

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 - Sonatrach

TALLERES MECANICOS Comas

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

**Étude théorique et numérique sur la préparation des
surfaces et les techniques de rechargements**
Etude de cas : Rotor d'un compresseur centrifuge X04J

Rania BENKIRAT

Sous la direction de :

- ◆ Djamel SAIDI M C B
- ◆ Brahim GUERGUEB M A A

Présenté et soutenu publiquement le : 06/10/2020

Composition du jury :

- ◆ Président : Yacine BELKACEMI M C A
- ◆ Examineur : Hamid SEDJAL M A A

ENP 2020

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 - Sonatrach

TALLERES MECANICOS Comas

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

**Étude théorique et numérique sur la préparation des
surfaces et les techniques de rechargements**

Etude de cas : Rotor d'un compresseur centrifuge X04J

Rania BENKIRAT

Sous la direction de :

- ◆ Djamel SAIDI M C B
- ◆ Brahim GUERGUEB M A A

Présenté et soutenu publiquement le : 06/10/2020

Composition du jury :

- ◆ Président : Yacine BELKACEMI M C A
- ◆ Examineur : Hamid SEDJAL M A A

ENP 2020

ملخص :

مشروع التخرج هذا هو نتيجة تعاون بدأ في 2019 بين المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات بالجزائر ، ومجمع تمبيع الغاز الطبيعي ج ل/2 التابع لشركة سونطراك و الشركة الإسبانية تابيريس ميكانيكوس كوماس. تعد عملية تحضير السطح قبل البدء في أي نوع من التلييس ذا أهمية قصوى. وبالتالي ، ستخصص الدراسة لطرق تحضير الأسطح المختلفة المستخدمة أم لا في الجزائر ، بالإضافة إلى مجالات تطبيقها ، وتقنيات التلييس المختلفة والاختبارات غير المتلفة الأكثر استخدامًا. أخيرًا، تم إجراء محاكاة رقمية لاختبارات الالتواء والانحناء على عينة اختبار باستخدام برنامج انسيس وركبانش من أجل دراسة سلوك الدوار في مثل هذه المواقف.

الكلمات الدالة: المعالجات السطحية ، تقنيات التلييس، الدوار ، ضاغط طارد مركزي.

Abstract :

This graduation project is the continuation of a collaboration started in 2019 between the National Polytechnic School of Algiers, the natural gas liquefaction complex GL2/Z of the Sonatrach company and the Spanish company Talleres Mecanicos Comas. Surface preparation before starting any type of coating is very important in the field of mechanics. Thus, the study will be devoted to the different methods of surface preparation used or not used in Algeria, as well as their fields of application, the different hardfacing and coating techniques and the most commonly used non-destructive testing. Finally, a simulation of torsion and bending tests has been made on a sample using the Ansys Workbench software in order to visualize the behavior of the rotor facing such situations.

Keywords : Surface treatments, hardfacing and coating techniques, rotor, centrifugal compressor X04J.

Résumé :

Ce projet de fin d'études est la suite d'une collaboration entamée en 2019 entre l'école nationale polytechnique d'Alger, le complexe de liquéfaction du gaz naturel GL2/Z de l'entreprise Sonatrach et de l'entreprise espagnole Talleres Mecánicos Comas. La préparation de surface avant d'entamer quelconque type de revêtement est d'une importance primordiale. Ainsi, l'étude sera consacrée aux différentes méthodes de préparation de surface utilisées ou non en Algérie, tout autant que leurs domaines d'application, les différentes techniques de rechargement et de revêtement et les contrôles non-destructifs les plus utilisés. Enfin, une simulation de tests de torsion et de flexion a été faite sur une éprouvette en utilisant le logiciel Ansys Workbench afin de visualiser le comportement du rotor face à de telles situations.

Mots-clés : Traitements de surface, techniques de rechargement et de revêtement, rotor, compresseur centrifuge X04J.

Remerciements

Ce travail est l'aboutissement d'un dur labeur et de beaucoup de sacrifices ; mes remerciements vont d'abord au bon dieu, créateur de l'univers qui m'a doté d'intelligence, et m'a maintenu en santé pour mener à bien toutes ces années d'études. Je tiens aussi à adresser mes remerciements à ma famille, et plus précisément à mes parents et mon frère qui m'ont toujours soutenus et poussés à continuer mes études. Ce présent travail a pu voir le jour grâce à leur soutien.

J'offre de sincères et chaleureux remerciements à mes deux encadreurs, M. Djamel SAIDI et M. Brahim GUERGUEB. Le mérite d'un mémoire appartient certes à l'auteur, mais également à son directeur qui l'encadre. Je salue leur amabilité, patience, disponibilité, ainsi que leur savoir.

Je tiens aussi à remercier mon co-promoteur M. Hakim MAHOUNI pour sa gentillesse, sa bienveillance et ses valeureux conseils et explications.

Je remercie également les deux équipes pédagogiques de l'école nationale polytechnique et de l'école préparatoire en sciences et techniques d'Alger pour la formation d'excellence qu'ils m'ont dispensée durant les cinq années d'études supérieures.

Enfin, j'aimerais remercier M. Yacine BELKACEMI, président de jury et M. Hamid SEDJAL, examinateur pour avoir accepté d'examiner et de juger mon travail.

Dédicaces

A mes très chers parents, source de vie, d'amour et d'affection

A mon cher frère, source d'espoir et de motivation

A toute ma famille, source de joie et de bonheur

A tous mes amis, camarades et enseignants

Et finalement,

A vous cher lecteur

Table des matières

Liste des tableaux
Liste des figures
Liste des abréviations
Introduction générale.....	11
Chapitre 1 : Etat de l'art sur les techniques de traitement et revêtement de surface	12
1.1 Introduction :	12
1.2 Techniques de traitement de surface :	12
1.2.1 Traitement mécanique de surface (TMS) :	12
1.2.2 Traitement thermique :	24
1.2.3 Traitement thermochimique :	26
1.3 Techniques de revêtement de surface :	27
1.3.1 Revêtement chimique :	27
1.3.2 Revêtement électrochimique :	29
1.3.3 Revêtement par projection thermique :	32
1.4 Les techniques de préparation et revêtement de surface disponibles en Algérie :	36
1.5 Conclusion :	36
Chapitre 2 : Fondements théoriques des méthodes de contrôle non-destructif	37
2.1 Introduction :	37
2.2 Principes généraux des CND :	37
2.3 Différentes méthodes de CND :	38
2.3.1 L'examen visuel (VT) :	39
2.3.2 Courants de Foucault (ET) :	41
2.3.3 Ressuage (PT) :	43
2.3.4 Radiographie (RT) :	45
2.3.5 Magnétoscopie (MT) :	48
2.3.6 Thermographie (IRT) :	50
2.3.7 Etanchéité (LT) :	52
2.3.8 Emission acoustique (AT) :	54
2.3.9 Ultrasons (UT) :	56
2.4 Avantages et inconvénients de certaines méthodes :	59

2.5 Critères de choix d'un CND :	61
2.6 Conclusion :	62
Chapitre 3 : Fondements théoriques sur les compresseurs centrifuges	63
3.1 Introduction :	63
3.2 Différents types de compresseurs :	64
3.3 Généralités sur les compresseurs centrifuges :	65
3.3.1 Description générale d'un compresseur centrifuge :	65
3.3.2 Types de compresseurs centrifuges :	66
3.3.3 Mode de fonctionnement des compresseurs centrifuges :	67
3.3.4 Caractérisation du compresseur centrifuge X04J :	70
3.4 Processus de réparation du rotor utilisé par TMComas :	70
3.4.1 Réparation de l'arbre :	70
3.4.2 Equilibrage du rotor :	71
3.4.3 Qualité d'équilibrage G :	73
3.5 Conclusion :	74
Chapitre 4 : Simulation du comportement du rotor du compresseur X04J sous essais mécaniques.....	75
4.1 Introduction :	75
4.2 Rappel du processus de revêtement par Laser Cladding :	75
4.3 Rappel des résultats de l'analyse chimique du rotor et de la poudre de revêtement :	77
4.4 Simulation des essais mécaniques :	78
4.4.1 But de la simulation :	78
4.4.2 Choix des dimensions et conception des éprouvettes :	79
4.4.3 Essai de torsion :	83
4.4.4 Essai de flexion :	84
4.5 Résultats et discussion :	86
4.5.1 Résultats de l'essai de torsion :	86
4.5.2 Résultats de l'essai de flexion :	88
4.6 Conclusion :	90
Conclusion générale.....	91
Références bibliographiques.....	92

Liste des tableaux :

