression de gaz. Ce dernier est préféré car il permet un revêtement dans n'importe quelle orientation et empêche l'oxydation: en fait, avec le gaz vecteur, un gaz de protection tel que l'hélium ou l'argon est délivré à la zone de revêtement afin de protéger le bain fondu de l'atmosphère.

Le processus commence par le faisceau laser, qui irradie une fine couche de substrat pour former un bain de fusion.

Ensuite, la poudre est injectée dans la zone de revêtement, est capturée par le bain de fusion et fond. Après cela, le système de distribution de poudre laser poursuit son chemin: le bain de fusion commence le processus de solidification le long du gradient thermique et le revêtement commence à se former.

La condition qui détermine si la poudre livrée adhère à la zone de réparation pour former le revêtement ou non est définie par le type d'impact. Les types d'impact possibles sont énumérés ci-dessous et sont influencés par l'absorption d'énergie laser par le substrat et les particules de poudre:

- Poudre solide - surface solide: la poudre et le substrat n'absorbent pas assez d'énergie laser pour fondre et rester à l'état solide. La particule de poudre est déviée et se perd.
- Poudre solide - surface liquide: la particule de poudre, qui n'absorbe pas assez d'énergie pour fondre, est capturée par le bain fondu formé.
- Poudre liquide - surface solide: la particule de poudre fond lors de l'injection et adhère à la surface solide du substrat, ce qui entraîne un captage de la poudre.
- Poudre liquide - surface liquide: le substrat et la particule de poudre fondent en aboutissant au captage.

Champ d'application :

- Arbre de transmission
- Rotor de compresseur et turbine
- Tiges de piston
- La soupape d'échappement
- Pièces en fonte

Avantages :

- Meilleure technique pour le revêtement de toute forme => augmenter la durée de vie des pièces d'usure.
- Dispositions particulières pour la réparation de pièces (idéal si le moule de la pièce n'existe plus ou si le temps nécessaire à une nouvelle fabrication est trop long).
- Bien adapté pour une fabrication proche de la forme nette .
- Taux de refroidissement élevé => microstructure fine.
- La partie construite est exempte de fissure et de porosité.

Limitations :

- coûts d'équipement et de fonctionnement relativement élevés;
- la résistance de l'industrie causée par des expériences passées négatives avec des lasers précoces et peu fiables;
- un besoin de recyclage;

2.5. Equilibrage des rotor

2.5.1. Définition

L'équilibrage est une procédure par laquelle la répartition de la masse d'un rotor est contrôlée et, si nécessaire, ajustée pour garantir que les vibrations de l'arbre sur les paliers à une fréquence correspondant à la vitesse de fonctionnement se situent dans les limites spécifiées.

L'équilibrage à grande vitesse se concentre sur le système formé par le rotor et ses paliers. L'objectif est de tester le comportement dynamique dans son ensemble, non seulement en prêtant attention au déséquilibre du rotor, mais également à sa flexibilité et à la performance des paliers du point de vue des conditions de rigidité et d'amortissement.

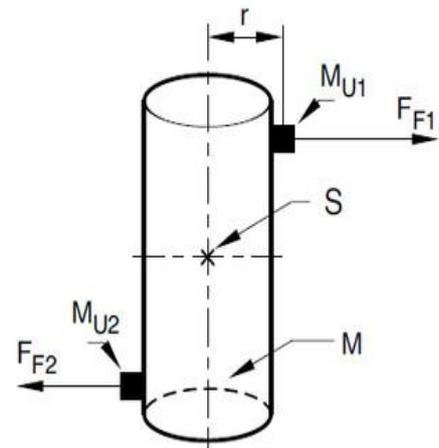
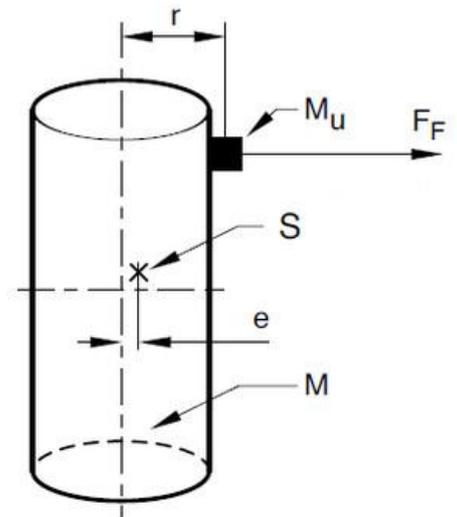
Les causes du déséquilibre sont les suivantes :

- Répartition asymétrique des masses par défaut de concentricité de fabrication
- Défaut d'alignement
- Défaut de concentricité dans les roulements

2.5.2. Déséquilibre statique

Le centre de gravité d'un rotor se trouve en dehors de l'axe de rotation

- Il est mesurable quand l'élément n'est pas en mouvement.
 - Il exerce pendant la rotation une force centrifuge perpendiculaire à l'axe de rotation.
 - Il peut être supprimé par un équilibrage en 1 plan.
- La situation du plan est sans importance. Un Moment de déséquilibre peut subsister après l'équilibrage statique.



- M_u = Masse du déséquilibre (en g)
- r = Distance entre le déséquilibre (M_u) et l'axe de rotation (en mm)
- M = Masse du rotor (en kg)
- e = Distance entre le centre de gravité et l'axe de rotation (en μm)
- S = Centre de gravité
- F_F = Force centrifuge
- Valeur du déséquilibre statique: $D = M_u \cdot r = M \cdot e$
- Unité du déséquilibre: $[D] = \text{g} \cdot \text{mm} = \text{kg} \cdot \mu\text{m}$

2.5.3. Moment du déséquilibre

Le centre de gravité se trouve sur l'axe de rotation

- mesurable que si le rotor est en rotation
- provoque un moment de flexion lors de la rotation
- peut seulement être supprimé par équilibrage en 2 plans.

M_{U1}, M_{U2} = Masses des déséquilibres (en g)

S = Centre de gravité

r = Distance entre les déséquilibres (M_{d1} et M_{d2}) et l'axe de rotation (en mm)

M = Masse du rotor (en kg)

F_{F1}, F_{F2} = Forces centrifuges

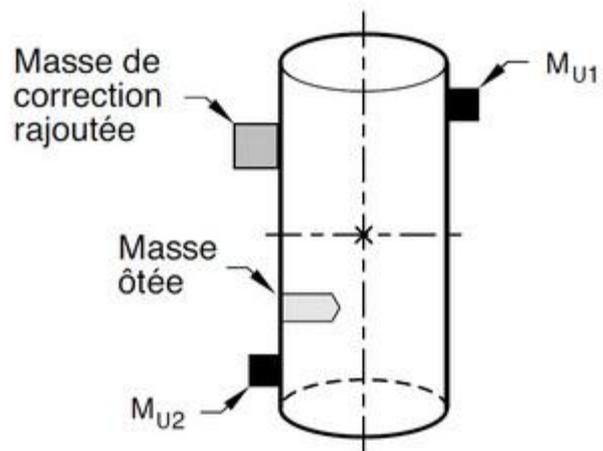
Le déséquilibre statique est une combinaison entre le déséquilibre statique et le moment du déséquilibre

2.5.4. Méthodes d'équilibrage

L'équilibrage sert à corriger ou répartir les masses asymétriques d'un rotor.

Cela peut être réalisé par:

- Rajout de masse, ex: équilibrage des roues de voiture
- Enlèvement de masse, ex: par perçage
- Transfert de masse, ex: anneaux, vis.



Correction du déséquilibre

1. Equilibrage en 1 plan (statique)

Correction de la part statique d'un déséquilibre

- Le centre de gravité du rotor est repositionné sur l'axe de rotation (Excentricité $e = 0$)
- La part moment du déséquilibre dynamique persiste.

2. Equilibrage en 2 plans (dynamique)

Correction total du déséquilibre (statique et moment)

- La situation des plans est en principe sans importance (mais un grand écart est favorable).

Chapitre 3 : Etude comparative des revêtements par HVOF et Laser Cladding

Introduction

Vu l'impossibilité d'intervenir sur le rotor du compresseur réparé pour vérifier la qualité du revêtement, l'idée est de faire l'étude sur des échantillons avec une constitution chimique similaire à celle du rotor revêtu avec une poudre de constitution chimique similaire ou se rapprochant de celle faite sur le rotor. Nous avons préféré faire ceci sur deux échantillons ; le premier rechargé avec HVOF et le deuxième avec Laser Cladding et comparer les deux méthodes du point de vue adhérence, présence de défauts et résistance à l'usure.

A travers ce projet nous avons eu des formations sur beaucoup d'équipements et procédés utilisés dans le domaine de la réparation des machines tournantes et contrôle de qualité.

3.1. Analyse chimique des échantillons

La méthode utilisée pour l'analyse chimique de la matière pour les échantillons et la poudre est : la spectroscopie à émission optique

Echantillon 1 :

Tableau 3.1 Analyse chimique de l'échantillon 1

	Fe	C	Si	Mn	Mo	Cr	Ni
Moyenne %	97.23	0.4	0.45	0.8	0.004	0.02	0.82
	Al	Cu	Co	Ti	V	W	S
Moyenne %	0.03	0.009	0.0030	0.0011	0.002	0.024	0.01

Echantillon 2 :

Tableau 3.2 Analyse chimique de l'échantillon 2

	Fe	C	Si	Mn	Mo	Cr	Ni
Moyenne %	97.6	0.45	0.35	0.75	0.005	0.03	0.74
	Al	Cu	Co	Ti	V	W	S
Moyenne %	0.06	0.01	0.004	0.0015	0.003	0.03	0.01

3.2. Revêtement des échantillons

3.2.1. Paramètres du revêtement

Echantillons 1 :

Tableau 3.3 Paramètres du revêtement de l'échantillon 1

Paramètres de projection		Condition de projection	
Pression d'air dans la chambre de combustion (MPa)	4	Débit CH ₄ (l/min)	189
La vitesse des particules (mm/s)	735	Débit O ₂ (l/min)	287
Vitesse d'avance de la buse (mm/s)	5	Angle de projection	90°
Vitesse de rotation de la pièce (RPM)	60	Etat de la matière de projection	Poudre

Echantillon 2 :

Tableau 3.4 Paramètres du revêtement de l'échantillon 2

Paramètres du laser		Paramètres de poudre	
distance focale [mm]	7	vitesse d'avance de la poudre [g/min]	40
ouverture de la buse [mm]	10	diamètre de la buse à poudre [mm]	3
débit d'argon [l/min]	15	l'angle d'injection par rapport à la pièce : - faisceau laser - poudre	90°
puissance du laser [W]	4000		45°
vitesse d'avance [mm/min]	1500		
chevauchement entre les pistes [%]	50		

3.2.2. Constitution chimique de la poudre du revêtement

La constitution chimique du revêtement est la même pour les deux échantillons :

Tableau 3.5 Analyse chimique de la poudre du revêtement

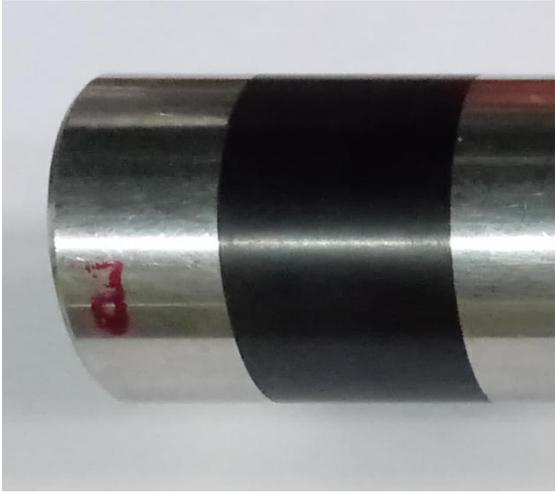
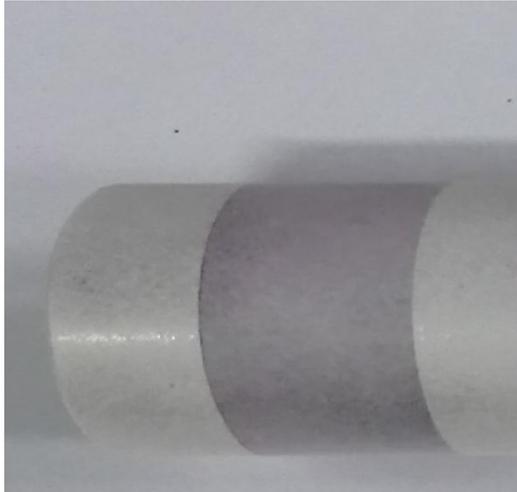
	Fe	C	Si	Mn	Mo	Cr	Ni
Moyenne %	80.84	0.41	0.45	0.7	0.014	15.68	2.01
	Al	Cu	Co	Ti	V	W	S
Moyenne %	0.02	0.01	0.0025	0.0017	0.005	0.03	0.02

3.3. Contrôle non destructif des échantillons

Echantillon 1 :

Contrôle par ressuage :

Tableau 3.6 Contrôle par ressuage de l'échantillon 1

Condition du test	Résultat du test
<p>Objectif : Déceler les anomalies débouchant en surface Temps de pénétration : 20 minutes Pénétrants : Sherwin DP55 Révéléateur : Sherwin D100</p> 	<p>Résultat : Aucune anomalie décelée, Pas de porosité surfacique trouvée.</p> 

Contrôle par ultrason :

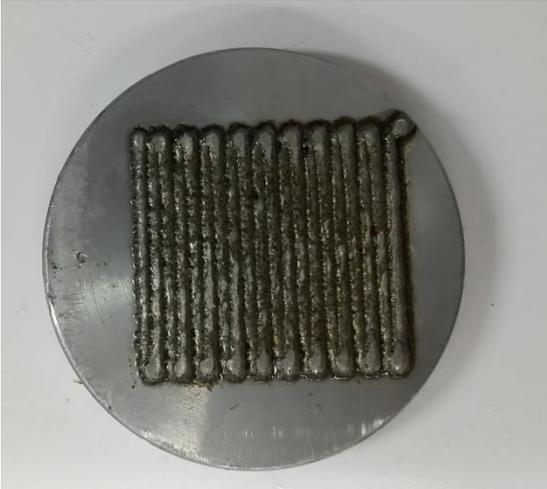
Tableau 3.7 Contrôle par ultrason de l'échantillon 1

Condition du test	Résultat du test
<p>Injecteur d'impulsion : Sofranel Diamètres d'émetteur et récepteur : 9.5 mm Couplant : Eau douce Fréquence : 200 Hz</p>	<p>Résultat : Aucun défaut trouvé, Pas de porosité ou vide trouvé entre les deux couches.</p>

Echantillon 2 :

Contrôle par ressuage :

Tableau 3.8 Contrôle par ressuage de l'échantillon 2

Condition du test	Résultat du test
<p>Objectif : Déceler les anomalies débouchant en surface Temps de pénétration : 20 minutes Pénétrants : Sherwin DP55 Révélateur : Sherwin D100</p>	<p>Résultat : le test a donné de mauvais résultats vu que la surface du revêtement n'a pas été usinée</p>
	

Contrôle par ultrason :

Instrumentation :

Un générateur d'impulsion conventionnel de type SOFRANEL, Modèle 5800Pr, est utilisé pour fournir une énergie, qui est convertie en signal ultrasonore dans le matériau piézoélectrique du transducteur émetteur de type Panamertics V413.