Tableau 1-1 - Fiche technique des produits de Soféisation R101 et R102 [3].....	23
Tableau 1-2 - Processus, avantages et domaines d'application des différentes techniques de trempé [6]	24
Tableau 1-3 - Composition des électrolytes des bains alcalins cyanurés [5]	31
Tableau 1-4 - Composition des électrolytes des bains alcalins sans cyanure [5].....	32
Tableau 1-5 - Sociétés de traitement de surface en Algérie	36
Tableau 2-1 - Symboles des méthodes de contrôle les plus utilisées.....	38
Tableau 2-2 - Avantages et inconvénients des méthodes de CND	59
Tableau 2-3 - Critères de choix d'un CND selon le type de défaut [8]	61
Tableau 3-1 - Caractéristiques du compresseur X04J [11]	70
Tableau 3-2 - Valeurs recommandées de la rugosité absolue des surfaces finies de l'arbre ..	71
Tableau 4-1 - Propriétés mécaniques de l'acier CK45.....	77
Tableau 4-2 - Analyse chimique de la poudre du revêtement [11]	78
Tableau 4-3 - Propriétés mécaniques du matériau de revêtement.....	78
Tableau 4-4 - Dimensions de l'éprouvette pour l'essai de torsion selon les normes ISO.....	79
Tableau 4-5 - Dimensions de l'éprouvette pour l'essai de flexion selon les normes ISO	81

Liste des figures :

Figure 1-1 - Abrasifs de sablage [1].....	13
Figure 1-2 - Vue éclatée d'un pistolet de sablage [1]	13
Figure 1-3 – Traitement de surface par grenailage [2].....	14
Figure 1-4 - Abrasifs de grenailage (Grenailles) [1].....	15
Figure 1-5 - Traitement de surface par microbillage [1]	16
Figure 1-6 - Mouvements de la pièce et de l'outil de galetage	17
Figure 1-7 - Surface typique créée par des arêtes de coupe définies	18
Figure 1-8 - Surface typique créée par des arêtes de coupe non définies géométriquement ...	18
Figure 1-9 - Résultat d'un nettoyage par cryogénie.....	19
Figure 1-10 - Tonneau vibrant de tribofinition	20
Figure 1-11 - Différents types de brunissoirs	21
Figure 1-12 - Vue au microscope d'une protection traditionnelle [3]	22
Figure 1-13 - Vue au microscope d'une protection par soféisation [3]	22
Figure 1-14 - Trempe au chalumeau	25
Figure 1-15 - Trempe par induction	25
Figure 1-16 - Trempe au laser	26
Figure 1-17 – Exemple de pourcentage de carbone obtenu après cémentation	26
Figure 1-18 - Revêtement de surface par phosphatation [4]	28
Figure 1-19 - Revêtement de surface par chromatisation [4]	29
Figure 1-20 - Vue en coupe de la structure de l'alumine obtenue par anodisation à la surface d'une pièce en alliage d'aluminium [4].....	30
Figure 1-21 - Revêtement de surface par anodisation [4]	30
Figure 1-22 - Schéma explicatif du procédé de zingage électrolytique [5].....	31
Figure 1-23 - Principe de fonctionnement d'une torche plasma	32
Figure 1-24 - Système HVOF	33
Figure 1-25– Schéma du principe de fonctionnement du système HVOF.....	34
Figure 1-26 - Schéma du principe de fonctionnement du système HVOF	35
Figure 2-1 - Principes généraux des CND [7].....	38
Figure 2-2 - Principe de contrôle par examen visuel [7].....	39
Figure 2-3 – Principe de contrôle par courants de Foucault [7].....	42
Figure 2-4 - Principe de contrôle par ressuage [7]	44
Figure 2-5 - Principe de contrôle par radiographie	46
Figure 2-6 - Principe de contrôle par magnétoscopie.....	49
Figure 2-7 - Principe e contrôle par thermographie infrarouge active.....	52
Figure 2-8 - Principe de contrôle par émission acoustique	55
Figure 2-9 - Principe de contrôle par ultrasons	57
Figure 3-1 - Classification des différents types de compresseurs [9]	64
Figure 3-2 - Vue en coupe du schéma d'un compresseur centrifuge [10]	65
Figure 3-3 - Vue qualitative de l'écoulement dans la volute d'entrée [10].....	67
Figure 3-4 - Vue en coupe de l'écoulement dans le diaphragme d'aspiration [10]	67

Figure 3-5 - Répartition de la pression sur la roue [10]	68
Figure 3-6 - Vue en coupe de l'écoulement à travers le diaphragme intermédiaire [10].....	69
Figure 3-7 - Vue en coupe de l'écoulement à travers la dernière roue d'un étage [10].....	69
Figure 3-8 - Vue qualitative de l'écoulement dans la volute de refoulement [10]	69
Figure 3-9 - Diagramme du déséquilibre résiduel admissible en fonction de la vitesse de rotation et du poids du rotor	73
Figure 4-1 - Revêtement par laser Cladding	75
Figure 4-2 - Représentation du revêtement par Laser Cladding	76
Figure 4-3 - Résultats de l'analyse chimique de l'arbre du rotor [11].....	77
Figure 4-4 - Schéma de la première éprouvette	79
Figure 4-5 - Conception de l'éprouvette de torsion	80
Figure 4-6 - Vue en coupe du revêtement de la première éprouvette	80
Figure 4-7 - Assemblage de l'éprouvette de torsion avec le revêtement par laser cladding	81
Figure 4-8 - Schéma de la seconde éprouvette.....	81
Figure 4-9 - Conception de la seconde éprouvette	82
Figure 4-10 - Conception du revêtement de la seconde éprouvette	82
Figure 4-11 - Assemblage de l'éprouvette de flexion avec le revêtement par laser cladding ..	82
Figure 4-12 - Propriétés mécaniques de l'acier CK45	83
Figure 4-13 - Propriétés mécaniques de la couche de revêtement	83
Figure 4-14 - Maillage de l'éprouvette pour essai de torsion	84
Figure 4-15 - Application des sollicitations liées à la torsion	84
Figure 4-16 - Maillage de l'éprouvette pour essai de flexion.....	85
Figure 4-17 - Application des sollicitations liées à la flexion.....	85
Figure 4-18 - Contrainte principale maximale due à l'essai de torsion sur l'échantillon 1	86
Figure 4-19 - Contrainte principale maximale due à l'essai de torsion sur l'échantillon 2	86
Figure 4-20 - Déformation élastique maximale due à l'essai de torsion sur l'échantillon 1	87
Figure 4-21 - Déformation élastique maximale due à l'essai de torsion sur l'échantillon 2	87
Figure 4-22 - Contrainte principale maximale due à l'essai de flexion sur l'échantillon 1	88
Figure 4-23 - Contrainte principale maximale due à l'essai de flexion sur l'échantillon 2.....	88
Figure 4-24 - Déplacement directionnel dû à l'essai de flexion sur l'échantillon 1	89
Figure 4-25 - Déplacement directionnel dû à l'essai de flexion sur l'échantillon 2	89

Liste des abréviations :

CND	Contrôle non destructive
VT	Examen visuel
RT	Radiographie
ET	Courants de Foucault
UT	Ultrasons
LT	Etanchéité
AT	Emission acoustique
MT	Magnétoscopie
IRT	Thermographie
RT	Ressuage
HVOF	High velocity oxy fuel
HVLF	High velocity liquid fuel

Introduction générale :

Ce projet de fin d'études est la continuité d'un autre projet soutenu au niveau du département de génie mécanique de l'école nationale polytechnique d'Alger, il est né d'une collaboration entre l'école polytechnique, le complexe industriel de liquéfaction de gaz naturel GL2Z d'Arzew propriété de l'entreprise algérienne Sonatrach et l'entreprise espagnole Talleres Mecánicos Comas.

Afin de garder une production continue et constante dans un grand complexe comme celui d'Arzew, il est impératif d'accorder une importance à la maintenance préventive du matériel constituant la ligne de production de gaz liquéfié et de maîtriser les techniques de maintenance corrective afin d'assurer une intervention rapide et efficace.

L'entreprise espagnole TM Comas spécialisée en mécanique de précision, réparation des machines tournantes, rechargement par laser cladding et projection thermique est responsable des réparations des compresseurs de l'unité de production du complexe. Elle est ainsi intervenue sur le rotor du compresseur centrifuge X04J qui représente le cas pratique de notre étude.

A travers ce projet nous allons nous approfondir davantage sur les méthodes de préparation de surface, les techniques de revêtement ainsi que les types de contrôles non-destructifs utilisés en maintenance de machines tournantes. Pour ce faire nous avons organisé notre travail en quatre chapitres, comme suit :

- Un premier chapitre abordera les différentes techniques de traitement et revêtement de surface, ou nous expliquerons chaque méthode en détail en passant par les domaines d'application de chacune d'elles et leurs avantages.
- Le second chapitre quant à lui traitera les contrôles non-destructifs les plus utilisés, une clarification du mode d'examen avec schémas explicatifs sera faite ainsi qu'une énumération des différentes normes européennes et internationales régissant les réglementations à respecter lors de l'accomplissement de ces contrôles.
- Dans le troisième chapitre, nous parlerons des compresseurs centrifuges en particulier, nous aborderons leurs différents types et leur mode de fonctionnement en expliquant l'écoulement du gaz à travers les organes composants le compresseur. En plus, une partie sera consacrée au rotor du compresseur centrifuge X04J, ou nous mettrons en lumière la maintenance faite par l'entreprise TM Comas sur ce dernier passant par le rechargement de l'arbre jusqu'à l'équilibrage du rotor.
- Le quatrième et dernier chapitre sera consacré à la simulation d'essais mécaniques : un premier test de traction et un second de flexion seront effectués sur deux échantillons d'éprouvettes de même composition que l'arbre du compresseur et de composition modifiée après revêtement par laser cladding, et ce afin de déterminer l'efficacité d'un tel rechargement face à des sollicitations de torsion et flexion.

Chapitre 1 : Etat de l'art sur les techniques de traitement et revêtement de surface

1.1 Introduction :

Parmi les propriétés d'emploi des matériaux, de nombreuses sont liées à leur surface : aspect, résistance à la corrosion, résistance à l'usure, résistance à la fatigue thermique, aptitude au collage, aptitude au frottement...

La notion de traitement de surface regroupe tous les procédés industriels dont l'objectif est de conférer à la surface traitée des propriétés physico-chimiques particulières (composition, propreté, aspect, mouillabilité, adhérence...etc.), mécaniques ou géométriques spécifiques (rugosité, contraintes superficielles, caractéristiques tribologiques...etc.). Il peut s'agir d'une simple préparation de surface (rinçage, décapage, dégraissage...etc.), la pose d'un revêtement métallique ou un traitement par diffusion ou par transformation structurale.

L'objet de ce chapitre est d'introduire les techniques de traitement de surface ainsi que les procédés de revêtements et de traitements qui permettront de modifier une surface, afin qu'elle puisse répondre aux exigences fonctionnelles et satisfaire à la demande de durabilité des matériaux.

1.2 Techniques de traitement de surface :

1.2.1 Traitement mécanique de surface (TMS) :

- Sablage :

Une technique industrielle de nettoyage de surfaces en utilisant un abrasif projeté à très grande vitesse, au travers d'une buse, à l'aide d'air comprimé. L'objectif principal de cette technique est le décapage d'un matériau. Le sablage est un procédé applicable sur : Acier, Fonte, Inox, Aluminium.

Il crée une rugosité de surface moyenne, compatible avec l'accroche d'un revêtement ou d'une peinture poudre ou liquide. La pièce de travail traitée aura une meilleure résistance à la fatigue et une meilleure force d'adhérence, ce qui aidera le revêtement à être plus lisse et durer beaucoup plus longtemps.

Abrasif utilisé :

Comme son nom l'indique, l'abrasif utilisé est le sable (sable de quartz, sables spéciaux et sables noirs). Le type d'abrasif sera choisi selon la matière à traiter, acier, inox ou alliages non ferreux, mais aussi suivant la rugosité souhaitée en prenant en compte de la fragilité du support à traiter.



Figure 1-1 - Abrasifs de sablage [1]

Il existe plusieurs technologies de projection d'abrasif :

- Le système à dépression, simple et économique : un venturi à air comprimé, intégré au pistolet aspire l'abrasif depuis son réservoir.
- Le système à surpression : beaucoup plus productif, consiste à mettre sous pression d'air dans un récipient dans lequel est stocké l'abrasif, celui-ci est alors expulsé via un flexible et une buse.



Figure 1-2 - Vue éclatée d'un pistolet de sablage [1]

Applications :

- Nettoyage de surface.
- Ébavurage de pièces.
- Préparation avant peinture.
- Désoxydation.
- Décapage.

- Grenailage :

Le grenailage est un traitement mécanique de surface consistant à projeter des billes (ou grenailles) sur un matériau. Utilisé sur la plupart des métaux (Acier, Fonte, Bronze, Magnésium), les impacts répétés entraînent un écrouissage en surface (i.e. un durcissement) et l'établissement de contraintes résiduelles de compression. Un traitement de longue durée peut conduire à la formation d'une couche nano-structurée, c'est-à-dire formée de nano-grains, extrêmement résistante.

De nombreuses méthodes ont été développées pour grenailer des pièces. De manière conventionnelle, des grenailleuses sont utilisées pour projeter les billes sur le matériau, fonctionnant sous air-comprimé ou via une turbine. Plus récemment, de nouvelles techniques ont été développées comme le grenailage ultrasonore où les billes sont mises en mouvement grâce aux vibrations d'une enceinte fermée contenant la pièce à traiter. Cela permet d'obtenir un panel d'impacts beaucoup plus varié et ouvre de nouvelles perspectives d'utilisation.



Figure 1-3 – Traitement de surface par grenailage [2]

Abrasifs utilisés :

Grenailles d'acier (grenailles acier « Haut carbone » et grenaille inox) rondes ou angulaires :

- Les abrasifs ronds décapent par frottements et par inertie. Utilisés dans les machines à turbine, la surface est matée, rugosité minimale.
- Les abrasifs angulaires sont broyés et tamisés. Cette opération crée des arêtes coupantes qui projetée à grande vitesse, décape la surface mécaniquement. L'effritement diminue la dimension du produit mais régénère le tranchant. Les résidus se transforment en poussière.

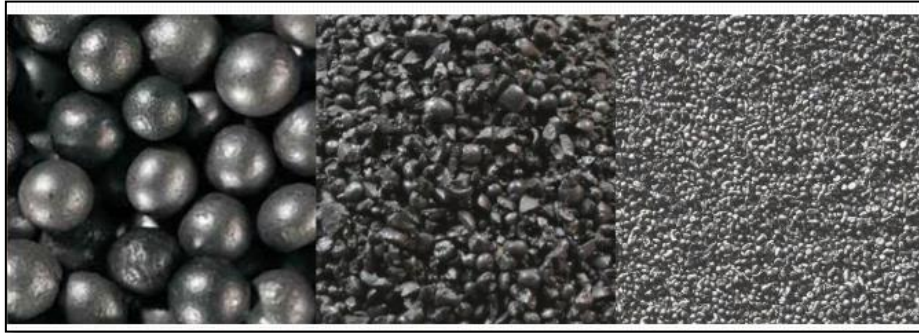


Figure 1-4 - Abrasifs de grenailage (Grenailles) [1]

Exemples d'applications :

Les secteurs industriels ayant recours au grenailage sont variés. Il est massivement utilisé dans l'industrie en particulier dans les secteurs de l'automobile, de l'aéronautique et du nucléaire pour la production de pièces métalliques soumises à des sollicitations répétitives et cycliques (train d'atterrissage, pièce de suspensions, soudure, moteurs...). Face à des contraintes de sécurité importantes et à des problématiques d'allègements des pièces utilisées, l'intérêt de cette technique est de pouvoir augmenter les performances et la durabilité des pièces sans en augmenter la masse.

Le grenailage est également utilisé dans l'industrie navale pour les opérations de nettoyage de surface avant l'application d'une peinture.

Cette technique est aussi intéressante dans l'entretien des réseaux routiers pour une meilleure adhérence des routes, un écoulement des eaux de pluie plus rapide, et pour réparer des irrégularités.

Avantages :

Le grenailage est une technique industrielle présentant différentes fonctionnalités selon son champ d'application :

- Le traitement de surface :

Le grenailage peut être utilisé afin d'éliminer la rouille, les bavures ou autres impuretés apparues au cours du processus de production. Il a pour but d'améliorer l'aspect du produit fini ou de préparer une surface avant recouvrement par une couche de protection. Utilisé seul, ce procédé permet d'éviter l'ajout d'éléments extérieurs (pas de risque de réaction chimique ou de décollement de surface), il est facile à mettre en œuvre et les billes utilisées peuvent être réutilisables après nettoyage.

- Améliorer les propriétés de résistance du matériau :

Les fissures sont à l'origine des mécanismes de rupture des matériaux. Suite au grenailage, la surface du matériau est mise sous compression afin d'éviter le développement de fissures ou d'en retenir la propagation. Dans certain cas, le procédé est même utilisé pour « refermer » des fissures. Cette technique permet ainsi d'augmenter la durée de vie du matériau en renforçant sa résistance aux contraintes extérieures, et de mieux maîtriser son évolution.

- Microbillage :

Le microbillage est un procédé de traitement de surface par impact. Il consiste à projeter des microbilles sur une surface, dans le but de la décaper sans l'abîmer. La surface obtenue est satinée brillante. Il est destiné aux surfaces fragiles grâce à sa pression d'emploi faible et sa faible agressivité. Les applications du microbillage sont nombreuses et variées. Le microbillage se rapproche fort du sablage et s'effectue avec le même type de machine.



Figure 1-5 - Traitement de surface par microbillage [1]

Les abrasifs :

Dans ce procédé de traitement, trois types d'abrasif sont généralement employés :

- Les abrasifs angulaires comme les microbilles de verre pour une grande efficacité de décapage, de désoxydation ou d'ébavurage des surfaces.
- Les abrasifs ronds tels les billes de verre, les billes de céramique ou billes métalliques préconisés pour une finition satinée sur métaux.
- Les abrasifs de gommage essentiellement composés de plastique ou de matière végétale pour le traitement de pièces délicates sans les abîmer.