Expérimentation :

Pour caractériser la taille et la forme effectives des défauts introduits, nous avons utilisé une technique conventionnelle basée sur l'imagerie ultrasonore. Cette technique est réalisée à l'aide d'un système d'inspection en immersion en utilisant la méthode par transmission dont la configuration expérimentale est illustrée par la figure 3.1.

Le balayage automatique est réalisé en transmission à l'aide d'une cuve, utilisée spécialement pour le contrôle des petites pièces plates ou cylindriques. Elle est équipée de trois chariots qui se déplacent suivant trois axes (x, y, z). Deux transducteurs ultrasonores identiques de fréquence 200 Hz et de diamètre 9,5 mm sont fixés sur des supports sonde qui se déplacent avec un pas de 5 mm et qu'on peut régler à l'aide de deux pignons ; l'un pour l'orientation verticale et l'autre pour l'orientation transversale. Pour assurer la propagation des ondes

ultrasonores, on a utilisé comme milieu élastique l'eau douce dans lequel la pièce et les sondes sont immergées.

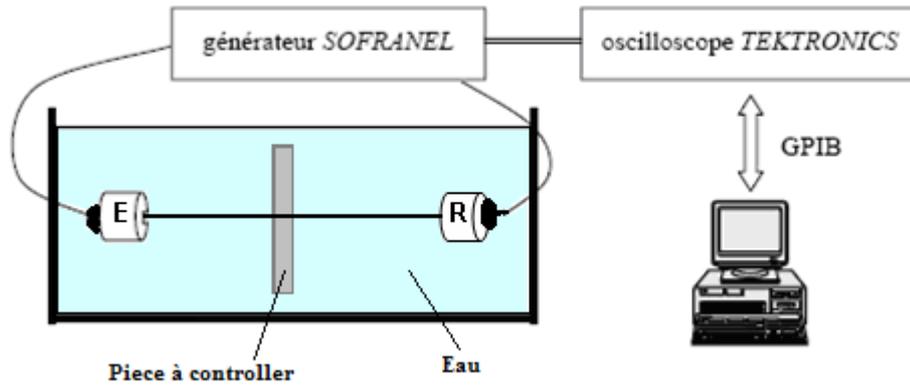


Figure 3.1. Configuration expérimentale du test [7]

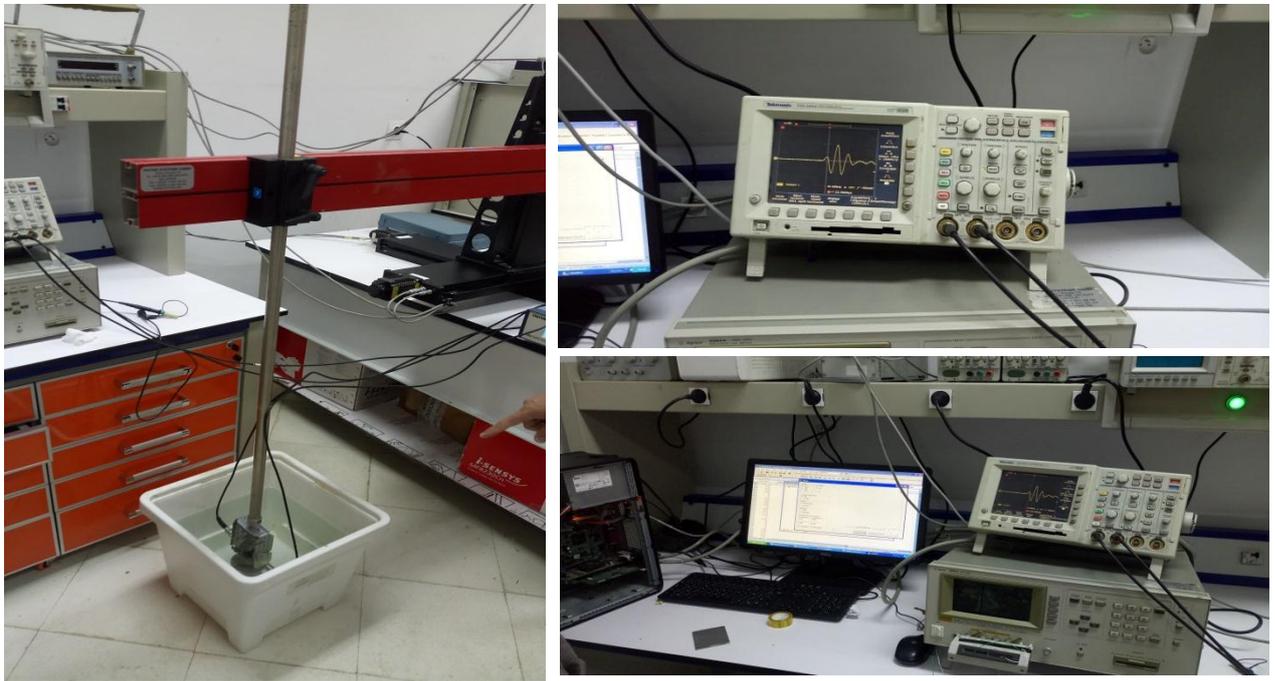


Figure 3.2. Photos réelles du contrôle par ultrason de l'échantillon 2

Les transducteurs sont reliés à un générateur d'impulsions ultrasonores, lui-même relié à un oscilloscope. Les signaux visualisés sur l'oscilloscope TEKTRONICS sont récupérés sur ordinateur par le biais d'une liaison GPIB.

Les dimensions du revêtement sur la pièce sont de 40×40 et lors de cette expérience nous avons balayé une surface de 65×65 avec un pas de 5 mm.

Résultat :

La figure 3.3 l'image C-scan de notre échantillon

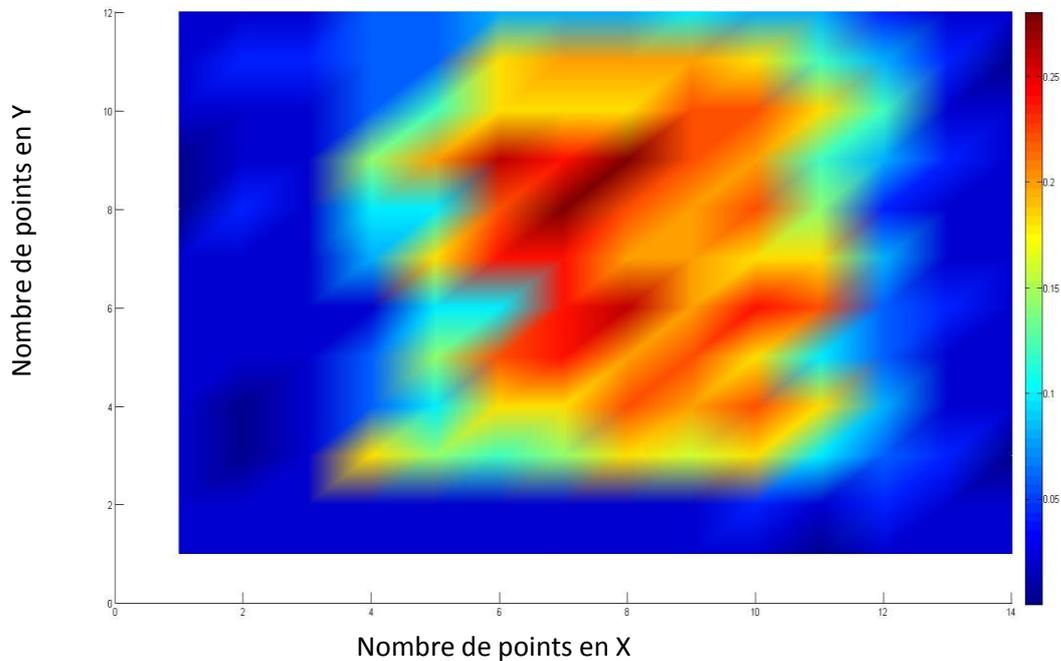


Figure 3.3. Image C-scan e l'échantillon

Discussion :

Vu les résultats obtenus, on remarque que l'image C.scan présente une zone bleue sombre et une zone rouge orangé. La différence de couleur à chaque position de la surface de balayage nous donne l'information sur l'intensité du signal transmis correspondant. La couleur bleue sombre représente l'endroit où l'intensité de signal transmis est pratiquement nulle (présence de défaut) alors que la couleur rouge représente l'endroit où l'intensité de signal transmis est maximale. Donc pour notre cas l'échantillon donne un très bon résultat et aucune tache bleu détecter, ceci veut dire que la pièce ne présente aucun défaut.

3.4. Observation microscopique des échantillons

L'observation des échantillons a été faite avec un microscope électronique à balayage de la marque ZEISS ou nous voulons voir l'adhérence du revêtement sur le substrat, l'homogénéité du mélange de la poudre, vérifier s'il existe des porosités ou microporosités ou des défauts, l'épaisseur du revêtement ainsi que le spectre en balayant toute la zone du substrat et du revêtement.

Echantillons 1 :

1. Adhérence du revêtement sur le substrat

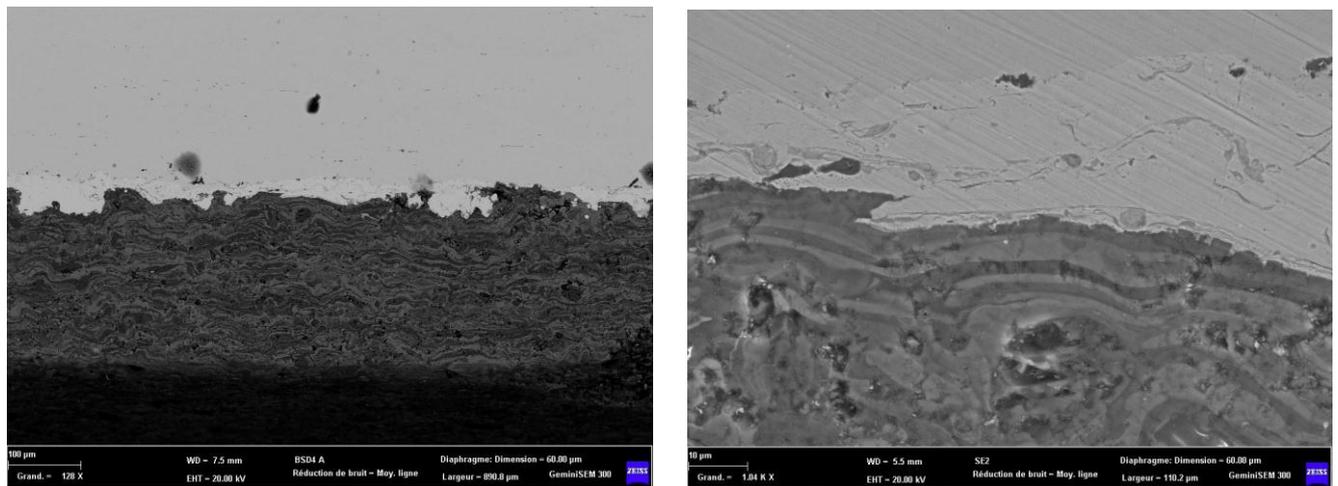


Figure 3.4. Observation de l'adhérence de l'échantillon 1

Discussion :

Nous remarquons une bonne adhérence entre le revêtement et le substrat, aucun vide ou microporosité dans l'interface à signaler.

2. Homogénéité de l'échantillon

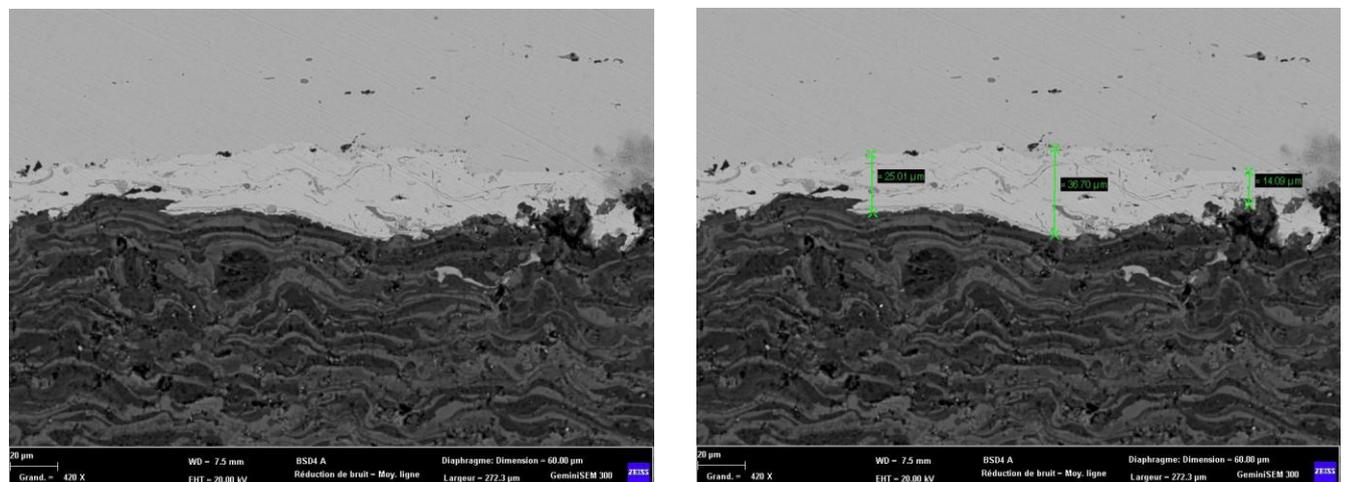


Figure 3.5. Observation de l'homogénéité de l'échantillon 1

Discussion :

Nous remarquons une bonne homogénéité des constituants chimiques par contre une zone existante entre les deux couches d'une épaisseur maximale de $36.70 \mu\text{m}$ a été visualisée. Cette zone est au faite une couche d'accroche métallique pour améliorer l'adhérence du revêtement sur le substrat. Principalement cette couche est du NiCr, NiAl.

3. Porosités ou défauts

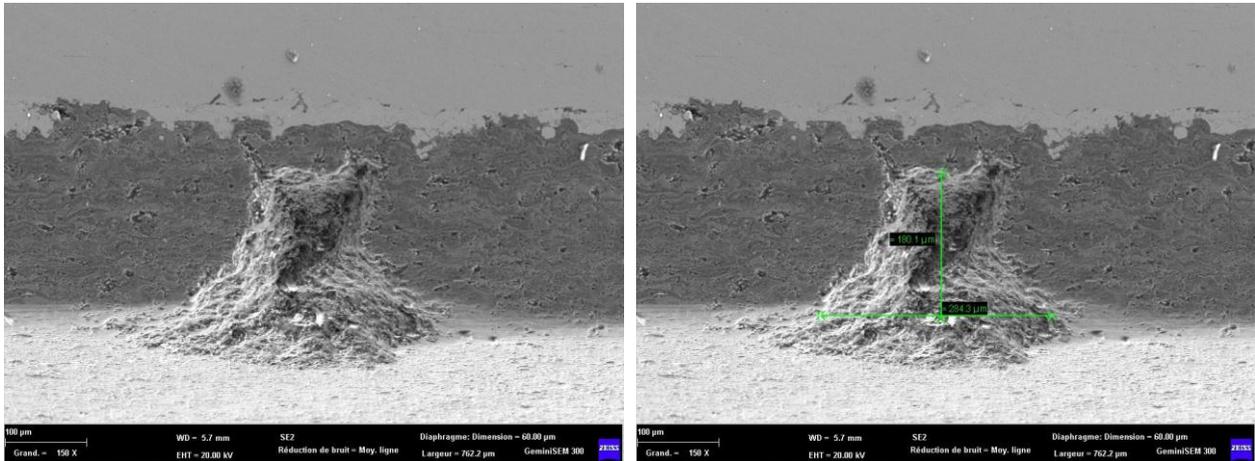


Figure 3.6.Observation de défauts de l'échantillon 1

Discussion :

Nous remarquons une absence de porosités par contre un arrachement de matière de $180 \mu\text{m}$ a été détecté ; ceci s'explique par le découpage qu'on a fait sur l'échantillon pour pouvoir l'observer.

4. Epaisseur du revêtement

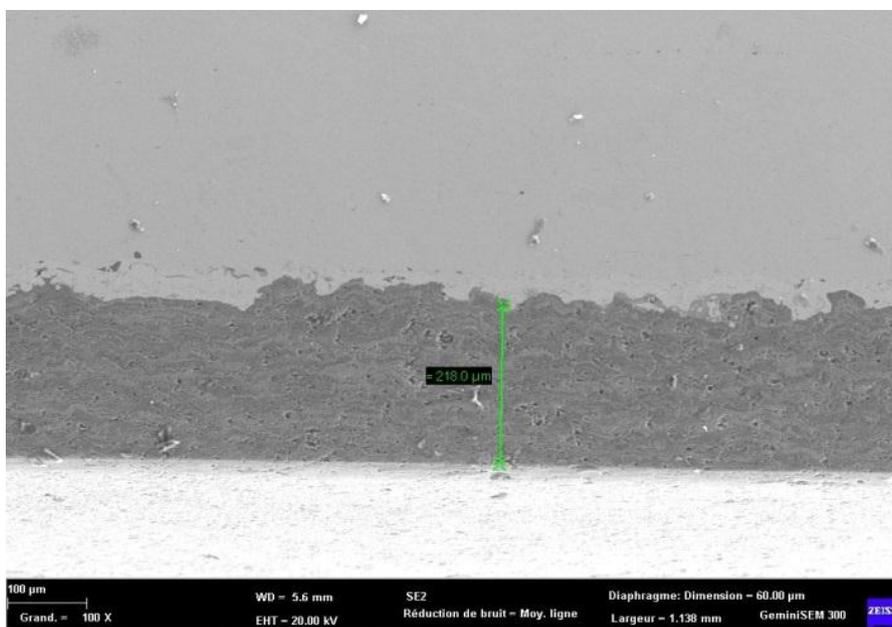


Figure 3.7.Observation de l'épaisseur de l'échantillon 1

L'épaisseur du revêtement est de 218 μm .

5. Spectre de toute la zone

5.1 Zone de la pièce (substrat)

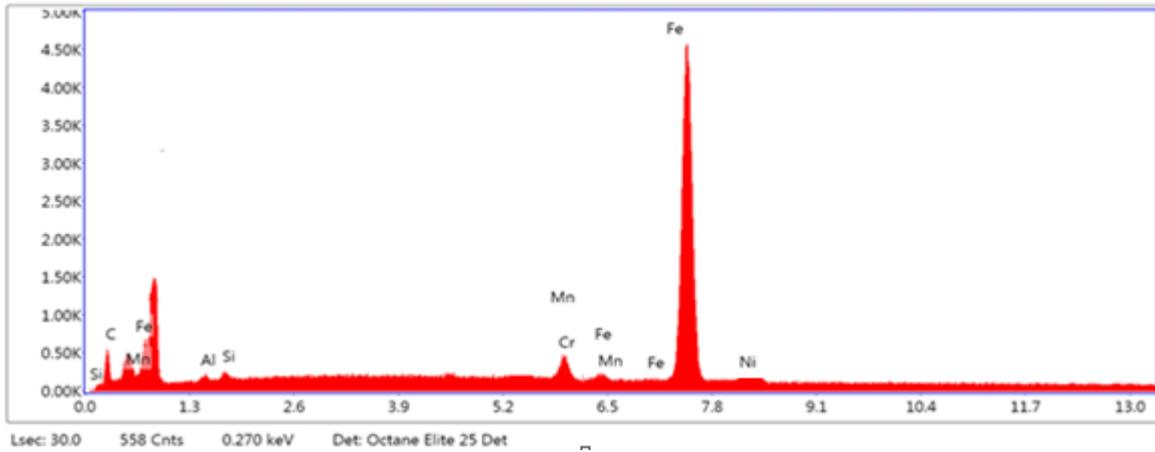


Figure 3.8. Spectre du substrat de l'échantillon 1

5.2 Zone du revêtement

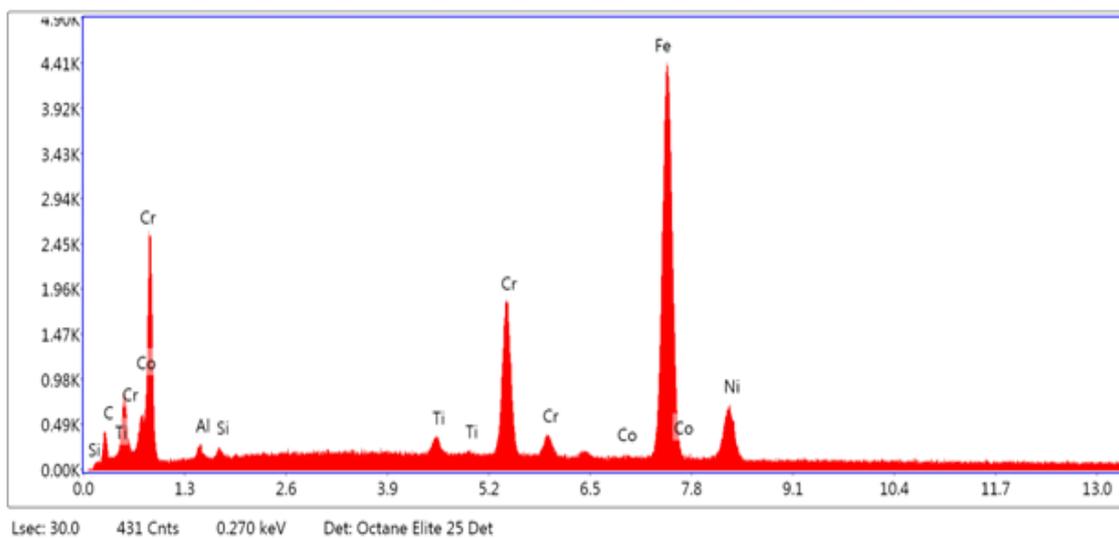


Figure 3.9. Spectre du revêtement de l'échantillon 1

5.3. Zone entre les deux couches

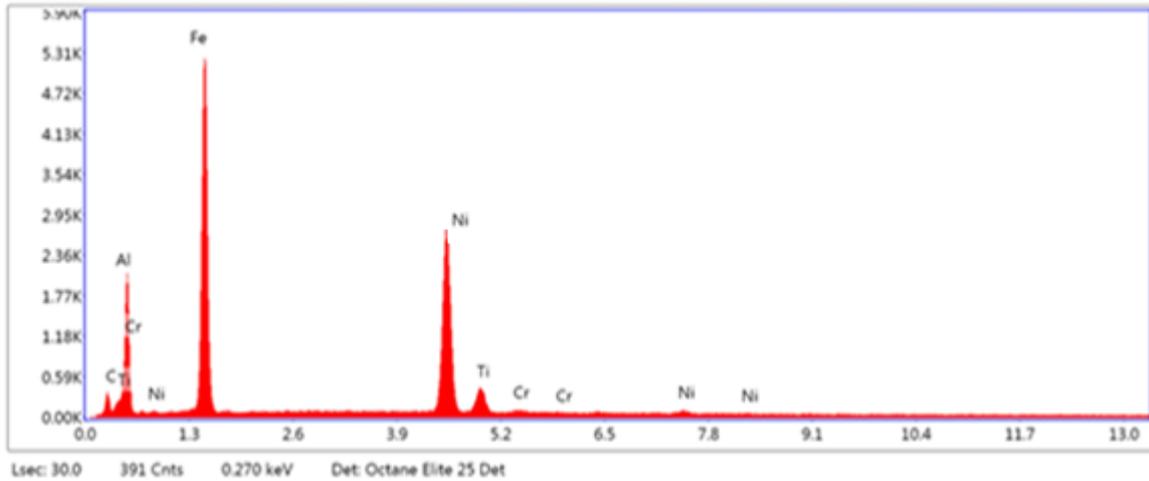


Figure 3.10. Spectre de l'interface de l'échantillon 1

Discussion :

Nous remarquons une présence forte de NiCr, NiAl dans la zone entre le revêtement et le substrat, ceci s'explique par le fait que le procédé HVOF nécessite une zone d'achroche métallique afin de garantir une bonne adhérence..

Echantillons 2 :

1. Adhérence du revêtement sur le substrat

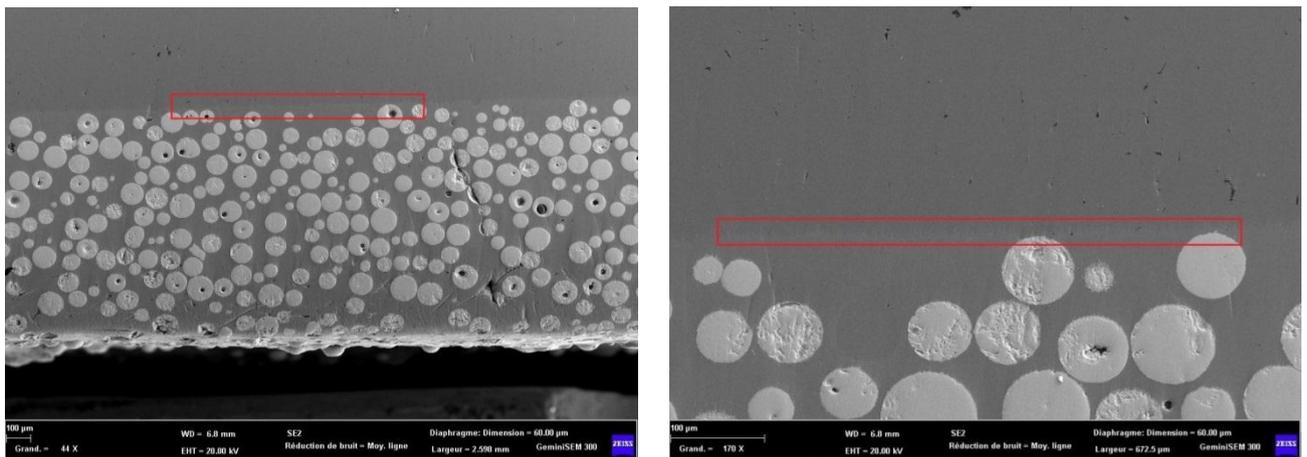


Figure 3.11. Observation de l'adhérence de l'échantillon 2

Discussion :

Nous remarquons une très bonne adhérence entre le revêtement et le substrat, aucun vide ou microporosité dans l'interface à signaler.

2. Homogénéité de l'échantillon

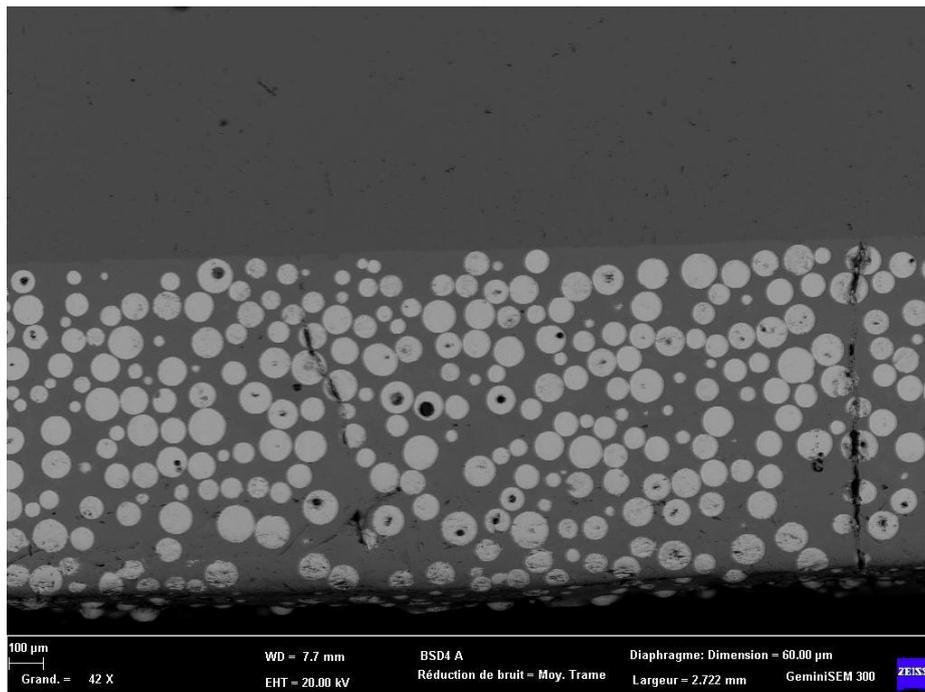


Figure 3.12.Observation de l'homogénéité de l'échantillon 2

Discussion :

L'homogénéité de cet échantillon prend une forme sphérique globulaire conséquence du phénomène de sphérisation.