Les applications :

Les applications du microbillage sont nombreuses et variées. Il est utilisé pour le nettoyage et le décapage des pièces mécaniques de toutes matières telles que l'acier, l'aluminium, l'inox ou le bois. On l'utilise aussi lors de la réalisation d'une finition pour les soudures.

- Galetage :

Le galetage est une méthode de micro-finition qui ne consiste pas à couper mais qui lisse et écrouit des surfaces métalliques avec des éléments de formage.

Pendant le galetage, les éléments de formage sont chargés avec une force dirigée verticalement vers la surface (force de galetage). Le profil de rugosité est alors déformé de manière plastique et nivelé. Le galetage change la situation de contrainte dans la couche de surface du matériau.

Fonction primaire du galetage : Le lissage

La force du galetage exerce une pression de surface (contrainte hertzienne) dans la zone de contact des éléments de brunissage. Le volume du matériau se trouvant sur les zones élevées des pics de profil est refoulé dans les creux de profil qui s'égalisent. La rugosité de la surface est donc fortement réduite.

La différence de dimension qui en résulte entre la pièce de travail pré-travaillée et la pièce de travail galetée dépend de la rugosité initiale. La force de laminage est maintenue au niveau le plus faible possible. Obtenir une surface de qualité est l'objectif principal du processus.

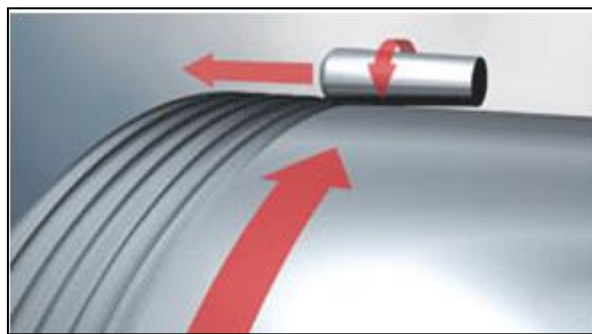


Figure 1-6 - Mouvements de la pièce et de l'outil de galetage

Qualité des pièces adéquates au galetage :

Toute surface produite avec des méthodes de coupe affiche une structure typique créée par la géométrie et l'avance de l'arête de coupe. Cette forme de surface est cruciale pour le résultat du processus de galetage :

- Surfaces créées par des arêtes de coupe géométriquement définies (ex : tournage) : Profil périodique constant, rugosité constante, pics de profil marqués.

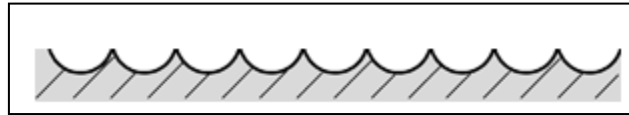


Figure 1-7 - Surface typique créée par des arêtes de coupe définies

- Surface créée par des arêtes de coupe non définies géométriquement (ex : meulage) : Profil irrégulier, faible rugosité avec "saignées simples", formation de plateau.



Figure 1-8 - Surface typique créée par des arêtes de coupe non définies géométriquement

Avantages :

- Surfaces avec une rugosité inférieure à 1 μm .
- Propriétés d'usure optimisées.
- Risque réduit de formation de fissures causée par des micro-entailles.
- Meilleure résistance à la corrosion.

- Nettoyage par cryogénie :

Le nettoyage cryogénique est un procédé qui s'apparente au sablage mais dont le média employé est le CO₂ solide ou glace carbonique. La glace carbonique est projetée sur les surfaces à nettoyer dans un flux d'air comprimé.

Principe de fonctionnement :

Ce nettoyage repose sur trois effets simultanés qui se produisent lors du contact de la glace carbonique et de la surface polluée :

- L'effet thermique provenant de la différence de température entre la glace carbonique ($-78,2^{\circ}\text{C}$) et la surface à nettoyer. Cette différence provoque un choc thermique qui va fissurer et rétracter la pollution, ce qui va la détacher de la surface.
- L'effet cinétique ou mécanique provient de l'impact de la glace carbonique sur la pollution, l'effet produit est une fragilisation mécanique de la pollution.
- L'effet physique de sublimation provient des caractéristiques physiques du CO_2 . Le changement d'état du CO_2 de $-78,2^{\circ}\text{C}$ à 20°C (température normale) est un changement de solide à gaz sans passer par la phase liquide (sublimation). Le CO_2 prend alors jusqu'à 500 fois son volume et expulse la pollution, déjà fragilisée, de son support.



Figure 1-9 - Résultat d'un nettoyage par cryogénie

Avantages :

- Un processus de nettoyage industriel sûr pour les opérateurs, les machines, l'environnement : pas de produits chimiques (ni solvants, ni détergent, ni abrasifs).
- Une technique qui ne contribue pas à l'augmentation des gaz à effet de serre (dans la mesure où l'air comprimé est d'origine électrique). La glace carbonique est fabriqué avec du CO_2 recyclé.
- Une technique de propreté sèche, non abrasive, non conductrice et utilisant un média ininflammable, 2 à 8 fois plus rapide que les techniques traditionnelles, en raison du fait entre autres, qu'elle ne nécessite pas systématiquement de démontage pour remettre au propre les surfaces.

- Tribofinition :

La tribofinition, également connue sous le nom de vibro-abrasion, est un procédé mécanique/chimique qui consiste en l'ébavurage, le cambrage, le lissage, le polissage et le dégraissage de pièces fabriquées individuellement ou en série.

La vibro-abrasion correspond au traitement de pièces qui sont submergées dans un mélange d'abrasifs et d'additifs (eau spécialement traitée) dans une machine de tribofinition. La machine vibre en provoquant le mouvement circulaire de son contenu et le meulage des pièces avec les abrasifs afin d'obtenir la finition souhaitée.



Figure 1-10 - Tonneau vibrant de tribofinition

Les abrasifs :

Le mélange abrasif est composé le plus souvent de trois composants :

- Des médias : dont le rôle est de transférer le mouvement de la cuve au mélange abrasif et aux pièces à traiter, de façon à générer les frottements qui sont à la base de l'effet abrasif. Ils peuvent être de diverses matières (métal, polymère, céramique, végétaux etc...), Ils forment en général la majorité du volume de la charge.
- Un abrasif (sous forme de poudre ou de pâte) : dont le rôle est d'amplifier l'effet des frottements, et donc l'effet abrasif. Il n'est en principe pas réutilisable car il s'use en cours de traitement.
- Un liquide (eau ou huile) : qui fluidifie le mélange et limite l'augmentation de la température.

Principales applications :

- Ébavurage : élimine les particules et les bavures qui apparaissent lorsque le métal est usiné.
- Polissage : permet d'obtenir une finition de surface lisse, brillante, réfléchissante.
- Lissage : améliore la finition de surface et uniformise tout défaut ou arête vive.
- Nettoyage : élimine les impuretés, les résidus, la graisse ou les saletés des composants.

Avantages :

- Réduction de l'usure des pièces et augmentation de la puissance de sortie.
- Rentabilité avec peu de main d'œuvre.
- Une surface plus lisse qui permet aux pièces de fonctionner plus facilement, rapidement et longtemps.
- Finition plus fiable, contrôlable et uniforme.

- Brunissage :

L'opération est réalisée avec un brunissoir, outil qui permet d'exercer une pression sur les crêtes de la surface, ce qui a pour conséquence de créer une déformation plastique de la matière pour boucher les creux, au fur et à mesure de la progression de l'outil.

Objectifs :

Le brunissage a pour but de :

- Rendre la surface du métal brillante.
- Réduire la rugosité de la surface.
- Augmenter la dureté superficielle.



Figure 1-11 - Différents types de brunissoirs

- Soféisation :

A base de résines organiques, la Soféisation est un procédé qui traite et prépare une surface oxydée à recevoir un système de peinture. Il ne développe aucune réaction chimique, son action est physique et mécanique. Il n'y a pas de formation de composés toxiques. Après polymérisation, la Soféisation crée une isolation totale des surfaces traitées.

L'exceptionnel pouvoir mouillant du R101, produit de Soféisation, lui permet de s'infiltrer par capillarité dans toutes les porosités de la couche d'oxyde ainsi que dans les fissures. Il pénètre par adsorption jusqu'au métal sain, évitant l'emprisonnement de poches d'air et d'humidité génératrices d'oxydation. Hydrophobe, il chasse l'humidité, supprimant ainsi tout risque de corrosion interne.

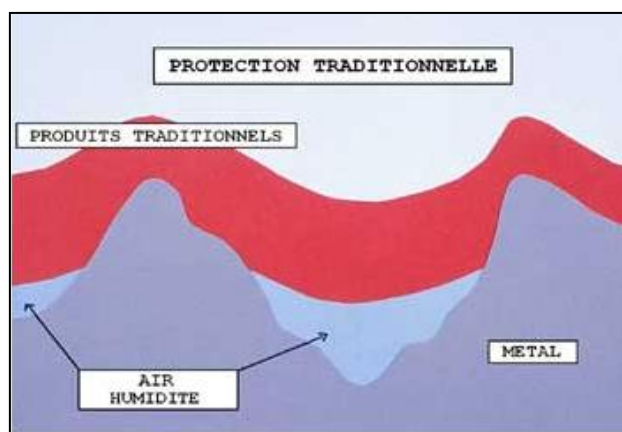


Figure 1-12 - Vue au microscope d'une protection traditionnelle [3]

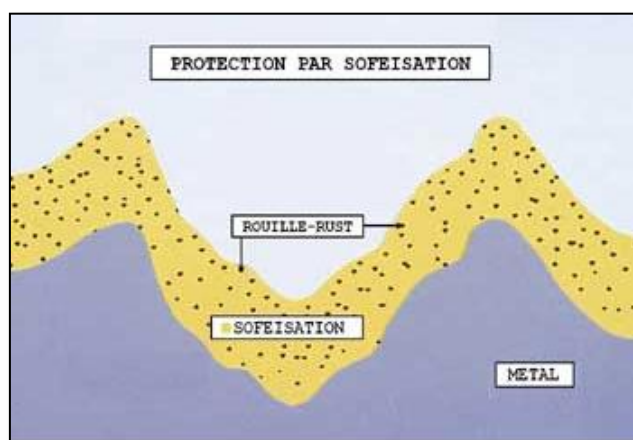


Figure 1-13 - Vue au microscope d'une protection par soféisation [3]

Eléments concernés :

La Soféisation protège de la corrosion les ouvrages en acier, fonte, aluminium, inox tels que les charpentes métalliques, appareils chaudronnés, éléments de tuyauteries préfabriqués, tôles...pendant leur transport, leur stockage et leur montage, tout en les tenants prêts à recevoir un revêtement final.

Tableau 1-1 - Fiche technique des produits de Soféisation R101 et R102 [3]

Caractéristiques	R101 incolore	R101 (rouge-brun, aluminium, ou noir)	R102 (rouge brun)
Utilisation spécifique	En couche de base sur surface rouillée	En 2 ^{ème} couche sur R101 incolore ou directement sur surface rouillée	En 2 ^{ème} couche sur R101 ou directement sur surface non rouillée
Teneur en solides	45 %	45 %	65 %
Densité	0.86	0.86	1.27
Diluant	Produit prêt à l'emploi (ne jamais adjoindre de diluant)	Produit prêt à l'emploi (ne jamais adjoindre de diluant)	Produit prêt à l'emploi (ne jamais adjoindre de diluant)
Homogénéité	Remuer à l'aide d'un agitateur avant application	Légère sédimentation des produits pigmentés à disperser à l'aide d'un agitateur avant application	Légère sédimentation des produits pigmentés à disperser à l'aide d'un agitateur avant application
Application	Brosse, rouleau, pistolet, bain (trempé)	Brosse, rouleau, pistolet, bain (trempé)	Brosse, rouleau, pistolet, bain (trempé)
Pression pour application au pistolet	2 à 2,5 bars en sortie de buse	2 à 2,5 bars en sortie de buse	2 à 2,5 bars en sortie de buse
Epaisseur	Env. 15 microns	Env. 20 microns	Env. 20 microns
Tenue température - en continu - en discontinu	De - 55° c à + 180° c Jusqu'à + 200° c	De - 55° c à + 180° c Jusqu'à + 200° c	De - 55° c à + 180° c Jusqu'à + 200° c
Résistance à l'eau salée	Excellente	Excellente	Elevée
Résistance aux acides	Elevée	Elevée	Elevée
Résistance aux bases	Elevée	Elevée	Moyenne
Réaction physiologique au soudage	Ne dégage aucun gaz nocif, ne modifie pas les paramètres de soudure.	Ne dégage aucun gaz nocif, ne modifie pas les paramètres de soudure.	Ne dégage aucun gaz nocif, ne modifie pas les paramètres de soudure.

1.2.2 Traitement thermique :

- Trempe superficielle :

La trempe superficielle est un traitement thermique qui ne modifie pas la composition chimique de la couche de surface. L'objectif de la trempe superficielle est d'obtenir une structure complètement martensitique de la couche de surface et de laisser le reste de la section dans son état initial.

La trempe superficielle augmente la dureté dans la couche de surface de la pièce ainsi que la solidité. La trempe entraîne également dans la couche de surface des contraintes de compression internes, qui conduisent à une amélioration de la résistance dynamique.

La trempe superficielle se fait en trois étapes. La couche de surface est tout d'abord amenée à la température de traitement requise. Elle est ensuite maintenue à cette température. Enfin, la pièce est refroidie à température ambiante. Tout cela se passe très rapidement, car seule la couche de surface de la pièce est concernée.

Différentes techniques de trempe :

Tableau 1-2 - Processus, avantages et domaines d'application des différentes techniques de trempe [6]

	La trempe au chalumeau	La trempe par induction	La trempe au laser
Processus	La zone superficielle est échauffée rapidement à la température d'austénitisation au moyen de brûleurs spéciaux hautement performants, avec des puissances de chauffe jusqu'à 5000 kW. Selon l'alliage, la pièce est ensuite trempée avec de l'eau, des solutions polymères, de l'huile ou de l'air comprimé. Selon l'alliage, la profondeur de trempe peut atteindre 40 mm.	Lors d'une trempe par induction, la chaleur est générée directement dans la pièce avec une forte densité de puissance. La zone à traiter est amenée très rapidement à la température d'austénitisation puis est refroidie rapidement (trempée). Selon la profondeur requise et la géométrie de la pièce, on utilise des fréquences différentes : la trempe à haute fréquence (HF), la trempe à fréquence moyenne (MF) et la trempe à deux fréquences (HF/MF).	Le laser à diodes de haute performance génère un rayon précis et puissant. La surface de la pièce à traiter est soumise à un échauffement local très rapide (>1000°C/seconde) et la microstructure est modifiée jusqu'à 1,5 mm de profondeur. La dissipation thermique vers l'intérieur de la pièce provoque un effet de trempe. Il en résulte la formation d'une zone durcie, avec une martensite de grains très fins. Un revenu n'est pas nécessaire.

<p>Avantages</p>	<ul style="list-style-type: none"> -La puissance de chauffe peut être adaptée en toute simplicité -Des profondeurs de trempe importantes sont réalisables -Possibilité de traiter de très grandes pièces 	<ul style="list-style-type: none"> -Zone de trempe précise -Reproductibilité élevée -Automatisation partielle ou totale -Pièces individuelles et grandes séries -Fidélité aux contours grâce à la technique à deux fréquences 	<ul style="list-style-type: none"> -Précise et fidèle aux contours -Peu de déformations, aucun traitement ultérieur n'est requis -Auto-trempe (aucune impureté apportée par les fluides de trempe) -Déplacement en 3D
<p>Domaines d'application</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Cylindres, arbres, pistons, rouleaux -Cames -Roues dentées de grandes dimensions -Rails et guides 	<ul style="list-style-type: none"> -Arbres et axes -Barres -Roues dentées -Crémaillères -Cylindres -Cames -Composants divers (vis, petites pièces...) 	<ul style="list-style-type: none"> -Cames -Outils de formage de tôles -Poinçons de pliage -Composants divers aux exigences élevées (ex: composants de turbine) -Surfaces et arêtes soumises à l'usure



Figure 1-14 - Trempe au chalumeau



Figure 1-15 - Trempe par induction



Figure 1-16 - Trempe au laser

1.2.3 Traitement thermochimique :

- La cémentation :

Le traitement de cémentation appliqué aux aciers est un traitement thermochimique superficiel d'enrichissement en carbone réalisé en phase austénitique (généralement 900 à 980 °C). Il est destiné à obtenir après refroidissement un durcissement superficiel par trempe.

Appliquée sur un acier à faible teneur en carbone, la cémentation permet d'assurer une forte mise en précontrainte de compression de la surface et une bonne résistance à l'usure grâce à l'obtention d'une martensite à haute teneur en carbone, tout en garantissant à cœur une bonne ductilité grâce à l'obtention d'une martensite à bas carbone (la transformation du cœur sera, selon la trempabilité de l'alliage et la section de la pièce à traiter, totale ou partielle).

Les profondeurs de diffusion du carbone seront pratiquement limitées à 4 mm pour des raisons économiques évidentes. Les fortes profondeurs seront réservées aux pièces de mécanique lourde, les profondeurs les plus courantes variant de 0,3 à 2,5 mm.