3. Porosités ou défauts

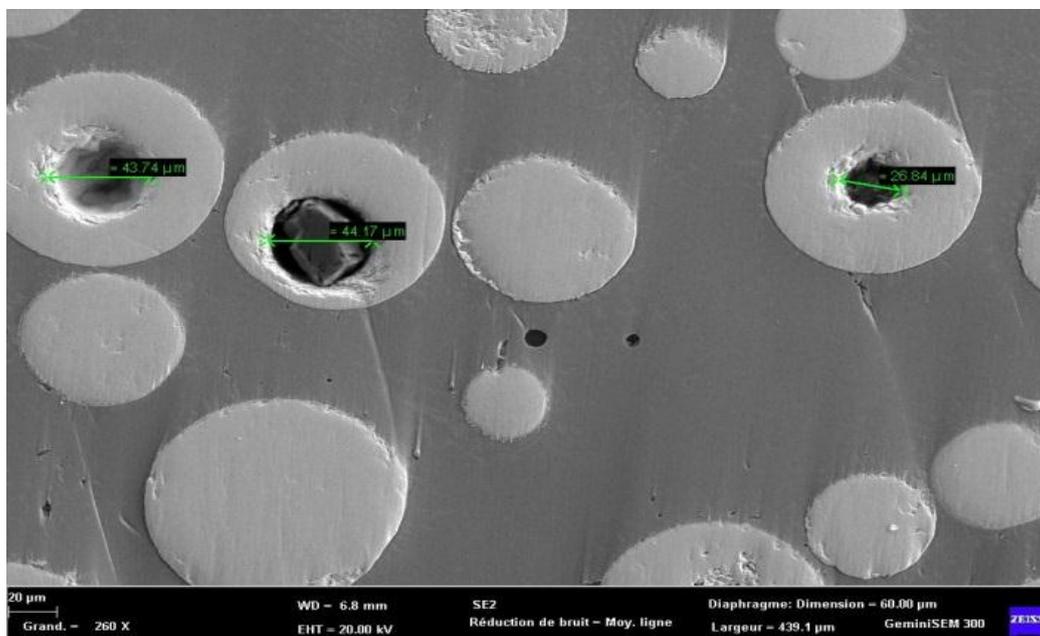


Figure 3.13.Observation de défauts de l'échantillon 2

Discussion :

Des microporosités ont été détectées lors de l'observation d'un diamètre maximal de $44 \mu\text{m}$. Ces microporosités sont au faite une conséquence du phénomène de sphéridisation. Ce dernier est du a un chauffage prés de la température critique puis un refroidissement long.

4. Epaisseur du revêtement

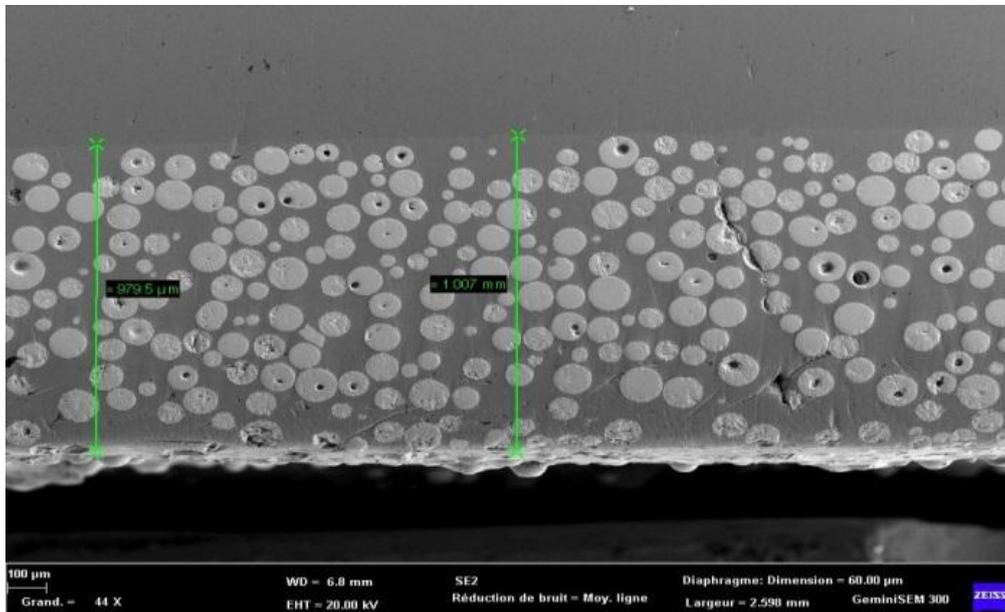


Figure 3.14.Observation de l'épaisseur de l'échantillon 2

L'épaisseur du revêtement est de $1007 \mu\text{m}$.

5. Spectre de toute la zone

5.1 Zone de la pièce (substrat)

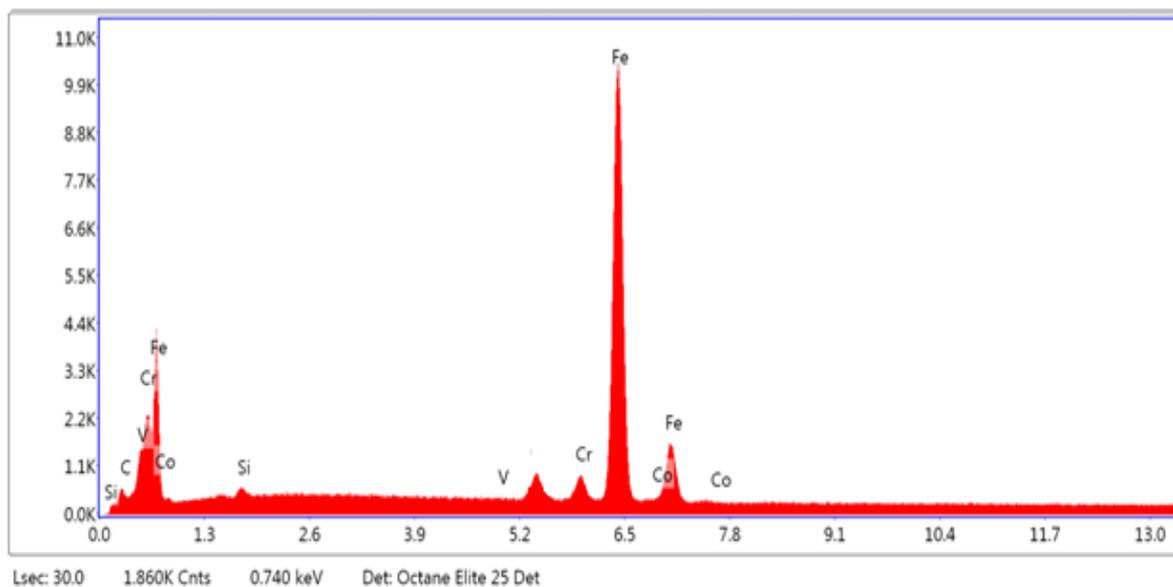


Figure 3.15. Spectre du substrat de l'échantillon 2

5.2. Zone du revêtement

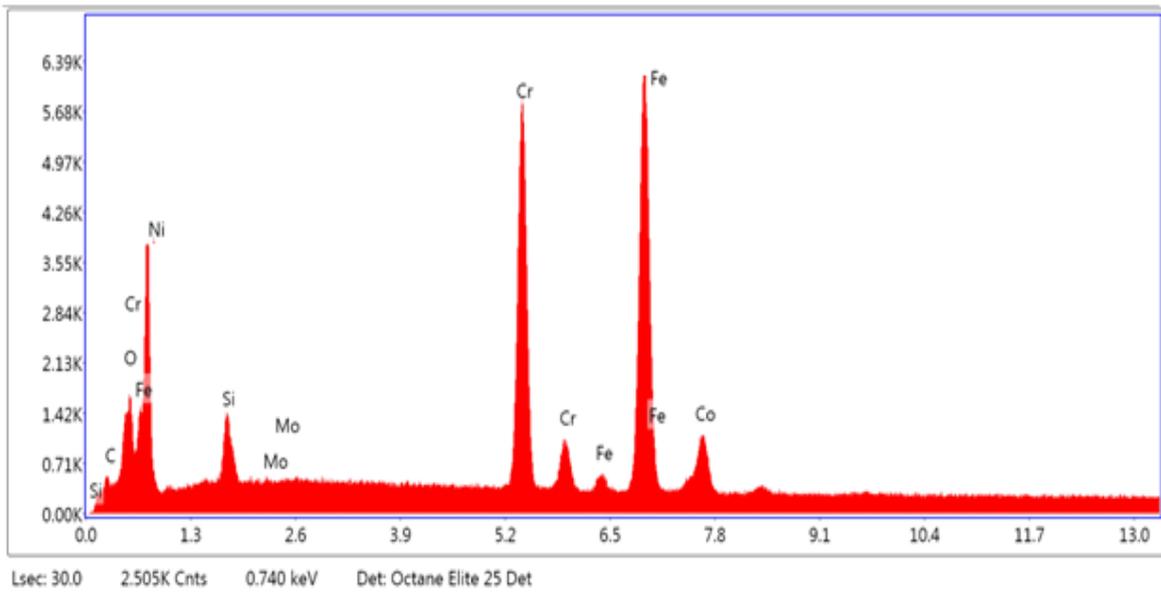


Figure 3.16. Spectre du revêtement de l'échantillon 2

5.3. Zone entre les deux couches

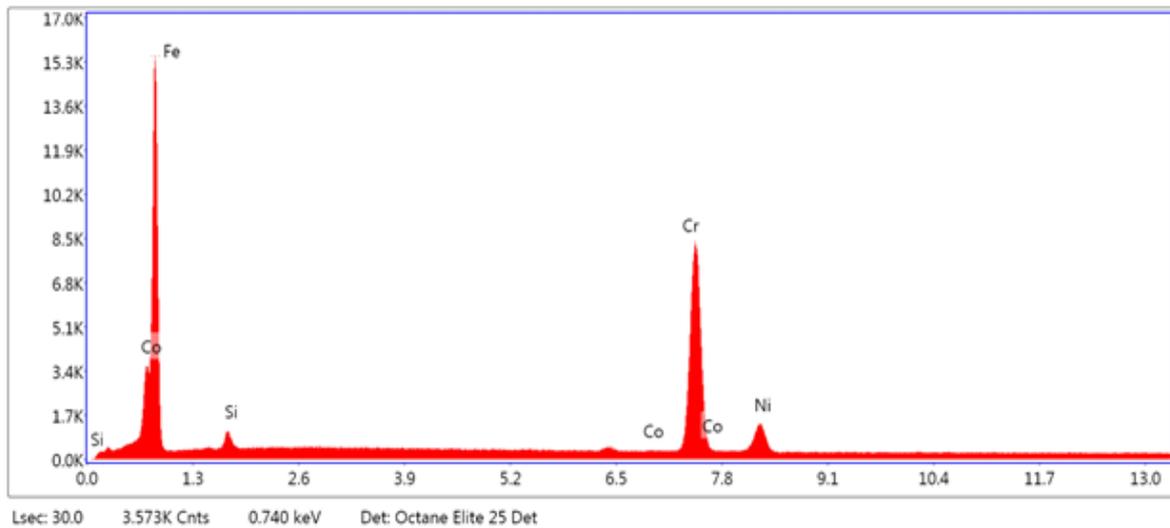


Figure 3.17. Spectre de l'interface de l'échantillon 2.

Discussion :

La zone entre les deux couches contient des éléments de la poudre et présente une très bonne adhérence entre les deux couches et ne nécessite pas de couche d'accroche métallique.

3.5. Comportement des échantillons face à l'usure

Etant donné que le défaut majeur du rotor du compresseur est l'usure, nous voulons voir quel est le comportement des échantillons revêtus vis-à-vis l'usure, pour cela nous avons utilisé un tribomètre de marque Tribotechnic pour mesurer le coefficient de frottement.

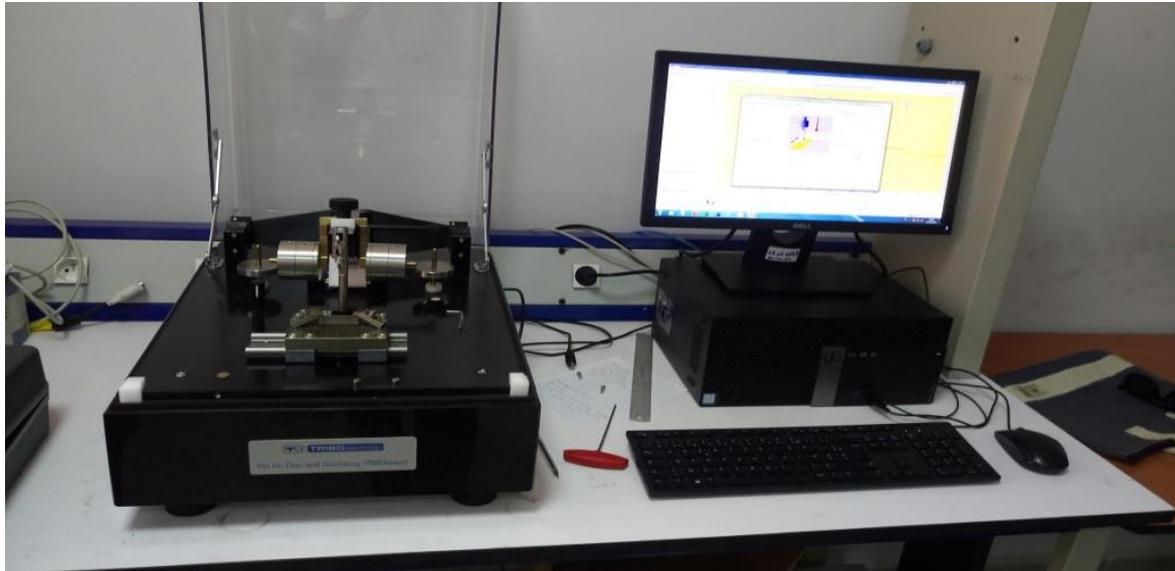


Figure 3.18. Dispositif du test d'usure

Paramètres du test :

Tableau 3.9 Paramètres du test d'usure

Parcours (mm)	Force normale (N)	Vitesse de glissement (mm/s)	Longueur de glissement (mm)	Diamètre de la bille (mm)	Matériau de la bille	Température lors du test (C°)
5	10	30	200010	5	AL ₂ O ₃	27

Résultats échantillons 1 :

Tableau 3.10 Coefficient de frottement de l'échantillon 1

Coefficient de frottement min.	Coefficient de frottement max.	Coefficient de frottement au départ	Coefficient de frottement moyen
0,168	0,451	0,153	0,346