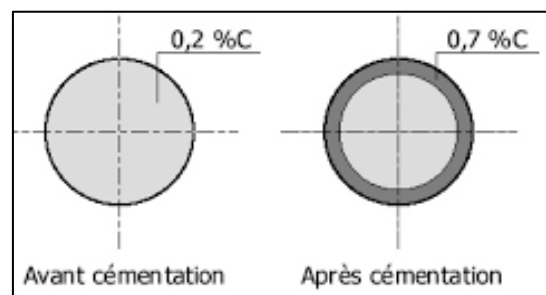


Figure 1-17 – Exemple de pourcentage de carbone obtenu après cémentation

Modes de cémentation :

La cémentation est appliquée aux aciers à faible teneur en carbone (0,5 à 0,02 % C) pour les grosses pièces jusqu'à 0,3 % C. Le choix de la nuance d'acier est nécessaire pour que le cœur de la pièce garde sa ductilité. Il existe trois modes essentiels de cémentation :

- Par agents solides : Ce procédé n'est cité que pour mémoire, il n'est pratiquement plus utilisé industriellement. Le principe est de noyer les pièces à traiter dans un ciment solide à base de charbon de bois, le tout étant maintenu dans une caisse fermée portée à la température de cémentation (900 à 950 °C).
- Par agents gazeux : Le traitement est réalisé dans un four étanche dans lequel on maintient une atmosphère contrôlée constituée d'un gaz support auquel on ajoute si nécessaire, pour atteindre le potentiel carbone souhaité, un gaz d'enrichissement en carbone et, en plus, en azote dans le cas de la carbonituration.
- Par agents liquides : Le milieu liquide est un bain de sels en fusion riche en produits carburants dans lequel on immerge les pièces. Ce procédé fortement développé jusqu'aux années 70 a beaucoup décliné depuis la dernière décennie. Les raisons essentielles sont liées à l'environnement et aux conditions de travail et principalement à la nature cyanurée de ces bains. Des formulations sans cyanure ont été développées pour s'affranchir de cet aspect mais l'efficacité relative de ces formules et les contraintes des bains de sels même exempts de cyanures n'ont pas permis de maintenir la place de cette technique par rapport aux procédés gazeux.

1.3 Techniques de revêtement de surface :

1.3.1 Revêtement chimique :

- Phosphatation :

La phosphatation est un procédé de conversion chimique permettant d'obtenir une couche cristalline de phosphates (Mn, FeMn, Zn, ZnFe, ZnCa). Cette couche est encreée dans le métal et confère à celui-ci différentes caractéristiques. Il existe deux types de phosphatation : la phosphatation zinc et la phosphatation manganèse



Figure 1-18 - Revêtement de surface par phosphatation [4]

Matériaux pouvant être traités :

- Alliages ferreux.
- Alliages d'aluminium.
- Alliages de zinc.
- Revêtements de cadmium.

Avantages :

Suivant matériaux d'apport :

- Phosphatations type Manganèse :
 - Amélioration du frottement.
 - Amélioration de l'accrochage des films lubrifiants.
 - Propriétés anticorrosion.
- Phosphatations type Zinc :
 - Amélioration de la résistance à la corrosion.
 - Excellente base d'accrochage pour revêtements organiques de finition.
 - Propriétés déformation à froid.

- Chromatation :

La chromatation est un traitement de conversion chimique pouvant être appliqué par aspersion ou par immersion à partir de solutions contenant du chrome hexavalent, pour former des couches d'oxydes complexes. Les conversions avec fluorures et éventuellement du ferricyanure de potassium induisent une coloration iridescente à jaune de la couche.

La durée de traitement varie de 1 à 3 minutes et la température maximale d'utilisation est de 70°C (pour éviter une fissuration importante de la couche). Les couches obtenues sont de faible épaisseur d'environ 0,5 µm, soit une masse surfacique de l'ordre de 1 g/m².

Substrats :

Tous les alliages d'aluminium. L'alliage utilisé influe fortement sur le niveau de performance obtenu.

Avantages :

Utilisée sur les matériaux en alliage d'aluminium, la chromatisation apporte de nombreux avantages à vos pièces :

- Protection contre la corrosion.
- Favorisation de la conductivité électrique.
- La couche de chromatisation est une excellente base d'accrochage pour les finitions organiques.

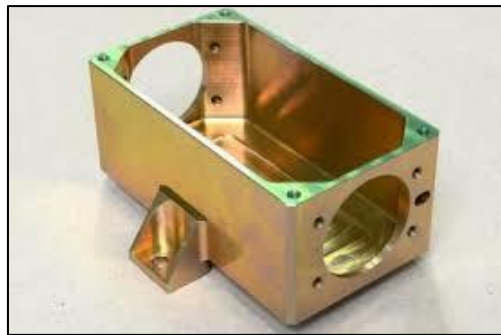


Figure 1-19 - Revêtement de surface par chromatisation [4]

1.3.2 Revêtement électrochimique :

- Anodisation :

L'oxydation anodique sulfurique, également connue sous l'appellation d'anodisation sulfurique, est un procédé électrochimique qui consiste à former une couche d'alumine protectrice à la surface des alliages d'aluminium. L'anodisation est basée sur le principe de l'électrolyse de l'eau. L'oxygène se dirige vers l'anode à traiter pour transformer l'aluminium en alumine.

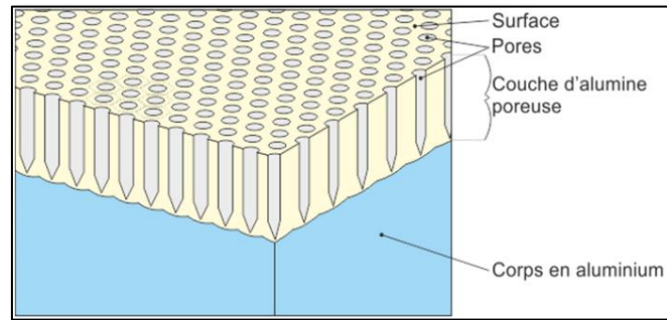


Figure 1-20 - Vue en coupe de la structure de l'alumine obtenue par anodisation à la surface d'une pièce en alliage d'aluminium [4]

L'alumine, d'une épaisseur variant de 5 à 25 μm , est constituée d'une couche barrière très fine et d'une couche poreuse plus épaisse. Cette porosité permet une coloration par absorption de colorants (noir, or, rouge, bleu...)



Figure 1-21 - Revêtement de surface par anodisation [4]

Propriétés :

L'anodisation sulfurique offre de nombreuses propriétés avantageuses pour les matières en alliages d'aluminium :

- Excellente protection contre la corrosion.
- Bonne isolation électrique.
- Durcissement de la surface.
- Multitude de colorations possible.

- **Le zingage électrolytique :**

Le zingage est un terme général désignant tout traitement de surface entraînant la formation d'un revêtement métallique de zinc. L'objectif est d'empêcher la dégradation du métal recouvert par corrosion. En effet, le zinc est un métal très réducteur qui est donc oxydé à la place du métal qu'il protège.

Le zingage électrolytique ou électro-zingage ou encore galvanisation à froid est une technique de traitement sur acier qui nécessite au préalable le nettoyage des pièces. La préparation de la surface à traiter se déroule en deux étapes : dégraissage et décapage, chacune suivie d'une phase de rinçage. Les pièces sont ensuite trempées dans un bain alcalin.

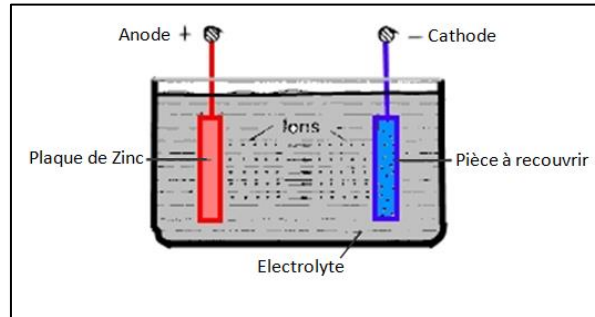


Figure 1-22 - Schéma explicatif du procédé de zingage électrolytique [5]

Métaux réceptifs :

- Alliage d'aluminium.
- Acier.
- Laiton.
- Bronze.
- Cuivre.

Bains alcalins :

- Cyanurés : ils contiennent du zinc, du cyanure de sodium et de l'hydroxyde de sodium. Le tableau suivant montre les valeurs usuelles à respecter à température ambiante :

Tableau 1-3 - Composition des électrolytes des bains alcalins cyanurés [5]

Composition des électrolytes			
	Zinc	Hydroxyde de sodium	Cyanure de sodium
Faible cyanure	6-10 g/l	75-90 g/l	10-20 g/l
Moyen cyanure	15-20 g/l	75-90 g/l	25-45 g/l
Haut cyanure	25-35 g/l	75-90 g/l	80-100 g/l

À cause des risques importants d'hygiène et sécurité que font courir les bains cyanurés, ces électrolytes sont remplacés par les bains alcalins sans cyanure.

- Alcalins sans cyanure : ils sont constitués de zinc et de soude. Le contrôle s'effectue par le suivi rigoureux du zinc et de la soude selon le tableau ci-dessous. Une forte teneur en zinc privilégie le rendement faradique mais diminue le pouvoir de pénétration des dépôts aux faibles densités de courant.