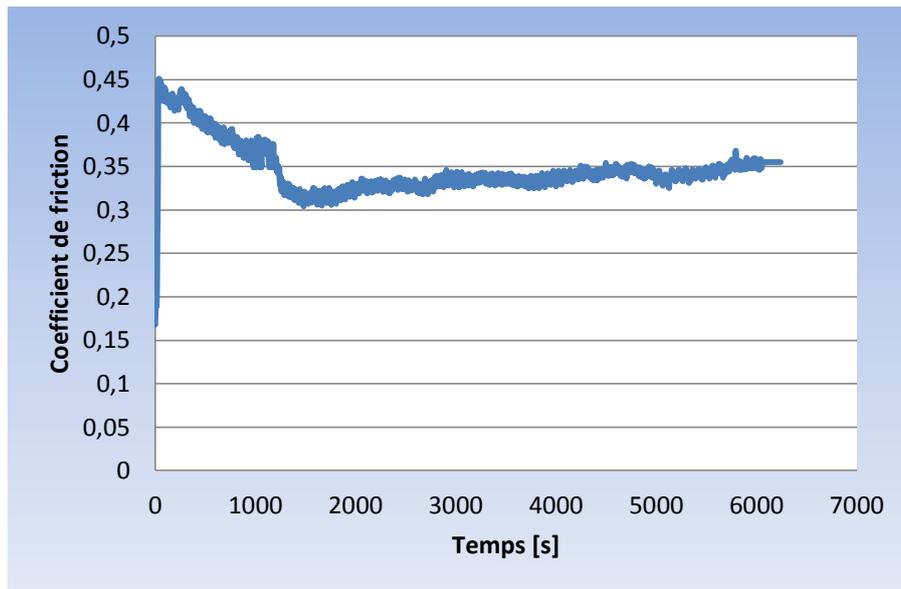


Figure 3.19. Evolution du coefficient de friction en fonction du temps pour l'échantillon 1

Résultats échantillon 2 :

Table 3.11 Coefficient de frottement de l'échantillon 2

Coefficient de frottement min.	Coefficient de frottement max.	Coefficient de frottement au départ	Coefficient de frottement moyen
0,134	0,744	0,134	0,364

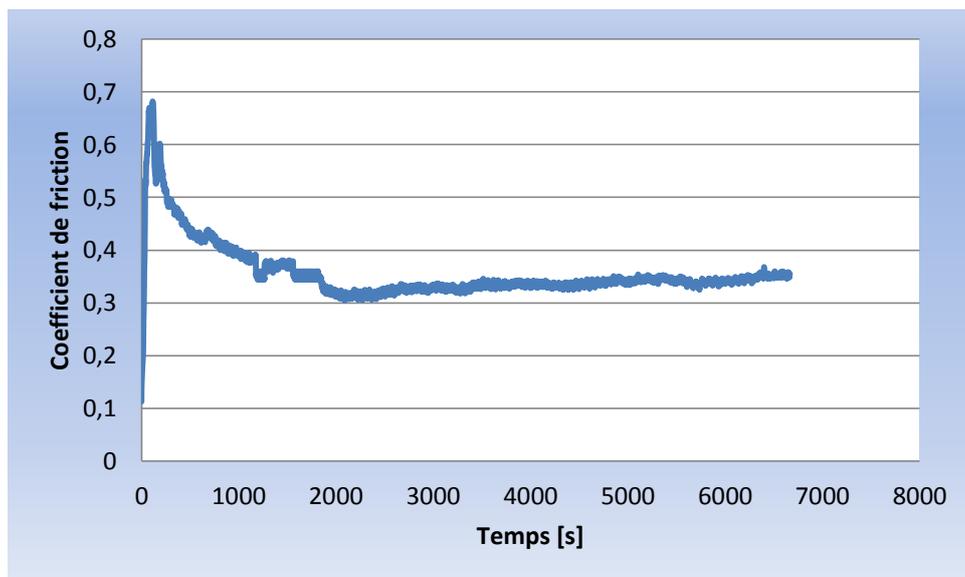


Figure 3.20. Evolution du coefficient de friction en fonction du temps pour l'échantillon 2

Calcul du taux d'usure :

Pour calculer le taux d'usure il faut avoir le volume usé par la bille, pour cela nous avons utilisé un profilomètre pour avoir la surface usée et après la multiplier par la longueur usée qui est de 200,1 m.

$$\text{Taux d'usure} = \frac{\text{Surface d'usure} \times \text{longueur d'usure}}{\text{Force normal} \times \text{distance parcourue}}$$

Résultats échantillon 1 :

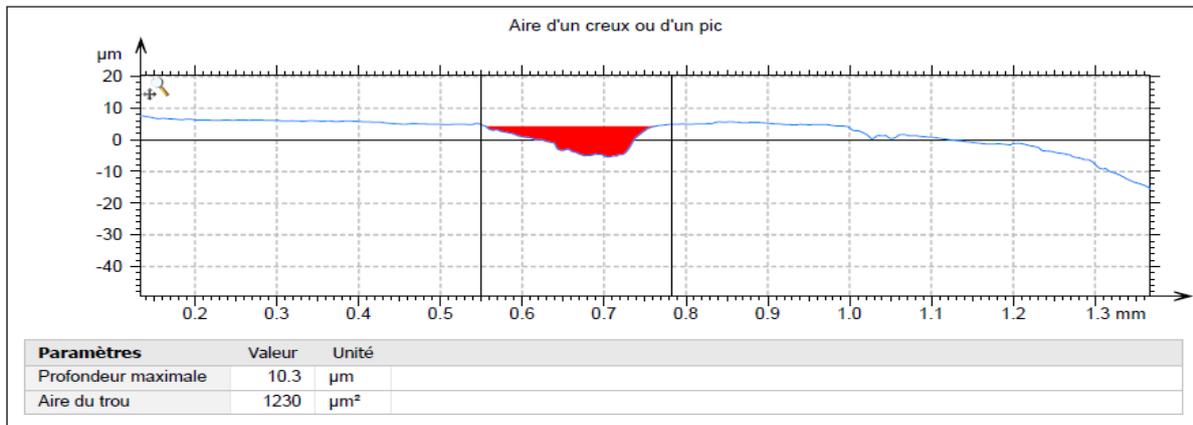


Figure 3.21. Profil de la zone usée de l'échantillon 1

Taux d'usure : $3.0748 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N/m}$

Résultats échantillons 2 :

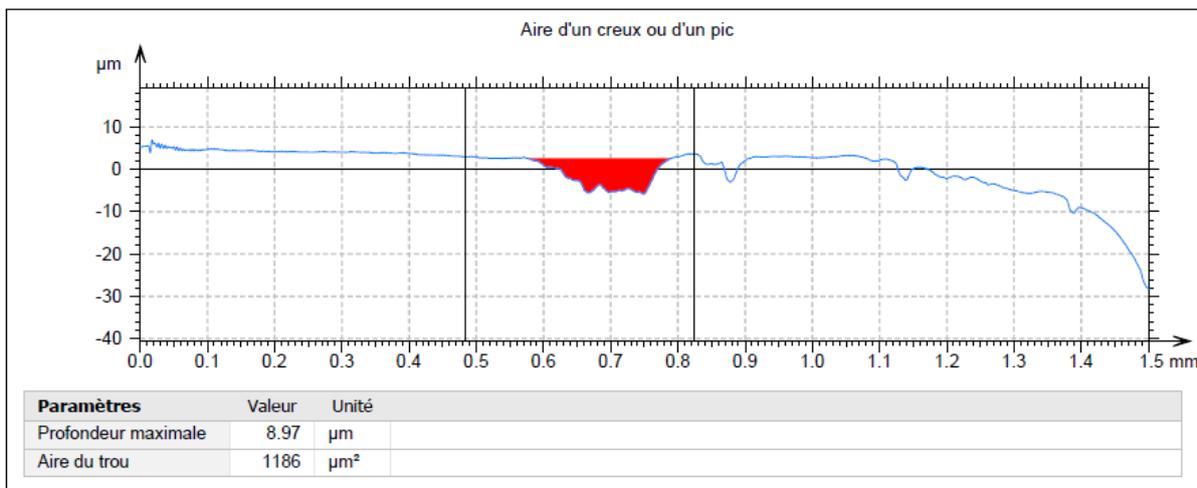


Figure 3.22. Profil de la zone usée de l'échantillon 2

Taux d'usure : $2.8635 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N/m}$

Discussion :

Le comportement des échantillons est acceptable avec un taux d'usure ne dépassant pas les $3 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}/\text{m}$ avec une légère différence où le coefficient de frottement en HVOF est moins important par rapport à celui du Laser Cladding, par contre le taux d'usure est plus grand en HVOF par rapport au Laser Cladding.

Conclusion :

A travers ces tests nous concluons que les deux méthodes présentent de très bons résultats aux contrôles non destructif par ressuage et ultrasons ainsi par rapport à l'adhérence avec le substrat, où aucun vide ou défauts à signaler entre les deux couches.

On tient à signaler que pour le revêtement HVOF, on a décelé une zone entre les deux couches. Cette zone est au faite une couche d'accroche métallique pour améliorer l'adhérence du revêtement sur le substrat. Principalement cette couche est du NiCr, NiAl.

Pour le laser cladding on a remarqué quelques microporosités dans la zone du revêtement ceci est au faite du au phenomene de spherodisation de la poudre.

Nous avons aussi remarqué que le procédé HVOF est limité par l'épaisseur et ne peut revêtir que pour quelques micromètre par contre le laser cladding peut revêtir jusqu'à un millimètre.

Le comportement des échantillons face à l'usure est presque identique et présente de très bons résultats où on a eu un taux d'usure d'environ $3 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}/\text{m}$.

Chapitre 4 : Etude de cas de la maintenance du rotor compresseur X04J

Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier la réparation faite sur le rotor du compresseur centrifuge X04J, présenter les différentes étapes de la réparation, interpréter et expliquer le choix des poudres utilisées pour le revêtement et commenter les résultats de l'équilibrage du rotor.

Pour cela nous commencerons par l'étape de l'inspection pour la détermination des zones endommagées, ensuite nous poursuivrons avec l'étape de réparation.

4.1. Inspection du rotor

Lors de la réception du rotor du compresseur centrifuge de la part de l'entreprise TMComas, un rapport d'inspection a été rédigé contenant les points suivants :

- Contrôle de la position des roues
- Contrôle dimensionnel du rotor
- Contrôle de l'arbre et des roues avec CND
- Analyse de la constitution chimique de l'arbre

4.1.1. Contrôle de la position des roues

Vu l'indisponibilité des plans dimensionnels du compresseur contenant les positions des roues, le bureau d'étude s'en est chargé.

Pour se faire, à partir d'un référentiel choisi les positions des roues ont été mesurées.

Le schéma ci-dessous montre les positions mesurées :



Figure 4.1. Contrôle de la position des roues

Tableau récapitulatif :

Tableau 4.1 position des roues de rotors.

Roue N°	Position (mm)
1	1825.285
2	1415.78
3	1215.71
4	1028.42
5	649.05
6	452.23

4.1.2. Contrôle dimensionnel du rotor

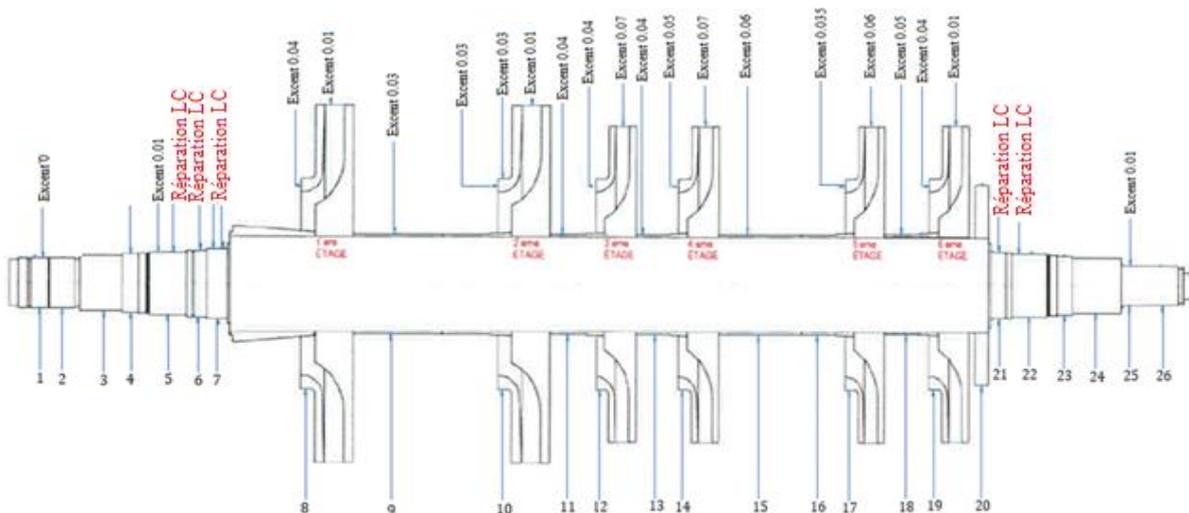


Figure 4.2. Contrôle dimensionnel du rotor

Tableau 4.2 dimensions de chaque point de rotor avant réparation.

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ø D'origine			104,775		119.05	127.0	133.35	457.20	190.50
Ø Actuel	94.99	95.25	104.76	111.11	119.03	126.94	133.32	457.0	190.51
Position	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ø D'origine	434.975	190.50		190.50		190.50	190.50		190.50
Ø Actuel	434.70	190.50	396.5	190.47	396.7	190.50	190.47	374.5	190.47
Position	19	20	21	22	23	24	25	26	
Ø D'origine			127.0	119.05		104.775			
Ø Actuel	362.0	406.2	126.98	119.03	111.11	104.75	76.19	76.20	

4.1.3. Contrôle par CND :

1- Arbre du rotor

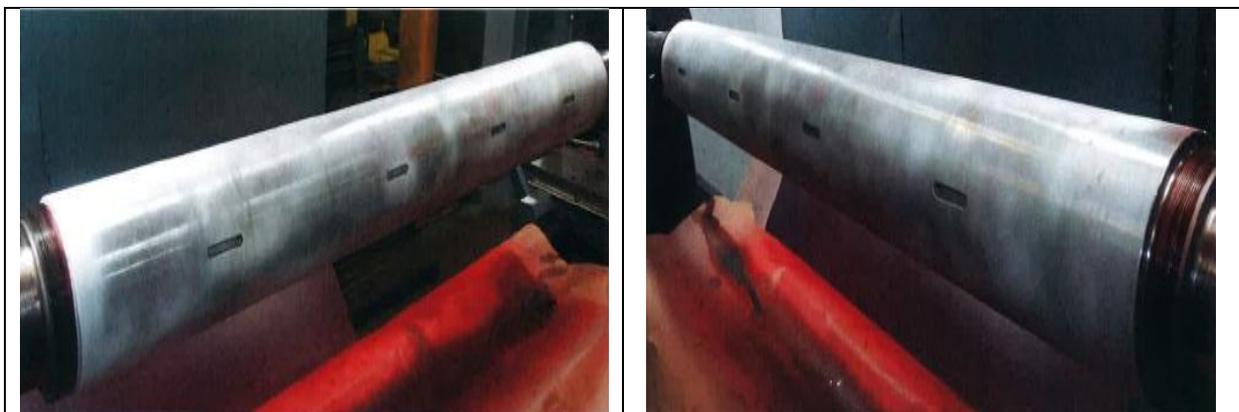
Durant cette phase, deux types de contrôle non destructif ont été appliqués sur l'arbre ; ressuage et ultrasons.