Tableau 1-4 - Composition des électrolytes des bains alcalins sans cyanure [5]

Composition des électrolytes		
Avantage	Zinc	Soude
Meilleure distribution métallique	6-14 g/l	120 g/l
Meilleure productivité	14-25 g/l	120 g/l

1.3.3 Revêtement par projection thermique :

- Projection plasma :

Le procédé de projection plasma soufflé utilise comme source thermique un arc électrique éclatant entre une cathode et une anode dans un plasma gazeux, initié par une décharge haute fréquence en général. Le flux gazeux, ainsi porté à très haute température (15 000 à 20 000 °C), est étranglé dans une tuyère, et s'échappe de la buse à vitesse élevée. C'est à l'intérieur de ce jet de plasma à haute énergie que l'on injecte le matériau d'apport sous forme de poudre véhiculée par un gaz porteur. Les particules sont fondues et transportées par ce jet de gaz sur le substrat .

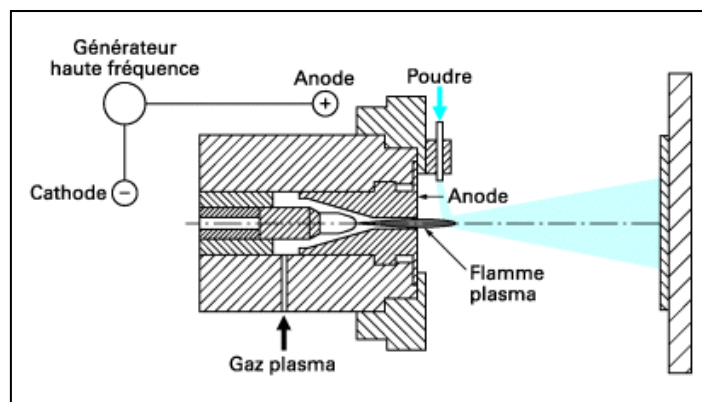


Figure 1-23 - Principe de fonctionnement d'une torche plasma

Matériaux projetables :

Les matériaux projetables par ce procédé peuvent être répartis en cinq grandes familles :

- Les métaux purs (Mo, Ti, Ta, Al, Zn)
- Les alliages (NiCr, NiAl, NiCrAlY...)
- Les céramiques (Al_2O_3 , Cr_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2)
- Les carbures (WC, Cr_3C_2 ...)
- Les cermets ($Cr_3C_2/NiCr$, WC/Co , $ZrO_2/NiAl$...)

Avantages :

Le grand avantage de la projection plasma est sa capacité à projeter un vaste éventail de matériaux (des métaux aux céramiques réfractaires) sur des composants de toutes tailles, de façon à obtenir :

- Protection contre la corrosion
- Résistance à l'usure
- Réduction des jeux – matériaux abrasifs et abrasables
- Résistance à la chaleur et à l'oxydation
- Gestion des températures
- Résistivité et conductivité électriques

- Projection HVOF (High Velocity Oxy/Fuel) :

Le processus HVOF est utilisé pour améliorer ou restaurer les propriétés ou dimensions de surface d'un composant. Les matériaux fondus ou semi-fondus sont projetés sur la surface via un courant gazeux à température et vitesse élevées (hyper-sonique), générant un revêtement dense qui peut être rectifié afin d'obtenir une finition de surface de qualité.

Ce procédé permet de réaliser des dépôts de plusieurs dixièmes d'épaisseur avec un taux de porosité inférieur à 2% en projetant des poudres de granulométrie de $5\mu\text{m}$ à $75\mu\text{m}$.

La vitesse des particules peut atteindre 850m/s , la résistance d'arrachement d'un revêtement jusqu'à 55MPa .



Figure 1-24 - Système HVOF

Processus de fonctionnement :

Le processus utilise pour combustible une combinaison de l'Oxygène (comburant) avec divers gaz (carburants), comme l'Hydrogène, le Propylène, le Propane, le Méthane ou le

Kérosène. Le principe est basé sur une réaction de combustion à haute pression (0,5 à 0,7 MPa en moyenne) dans une chambre prévue à cet effet. Il en résulte une flamme caractérisée par une température comprise entre 2500 et 3200°C et des écoulements gazeux très énergétiques et extrêmement rapides (plusieurs fois la vitesse du son). Les poudres à pulvériser sont injectées, par un gaz porteur neutre, axialement dans les gaz chauds en extension, où elles sont fondues à des températures comprises entre 1500 et 2500K. Elles sont alors accélérées au travers d'une tuyère «convergente-divergente» et propulsées à des vitesses comprises entre 300 et 600 m/sec. Le pistolet de projection est refroidi par un circuit d'eau, concentrique à la chambre de combustion et la tuyère d'éjection.

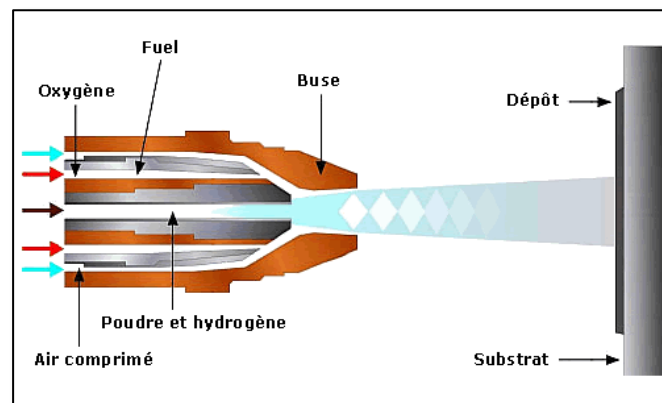


Figure 1-25– Schéma du principe de fonctionnement du système HVOF

Applications :

Ce procédé est principalement utilisé pour projeter des métaux (Inox, Chrome, Molybdène, Inconel, MCrAlY, NiCR), des alliages de métaux, des alliages auto-fusibles, des carbures et des cermets (WC-Co, TiC-Ni) ou des céramiques. Les applications sont les protections anticorrosion et anti-usure, avec la possibilité de réaliser des dépôts de fortes épaisseurs (en plusieurs passes), dont la densité obtenue approche la densité théorique du matériau d'apport.

Avantages :

- Coûts réduits
- Amélioration des performances
- Amélioration des propriétés électriques
- Possibilité d'utiliser les composants à des températures plus élevées/basses
- Possibilité d'utiliser les composants dans des environnements chimiques exigeants
- Efficacité améliorée
- Amélioration de la durée de vie des composants de contact

- **Projection HVOF (High Velocity Air/Fuel) :**

La technique de la projection thermique par HVOF, est un procédé qui consiste à chauffer et projeter des matériaux, sous forme de poudre, à très grande vitesse sur la surface du rouleau. Cette technique est souvent utilisée pour la protection contre l'abrasion, l'érosion, la corrosion, la restauration de surfaces et la protection chimique.

HVOF, qui signifie « High Velocity Air Fuel », est un procédé de projection à chaud utilisant de l'air comme comburant. Le dispositif de projection thermique consiste en un pistolet HVOF utilisant l'injection de poudre dans un jet air-carburant à une température de l'ordre de 1900°C. Cette technique permet d'appliquer efficacement des matériaux à base de carbures et peut également appliquer des métaux avec une oxydation quasi nulle.

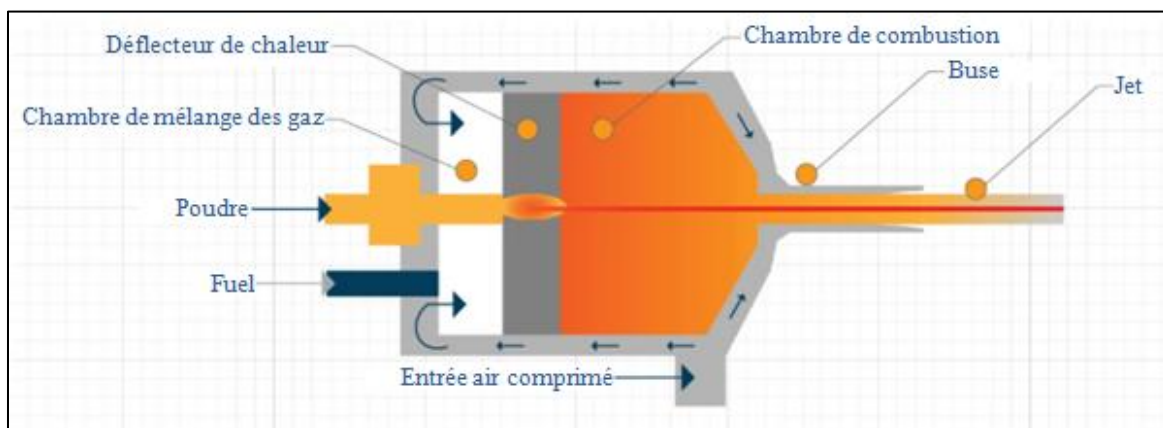


Figure 1-26 - Schéma du principe de fonctionnement du système HVOF

Applications :

- Protection contre l'abrasion, l'érosion et la corrosion.
- Restauration des surfaces.
- L'augmentation du diamètre.
- La pulvérisation des diamètres intérieurs des tuyaux
- Altération de la surface de couches minces pour préparer d'autres procédés tels que la galvanisation.