Contrôle par ressuage :

Le matériel utilisé de marque ARDOX:

- Pénétrant : 9-96-P
- Eliminateur : 9-PR-5
- Développeur : 9-D1-B

A la fin de ce contrôle on remarque les indications suivantes :



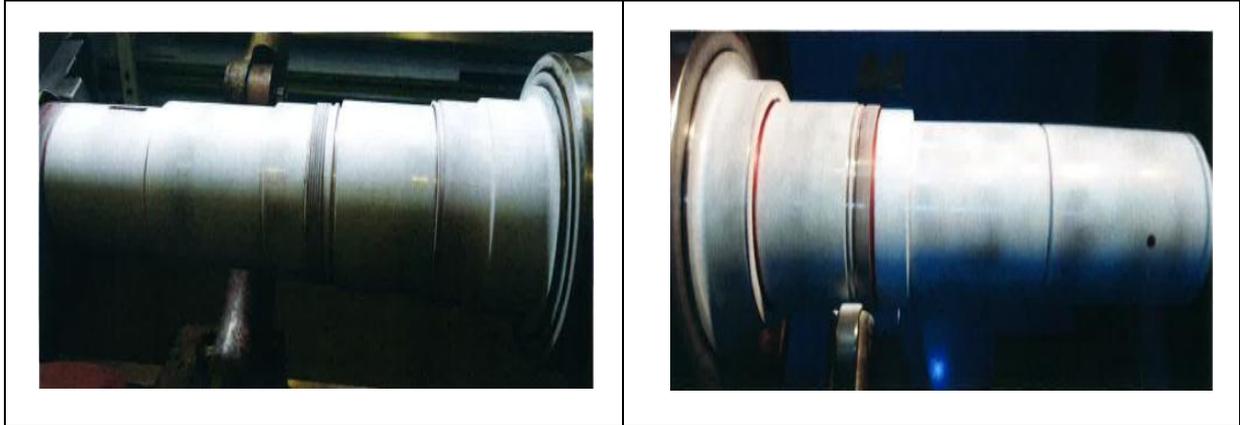


Figure43.3. Contrôle de l'arbre par ressuage

Interprétations des résultats :

On remarque l'absence de fissure et discontinuités dans chacune des parties centrale, droite et gauche de l'arbre du rotor.

Contrôle par ultrasons :

Le matériel utilisé :

- Equipement : USM GO
- Transducteur : MB-4S
- Film de couplage : Huile Minérale



Figure43.4. Contrôle de l'arbre par ultrason

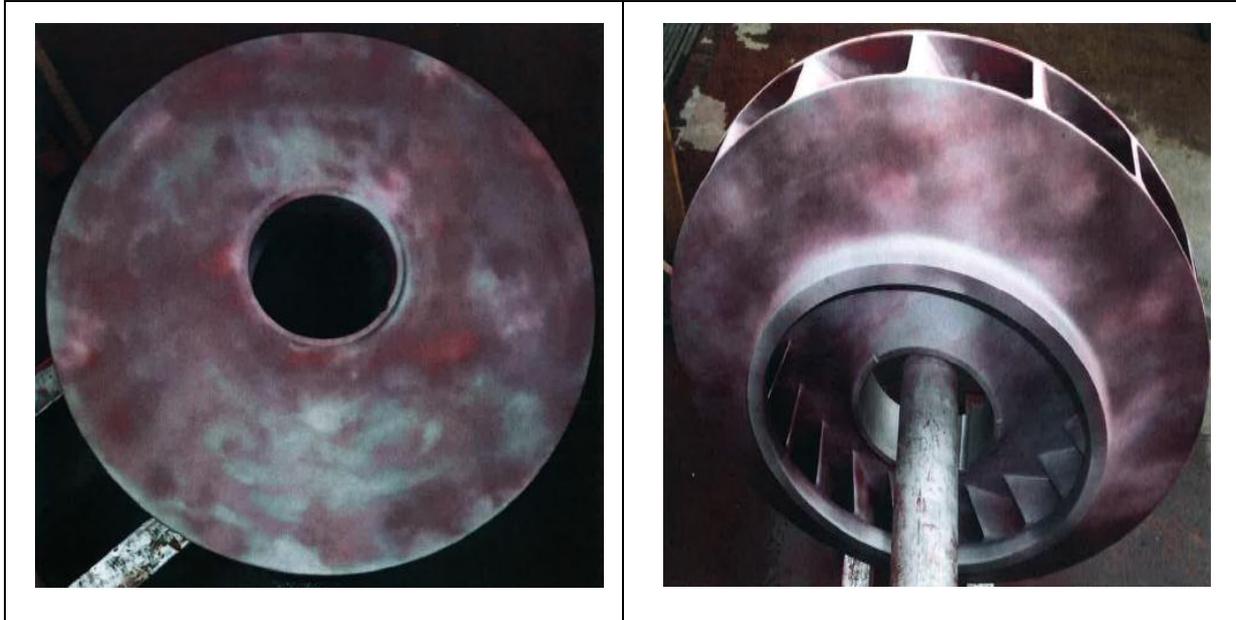
Résultats :

La partie centrale de l'arbre est acceptable, on n'observe pas des discontinuités ou défauts de relevance, par contre les deux extrémités de l'arbre présentent des indications d'existence de trois chemises de garniture mécanique.

2- Contrôle des roues

Contrôle par ressuage

Roue 1 :

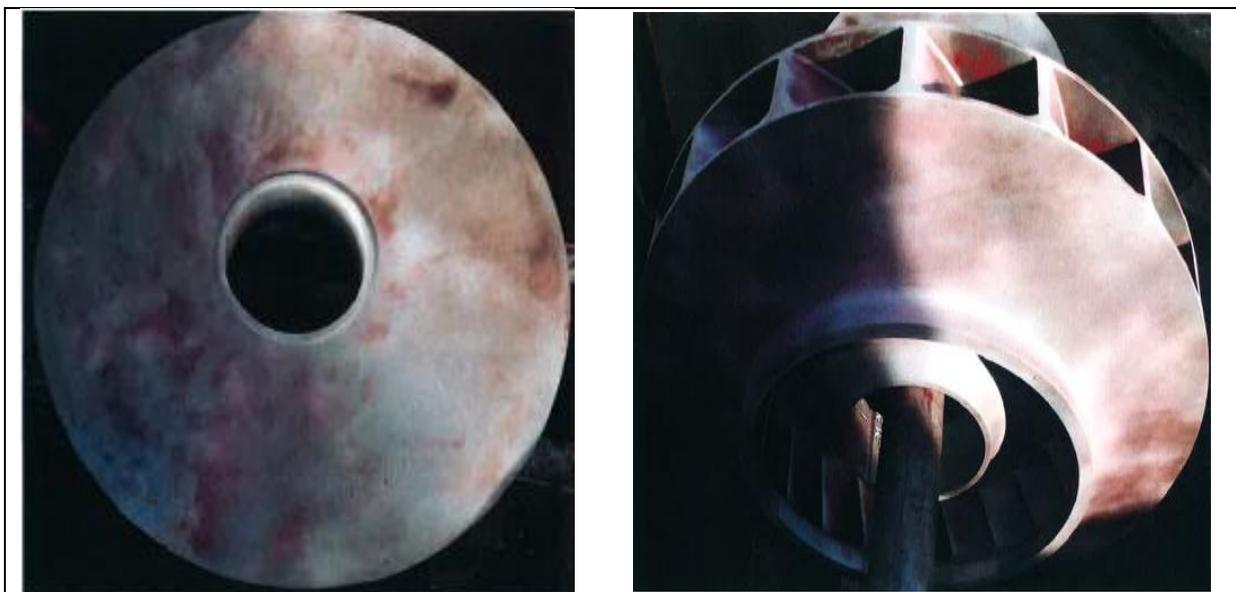


Résultat : Acceptable

Critère d'acceptation vérifié : Absence de fissures et porosités.

Figure 4.5. Contrôle de la roue 1 par ressuage

Roue 2 :

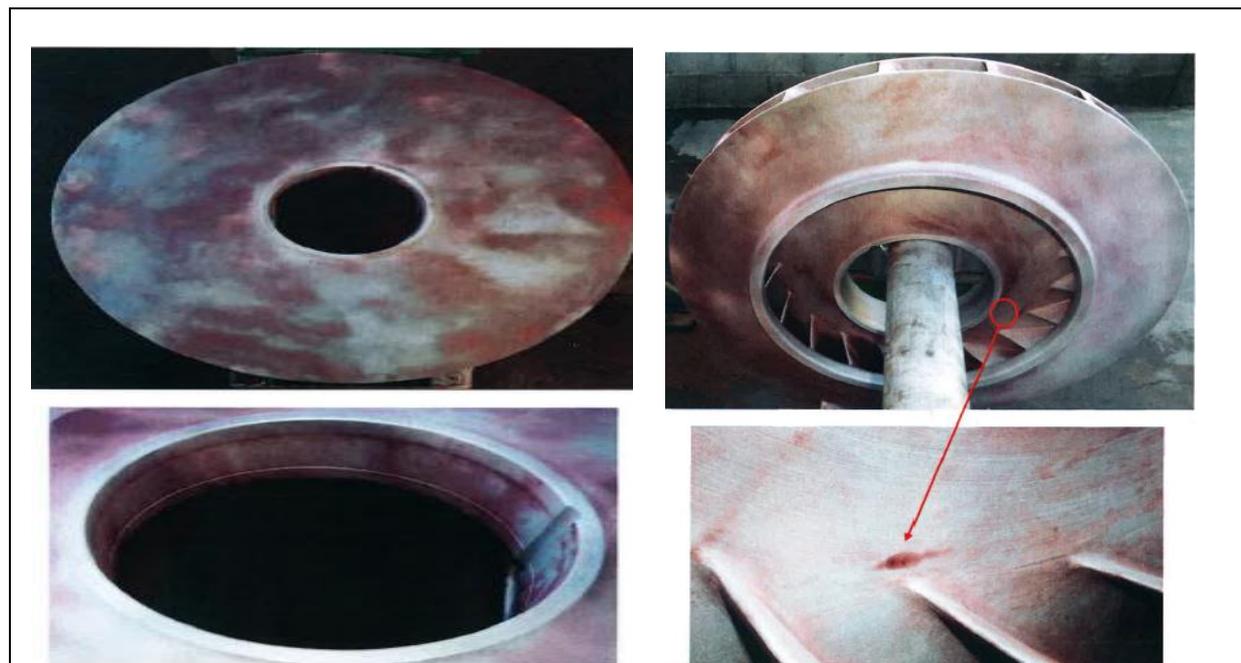


Résultat : Acceptable

Critère d'acceptation vérifié : Absence de discontinuités et présence de défauts de relevance.

Figure 4.6. Contrôle de la roue 2 par ressuage

Roue 3 :

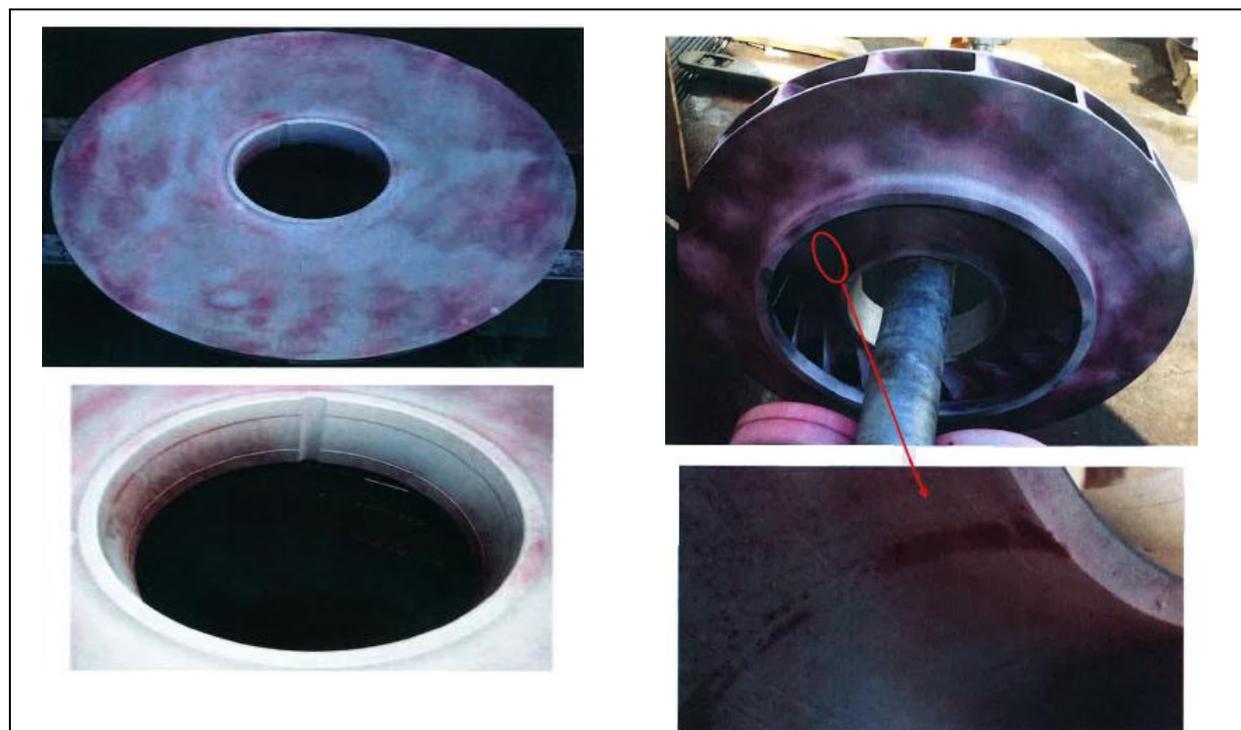


Résultat : Non acceptable

Critère d'acceptation non vérifié : Absence de discontinuités et présence de porosités

Figure 4.7. Contrôle de la roue 3 par ressuage

Roue 4 :



Résultat : Non acceptable

Critère d'acceptation non vérifié : Absence de discontinuités et présence de porosités

Figure 4.8. Contrôle de la roue 4 par ressuage

Roue 5 :

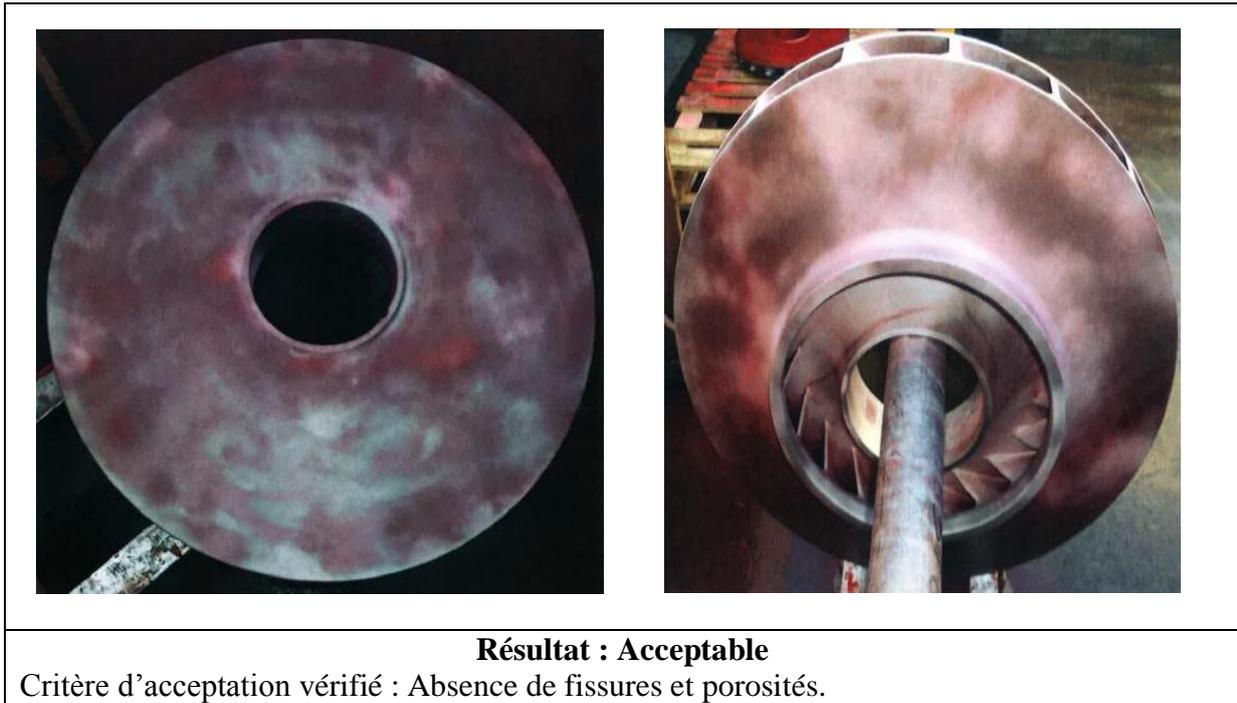


Figure 4.9. Contrôle de la roue 5 par ressuage

Roue 6 :

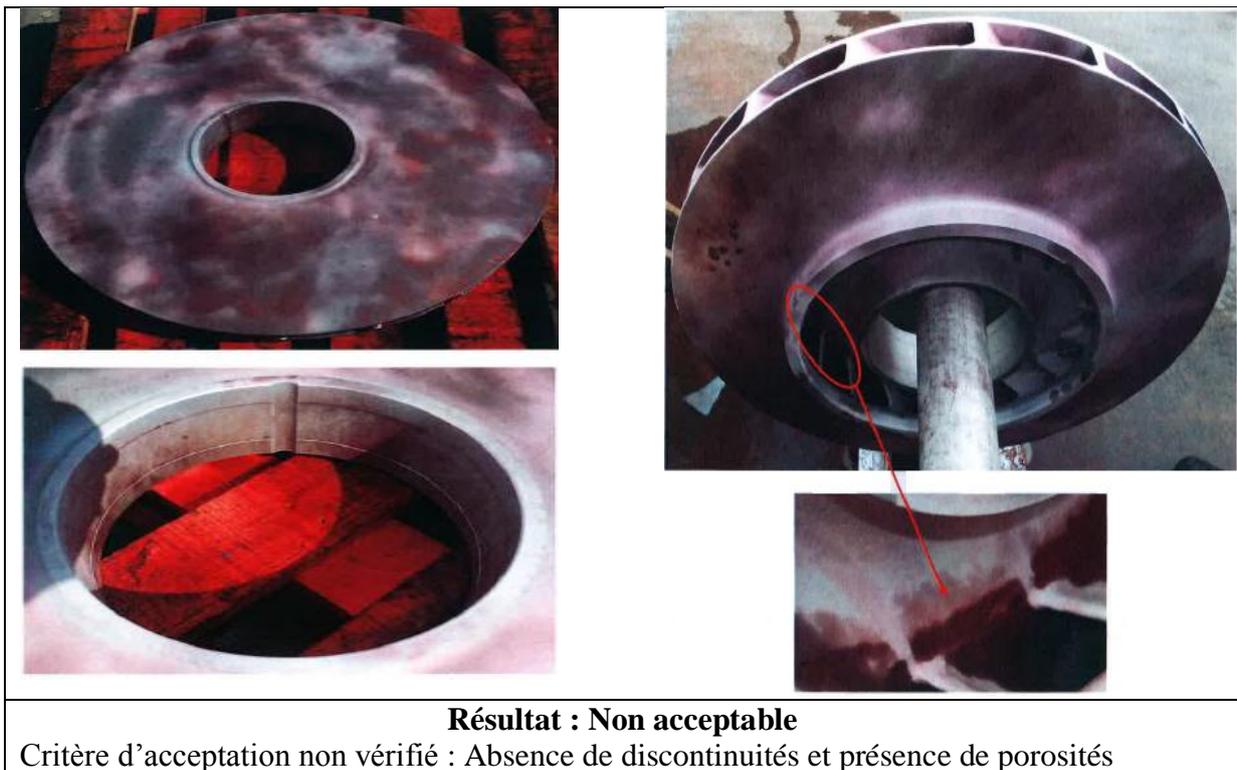


Figure 4.10. Contrôle de la roue 6 par ressuage

Aucune réparation n'a été faite sur les roues du rotor, car ces défauts n'influe pas sur le fonctionnement du compresseur ni sur ses performances.

4.1.4. Analyse chimique de l'arbre :

Méthode utilisée : Spectrométrie à émission optique

Résultats :

	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al
Min		0,320	0,0000	0,500	0,0000	0,0000	0,0000	
Max		0,390	0,400	0,800	0,400	0,100	0,400	
1	98,4	0,347	0,281	H 0,809	0,0216	< 0,0030	0,0177	0,0250
2	98,4	0,344	0,286	H 0,809	0,0169	< 0,0030	0,0183	0,0238
3	98,4	0,349	0,286	0,787	0,0194	< 0,0030	0,0208	0,0232
Ave	98,4	0,347	0,285	H 0,802	0,0193	< 0,0030	0,0189	0,0240

	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Zr
Min								
Max								
1	0,0029	0,0089	0,0036	0,0018	0,0023	< 0,0250	< 0,0100	< 0,0020
2	< 0,0020	0,0085	< 0,0020	0,0013	0,0020	< 0,0250	< 0,0100	< 0,0020
3	< 0,0020	0,0087	< 0,0020	0,0014	0,0021	< 0,0250	< 0,0100	< 0,0020
Ave	0,0021	0,0087	< 0,0020	0,0015	0,0021	< 0,0250	< 0,0100	< 0,0020

Figure 4.11. Analyse chimique de l'arbre du rotor

Interprétations :

D'après les résultats obtenus, on remarque bien qu'il s'agit de la nuance CK45 pour l'arbre du rotor de notre compresseur.

Spécifications techniques du CK45

Tableau 4.3 paramètres mécaniques de l'arbre du rotor avant la réparation.

Dureté HB	Résistance à la rupture (N/mm ²)	Lim. d'Elasticité (N/mm ²)	Allongement %	Striction %
175-210	560-620	275-340	14-16	40

Discussion :

Lors de l'inspection, des défauts de porosités sur les roues ont été détectés, par contre nous avons remarqué qu'il n'y a pas eu de rechargement de ces zones endommagées par fatigue ; ceci s'explique par le fait que l'écoulement du fluide ne va être affecté par ces défauts.

4.2. Réparation du rotor

Après l'inspection avancée sur le rotor, il a été convenu d'intervenir sur le rotor par les opérations suivantes :

- Rechargement de zones endommagées de l'arbre par Laser Cladding.
- Construction de 4 chemises entre étages
- Construction de 3 chemises pour l'arbre
- Montage du rotor avec les chemises entre étages, et celles pour l'arbre et les impulseurs
- Rectification en ligne de toutes les zones récupérées et les éléments construits selon la cote d'origine
- Contrôle de la position des roues
- Contrôle dimensionnel du rotor
- Equilibrage du rotor

4.2.1. Rechargement de zones endommagées de l'arbre par Laser Cladding.

- Procédé : Laser Cladding
- Endroits du rechargement : positions 5, 6, 7, 21, 22

Le tableau suivant donne les valeurs du rechargement en épaisseur des 5 positions avec la distance de rechargement

Tableau 4.4 dimension de rechargement en longueur et en épaisseur

Position	5	6	7	21	22
Ø Avant rechargement (mm)	119.03	126.94	133.32	126.98	119.03
Ø Après rechargement (mm)	119.04	126.99	133.34	126.99	119.04
Distance de rechargement (mm)	78.8	41.65	48.75	52	78.85

- Poudre de rechargement : le rechargement a été fait en se référant à la norme AISI 431
La constitution chimique de la poudre est la suivante :

Tableau 4.5 constitution chimique de la poudre de revêtement pour l'arbre

C	Si	S	Ni	Cr	Fe
0.208	0.42	0.003	1.94	15.78	81.649

- Caractéristique mécanique de la poudre :

Tableau 4.6 paramètres mécaniques de l'arbre des rotors après la réparation.

Dureté HB	Résistance à la rupture (N/mm ²)	Lim.Elasticité (N/mm ²)	Allongement %	Striction %
295	900-1050	700	10	60

4.2.2. Construction de quatre chemises entre étages de même constitution chimique et mêmes caractéristiques mécaniques

- Analyse chimique de la matière de construction : la construction des 4 chemises a été faite en se référant à la norme AISI 410, la constitution chimique de la matière est la suivante :

Tableau 4.7 constitution chimique de la poudre de revêtement pour les chemises entre les étages.

C	Si	S	Ni	Cr	Fe	Mn	P
0.12	0.40	0.01	0.37	12.64	85.9	0.54	0.019

- Caractéristique mécanique de la matière :

Tableau 4.8 paramètres mécaniques des chemises entre les étages.

Dureté HB	Résistance (N/mm ²)	Lim.Elasticité (N/mm ²)	Allongement %	Striction %
275	450-650	670	14	55

- Nombre d'unités :

Tableau 4.9 nombres d'unités de chemise entre les étages réparés.

Chemise	1	2	3	4
Nombres	1	2	1	4

4.2.3. Construction de trois chemises pour l'arbre du rotor

- Analyse chimique de la matière de construction pour la chemise 1, la construction de la chemise a été faite en se référant à la norme AISI 410, la constitution chimique de la matière est la suivante :

Tableau 4.10 constitution chimique de la poudre de la chemise N°1.

C	Si	S	Ni	Cr	Fe	Mn	P
0.104	0.4	0.001	0.35	12.60	85.966	0.56	0.019

- Caractéristique mécanique de la matière :

Tableau 4.11 paramètres mécaniques de la chemise N°1.

Dureté HB	Résistance à la rupture (N/mm ²)	Lim.Elasticité (N/mm ²)	Allongement %	Striction %
257	799	657	64	19

- Analyse chimique de la matière de construction des chemises 2 et 3 : la construction des 2 chemises a été faite en se référant à la norme AISI 410, la constitution chimique de la matière est la suivante :

Tableau 4.12 constitution chimique de la poudre des chemises 2 et 3.

C	Si	S	Ni	Cr	Fe	Mn	P
0.12	0.17	0.015	0.3	12.24	86.8	0.33	0.025

- Caractéristique mécanique de la matière :

Tableau 4.13 paramètres mécaniques des chemises 2 et 3.

Dureté HB	Résistance à la rupture (N/mm ²)	Lim.Elasticité (N/mm ²)	Allongement %	Striction %
275	820	700	14.30	54.5

- Nombre d'unités :

Tableau 4.14 nombres d'unités des chemises.

Chemise	1	2	3
Nombres	2	1	1

4.2.4. Montage du rotor avec les chemises entre étages, et celles pour l'arbre et les impulseurs :

Le montage a été fait avec succès, la surface extérieure de l'arbre où se montent les chemises a été chauffée, du coup lors du montage des chemises elles se collent directement avec l'arbre sans jeu.

4.2.5. Rectification en ligne de toutes les zones récupérées et les éléments construits selon la cote d'origine

La rectification se fait après montage du rotor dans un tour, avec une roue d'abrasif pour rectifier qui tourne à une vitesse donnée, on fait passer la zone récupérée jusqu'à arriver à la cote d'origine.

4.2.6. Contrôle de la position des roues

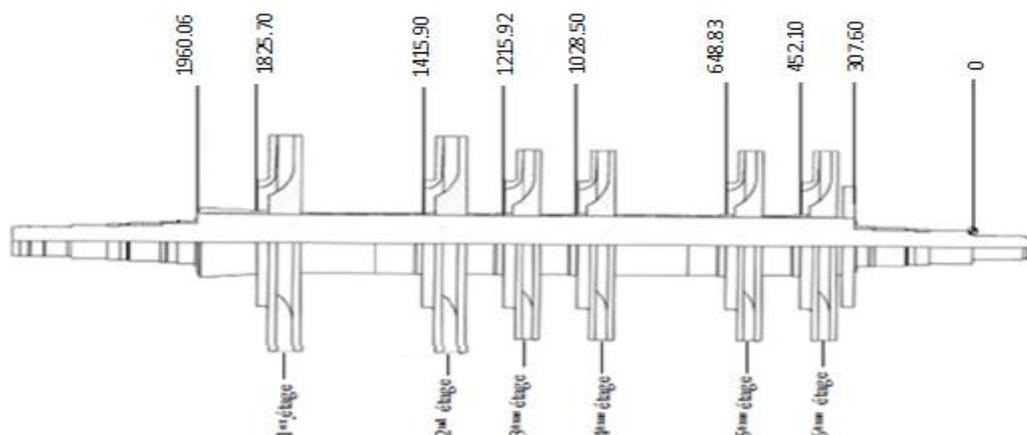


Figure 4.12. Contrôle de la position des roues après réparation

Le tableau suivant récapitule la position des roues avant et après la réparation avec erreur :

Tableau 4.15 erreur de la position des roues après réparation.

Position	Référence	Début arbre	Roue 6	Roue 5	Roue 4	Roue 3	Roue 2	Roue 1	Fin arbre
Avant réparation (mm)	0	307.6	452.23	649.05	1028.42	1215.71	1415.78	1825.285	1959.76
Après réparation (mm)	0	307.6	452.10	648.83	1028.50	1215.92	1415.90	1825.70	1960.06
Erreur (%)	0	0	0.0002	0.0003	0.00007	0.00017	0.00008	0.00037	0.00035

4.2.7. Contrôle dimensionnel du rotor

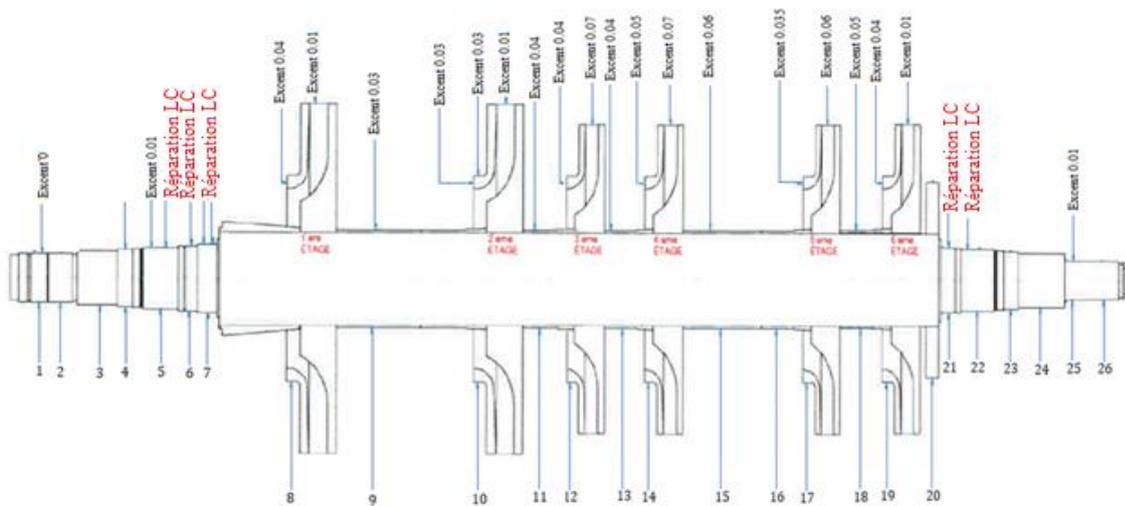


Figure 4.13. Contrôle dimensionnel après réparation

Tableau 4.16 dimensions de chaque point de rotor après réparation.

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ø D'origine			104,775		119.05	127.0	133.35	457.20	190.50
Ø Avant réparation	94.99	95.25	104.76	111.11	119.03	126.94	133.32	457.00	190.29
Ø Après réparation	94.99	95.225	104.77	111.09	119.04	126.99	133.34	457.2	190.45
Position	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ø D'origine	434.975	190.50		190.50		190.50	190.50		190.50
Ø Avant réparation	434.70	190.47	396.5	190.47	396.7	190.50	190.47	374.5	190.47
Ø Après réparation	434.97	190.47	396.5	190.47	396.7	190.47	190.47	374.5	190.47

Position	19	20	21	22	23	24	25	26
Ø D'origine			127.0	119.05		104.775		
Ø Avant réparation	362.0	406.2	126.98	119.03	111.11	104.75	76.19	76.20
Ø Après réparation	362.0	406.2	126.98	119.03	111.11	104.77	76.19	76.20

4.2.8. Equilibrage du rotor

Equilibrage à basse vitesse :

L'équilibrage à basse vitesse se concentre sur le rotor en tant que corps rigide, sans tenir compte de sa flexibilité ni de son comportement dynamique avec les roulements.

L'opération de l'équilibrage a été faite en se référant à la norme ISO 1940 G 2.5 au sein de l'entreprise de la construction navale NAVANTIA à une vitesse de 300 RPM.

Tableau 4.17 paramètres de rotos utilisé lors d'équilibrage.

Poids du rotor (Kg)	Vitesse nominale (RPM)	Rayon Plan 1 (mm)	Rayon Plan 2 (mm)
785	8324	254	280

Tableau 4.18 dimension des deux plans.

Distance Plan1-roue d'équilibrage la plus proche (mm)	Distance Plan2-roue d'équilibrage la plus proche (mm)	Distance axiale Plan1-Plan 2 (mm)
320	558	1344

Le déséquilibre résiduel admissible :

$$U_{adm} = (G \cdot M) / n \cdot 4774.65 = \frac{2.5 \cdot 785}{8324} \cdot 4774.65 = 1125.7 \text{ gr.mm}$$

Le déséquilibre résiduel admissible max en plan 1:

$$U_{p1} = \frac{U_{adm}}{Plan\ 1} = \frac{1125.7}{254} = 4.4 \text{ gr}$$

Le déséquilibre résiduel admissible max en plan 2:

$$U_{p2} = \frac{U_{adm}}{Plan\ 2} = \frac{1125.7}{254} = 4 \text{ gr}$$

Déséquilibre initial (à l'arrivée):

Plan 1 = 14,8 gr.

Plan 2 = 11,2 gr

Après équilibrage, les valeurs suivantes du déséquilibre résiduel ont été obtenues comme suite:

Plan 1 = 0,29 gr.

Plan 2 = 0,38 gr.

Equilibrage à haute vitesse :

Après l'équilibrage à basse vitesse, le rotor a été monté dans une chambre à vide pour l'équilibrage à grande vitesse.

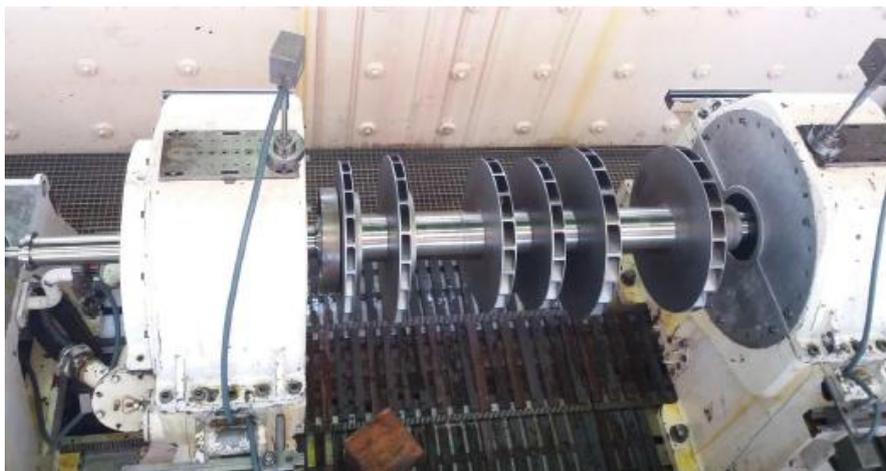


Figure 4.14. Rotor en plein équilibrage

Nous prenons les mesures de la vibration radiale absolue sur l'arbre. Quatre capteurs sont utilisés: V1, H1, V2 et H2.

$$F = \frac{0.2 * \text{Poids du rotor}}{2 * 0.0122 * \left(\frac{\text{vitesse nominale}}{1000}\right)^2 * (U_{p1} + U_{p2}) / 20} = \frac{0.2 * 785}{2 * 0.0122 * \left(\frac{8324}{1000}\right)^2 * (254 + 280) / 20} = 3.8 \text{ gr}$$

Selon la norme API612 l'amplitude de vibration max est :

Vitesse de rotation < 3000 RPM : 51 μm_{p-p}

Vitesse de rotation > 3000 RPM : 30.49 μm_{p-p}

Pendant l'exécution initiale, il était possible d'obtenir la vitesse nominale mais avec des valeurs des vibrations supérieures à celles recommandées par l'API612.

Tableau 4.19 vibration avant équilibrage à haute vitesse.

Vitesse	Vibration μm_{p-p}				Tolérance μm_{p-p}
	V1	H1	V2	H2	
8324	55.48	56.29	23.21	34.25	<30.49

Lors de la dernière exécution, nous obtenons la vitesse nominale avec de faibles niveaux de vibrations spécifiés par la norme API 612.

Tableau 4.20 vibration après équilibrage à haute vitesse.

Vitesse	Vibration μm_{p-p}				Tolérance μm_{p-p}
	V1	H1	V2	H2	
8324	16.59	19.98	17.31	21.37	<30.49

Conclusion :

Lors de l'inspection du rotor, il a été remarqué 5 zones d'usure sur l'arbre du rotor. Ces zones ont été réparées selon la norme AISI 431 avec le procédé laser cladding avec un pourcentage élevé de Chrome, ceci se traduit par la haute résistance du Chrome face à l'usure et la corrosion et aussi il augmente la dureté du matériau significativement. On remarque aussi un certain pourcentage de Nickel qui joue aussi un rôle pour l'augmentation de la dureté, et autre constituant à l'état de trace pour garantir l'adhérence de la couche avec le substrat.

Une construction de chemises pour l'arbre aux extrémités et entre étages a été faite en se référant à la norme 410 avec un pourcentage de Chrome élevé pour faire face aux conditions de fonctionnement du compresseur caractérisé par la possibilité de la corrosion.

Ce travail a été validé par un équilibrage à basse et haute vitesse. Lors des premières exécutions nous avons remarqué un certain déséquilibre, mais lors de la dernière exécution de l'équilibrage à haute vitesse nous avons eu une amplitude de vibration inférieure à celle exigée par la norme API612. Pour ceci nous pouvons dire que le rotor est prêt pour expédition et montage avec le stator pour fonctionnement.

Conclusion générale

La réparation d'un rotor d'une machine tournante qui a fait l'objet de notre étude est une opération très complexe et qui demande une maîtrise parfaite pour pouvoir la réussir. Durant la période du projet, j'ai appris plusieurs notions dans ce domaine en commençant par la préparation et l'inspection jusqu'à l'étape du revêtement.

Pour ce faire, une étude comparative est faite sur des échantillons revêtus avec les deux procédés les plus adéquats aux machines tournantes « HVOF & Laser Cladding », où nous avons obtenu de très bons résultats par rapport aux contrôles non destructifs avec ultrasons et ressuage pour les deux échantillons. De plus, lors de l'observation microscopique des échantillons nous avons remarqué une bonne adhérence du revêtement et aucune microporosité n'a été visualisée à l'interface. Nous avons pu aussi comprendre que le laser cladding peut revêtir une épaisseur allant jusqu'à un millimètre par contre le procédé HVOF ne revêt que pour quelques centaines de micromètre. En revanche, nous avons détecté une zone de NiCr, NiAl d'une épaisseur maximale de $36.70 \mu\text{m}$ entre le revêtement et le substrat pour le procédé HVOF qui est au faite une zone d'accroche métallique pour garantir une bonne adhérence et quelques microporosités pour le Laser Cladding de diamètre maximal $44 \mu\text{m}$ à la zone du revêtement qui sont dus au phénomène de sphérisation. Par ailleurs, nous avons effectué un test de contrôle d'usure et les deux échantillons ont donné un bon résultat avec un taux d'usure de l'ordre de $3 \text{ e-}06 \text{ mm}^3/\text{N/m}$.

Cette étape a été d'une grande utilité pour notre étude de cas de maintenance du rotor X04J, où nous avons acquis les connaissances qu'il faut pour aborder un sujet d'une telle complexité.

Notre étude de cas s'est basée principalement sur les rapports d'inspection et réparation du rotor. Lors de l'inspection du rotor, cinq zones endommagées ont été détectées, elles ont été réparées avec le procédé Laser cladding avec une poudre de norme AISI 431 caractérisée par un pourcentage élevé de Chrome pour faire face aux problèmes rencontrés lors du fonctionnement de notre machine qui sont l'usure et la corrosion.

Conclusion générale

Des chemises entre étages et aux extrémités de l'arbre ont été reconstruite selon la norme AISI 410 caractérisé un pourcentage élève du nickel et Chrome pour avoir une dureté élevé et un bon comportement face à la corrosion.

Ce travail a été couronné par une prise de dimension du rotor après remontage des chemises et les impulseurs et le résultat a été bon avec une erreur maximale de 0.00037%. Un équilibrage à basse et haute vitesse a été effectué et a donné des amplitudes de vibration inférieures à celle exigée par la norme API612.

A la fin de ce travail, on conclut que le choix d'une méthode de revêtement et la poudre est une décision complexe et prend en compte plusieurs paramètres, à savoir l'adhérence, l'épaisseur, les conditions de fonctionnement de la pièce et son rôle. Pour cela il faut faire une étude approfondie avant de se projeter à la réparation car chacune des méthodes étudiées s'adapte dans des conditions bien précises.

Cette opportunité m'a permis aussi d'élargir mes compétences et acquérir un savoir-faire dans le domaine de la maintenance des machines tournantes à savoir les différents tests de contrôle non destructif faits sur les deux échantillons. J'ai pu interpréter les résultats, analyser par spectroscopie, assister à des séances de revêtement et connaître les différents paramètres à prendre en considération, manipuler avec un microscope électronique à balayage et utiliser un tribomètre pour voir le comportement des matériaux face à l'usure.

Enfin je souhaite que ce modeste travail soit un document important qui sera utilisé comme référence pour les promotions à venir.

Perspectives et recommandations

Durant ce projet nous avons été très bien orientés par l'équipe mécanique du complexe GL2Z qui est en train de faire un travail énorme pour garantir une stabilité de production du gaz naturel liquéfié et par conséquent un revenu stable pour le pays.

Nous voudrions attirer l'attention des responsables de la nécessité de création d'une base de données qui contient des informations actualisées sur toutes les machines du complexe en se basant sur leurs numéros de références et non pas sur leurs TAG number.

Nous voudrions aussi mettre la lumière sur l'importance de création de base de données commune entre le complexe GL2Z et l'entreprise TMComas pour pouvoir suivre l'état du rotor au fil du temps.

En sus des tests effectués lors de cette étude, il est recommandé de procéder à d'autres tests afin de mieux cerner le comportement des pièces mécaniques tournantes ayant fait l'objet d'un revêtement :

- Le test de corrosion permet de constater le comportement du revêtement.
- Le scratch test permet de mesurer la force de friction, la force de pénétration et les vibrations acoustiques émises.
- Un test de traction sur un fil métallique collé au revêtement permet de révéler l'adhérence du revêtement sur le substrat.

Références Bibliographiques

- [1]: Khelif Ilyes. Diagnostic des machines tournantes. Thèse Soutenue 2013-2014. Université Badji Mokhtar,
- [2] : H.Bennour. Cours Turbomachine, 2017-2018. Ecole Nationale polytechnique, Alger.
- [3]: Manuel opératoire de procédé X04J & X04JT, Sonatrach- Complexe d'Arzew, Mars 1979.
- [4]: I. Hanlon, Paul C . Compressors—Handbooks, manuals, etc. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 2001.
- [5]: Mahbub Hasan, Thèse soutenue 2004-2005. Dublin City University,
- [6]: Hans Gedda, These. Laser Cladding : an experimental and theoretical investigation. Soutenue 2004-2005. Lulea University of Technology,
- [7]: Rafik Halimi,. These. Etude du comportement à l'endommagement des matériaux composites stratifiés et sandwiches. Soutenue 2012-2013. Université M'hammed Bougara - Boumerdes,

Sitographie

[8] : <http://www.tmn-industries.fr> (Consulté le 30 Avril 2019)

[9] : <https://www.connaissancedesenergies.org> (Consulté le 30 Avril 2019)

[10] : <https://engineermind.com> (Consulté le 30 Avril 2019)

[11] : <http://www.actemm.com> (Consulté le 15 Mai 2019)

[12] : <http://www.hubertfaigner.com> (Consulté le 15 Mai 2019)

,