Avantages :

Les revêtements HVOF sont très denses et tenaces, cela permet d'appliquer de fortes épaisseurs. Les avantages de ce revêtement sont :

- Forte résistance à l'abrasion.
- Meilleure résistance à la corrosion.
- Possibilité d'appliquer de fortes épaisseurs.
- Possibilité de rugosités élevées.
- Possibilité d'appliquer une finition anti-adhérente.

1.4 Les techniques de préparation et revêtement de surface disponibles en Algérie :

En Algérie, un bon nombre de techniques de traitement de surface sont utilisées dans les domaines de maintenance corrective. Parmi les entreprises les plus reconnues pour leurs prestations de services, nous citons :

Tableau 1-5 - Sociétés de traitement de surface en Algérie

Société	Services	Lieu
Société nationale des véhicules industriels (SNVI)	Phosphatation au zinc	Rouiba – Alger
Centre de développement des technologies avancées (CDTA)	Projection thermique – cabine plasma	Baba Hassen – Alger
Chromage industriel Algérie (SCIA)	Spécialité chromage dur	Blida
Electrochemicals technologies	Produits chimiques et équipements destinés aux industries de traitement de surface	Mohammadia – Alger
L'Algérienne de construction et galvanisation (ACG)	Galvanisation à chaud	Oued Smar – Alger
ETS Abla djamil	Atelier de peinture époxy, sablage, poudrage, galvanisation, étamage et électro-zingage.	Constantine

1.5 Conclusion :

La préparation de surface avant chaque revêtement ou rechargement de surface devient de plus en plus importante dans l'industrie, en vue des améliorations apportées en termes de durabilité, qualité et fiabilité des produits. De même pour les revêtements de surface sont générateurs de progrès, ainsi ils doivent être intégrés dans tout processus d'élaboration, dès les premiers stades de la conception.

Suivant le domaine industriel concerné, les exigences des utilisateurs concernant les revêtements et les traitements de surface sont très différentes. Dans les domaines militaires, aéronautiques, nucléaires..., les performances opérationnelles, c'est à dire la fiabilité du procédé, sont primordiales. Or, les exigences techniques et réglementaires imposées par les normes sont de plus en plus sévères, et malgré le nombre considérable de procédés disponibles industriellement, cela conduit généralement à un choix limité de solutions afin de respecter l'environnement, à cause des températures croissantes et pressions élevées engendrées par ces procédés.

Chapitre 2 : Fondements théoriques des méthodes de contrôle non-destructif

2.1 Introduction :

On regroupe sous le vocable essais non destructifs ou encore contrôles non destructifs (ce dernier évoquant mieux l'aspect qualité industrielle que le premier qui évoque plutôt les examens en laboratoire) l'ensemble des techniques et procédés aptes à fournir des informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à leur utilisation ultérieure. Le terme de santé, s'il souligne une certaine parenté avec le domaine des examens d'aide au diagnostic médical, comme la radiologie ou l'échographie, délimite bien l'objectif des contrôles non destructifs qui est la mise en évidence de toutes les défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et /ou, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné.

En ce sens, le contrôle non destructif (CND) apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité des produits. Il se différencie de l'instrumentation de laboratoire et industrielle puisque l'objet est de détecter des hétérogénéités et anomalies plutôt que de mesurer des paramètres physiques tels que le poids ou les cotes d'une pièce.

Situé ainsi aux frontières de la métrologie, de l'instrumentation industrielle, scientifique et médicale, le domaine des contrôles non destructifs constitue un secteur spécifique d'activité scientifique et industrielle possédant ses propres structures professionnelles qui regroupent des industriels fabricants ou distributeurs spécialisés, des organismes d'étude et de formation, des sociétés de services, ainsi que les départements spécialisés d'un certain nombre de grosses entreprises industrielles fortement utilisatrices de ces techniques.

2.2 Principes généraux des CND :

Quelle que soit la méthode adoptée, on peut représenter la mise en œuvre d'un système CND suivant le synoptique suivant :

La cible se caractérise par un ensemble de paramètres que l'on va chercher à estimer afin de former un diagnostic d'intégrité. La mise en œuvre d'un système CND adéquat va permettre de produire un certain nombre de signaux qui sont fonction des paramètres recherchés. Une étape «d'inversion», plus ou moins compliquée, est bien souvent nécessaire afin de retrouver les paramètres initiaux de la pièce.

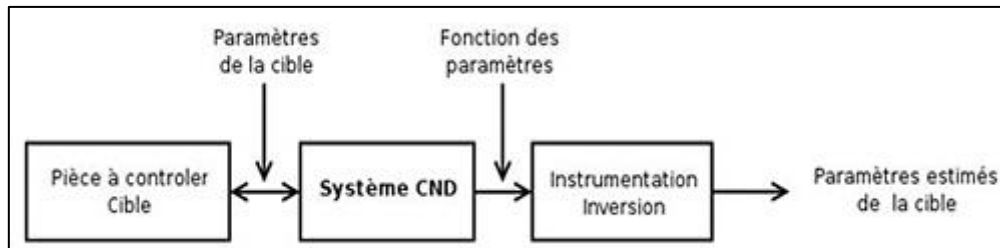


Figure 2-1 - Principes généraux des CND [7]

2.3 Différentes méthodes de CND :

Les normes EN 473 et EN 4179 définissent un certain nombre de symboles pour les méthodes usuelles. Ces symboles correspondent généralement à l'abréviation de la désignation anglaise de la méthode, par exemple, le symbole PT pour ressuage vient de « Penetrant Testing ».

Tableau 2-1 - Symboles des méthodes de contrôle les plus utilisées

Examen visuel	VT	Radiographie	RT
Courants de Foucault	ET	Ultrasons	UT
Etanchéité	LT	Emission acoustique	AT
Magnétoscopie	MT	Thermographie	IRT
Ressuage	PT		

2.3.1 L'examen visuel (VT) :

Principe :

Le contrôle visuel regroupe l'ensemble des techniques d'examen non destructifs qui utilisent le rayonnement électromagnétique dans le domaine de la lumière visible, c'est-à-dire dans la bande des longueurs d'onde comprises environ entre 400 à 700 nm. Il consiste à l'analyse, par un contrôleur, des variations de réflectivité relative d'une pièce soumise à un éclairage dont la géométrie et la puissance lui permettent de mettre en évidence les défauts recherchés. L'utilisation d'instruments optiques tels que des loupes, endoscopes ou systèmes télévisuels permet, lorsque cela est nécessaire, d'obtenir une plus grande sensibilité que celle de l'œil humain nu ou d'accéder à des zones de géométries complexes ou contraignantes. Des aides à la caractérisation peuvent être fournies à l'opérateur, sous la forme de lignes laser par exemple.

Le contrôle visuel est direct si le chemin optique n'est pas interrompu entre la surface inspectée et l'œil du contrôleur. Cette catégorie regroupe les contrôles à l'œil nu et ceux utilisant des loupes, miroirs, lentilles, fibres optiques, etc.

Le contrôle visuel est indirect si le chemin optique est interrompu entre la surface inspectée et l'œil du contrôleur. Cette catégorie regroupe les contrôles par photographies, caméras, vidéo-endoscopes, etc.

Le contrôle visuel permet la détection de tout défaut débouchant en surface (fissures, rayures, porosités, retassures, gouttes froides, lignes, repliures, dédoubleures, criques, tapures, dépôts, traces de corrosion, dépôts, corps migrants, arrachement, etc.).

La méthode produit une image de la pièce, et des indications éventuellement détectées. Cette image peut, dans la plupart des cas, être enregistrée pour assurer la traçabilité du contrôle. Dans le cadre d'un contrôle manuel utilisant des instruments d'optique, la détermination précise de la localisation et des dimensions des indications peut être complexe ; dans le cadre d'un contrôle mécanisé, cette caractérisation est simple à réaliser et peut être très précise.

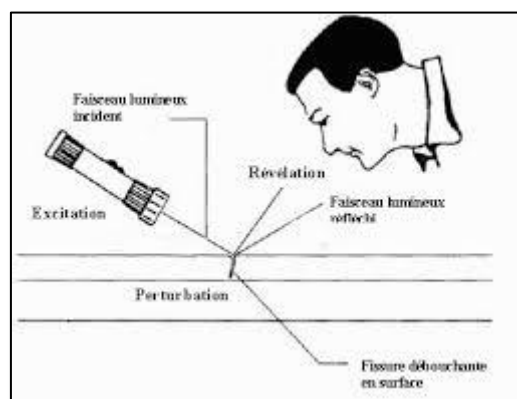


Figure 2-2 - Principe de contrôle par examen visuel [7]

Mode d'examen :

L'examen est réalisé par un contrôleur dans des conditions permettant la détection du défaut recherché sur la pièce inspectée. Les principaux paramètres qui influent sur la sensibilité de l'inspection sont décrits ci-dessous.

▪ **L'éclairage :**

La géométrie de l'éclairage doit être adaptée au défaut recherché, afin de créer le contraste nécessaire à la détection :

- Pour la recherche d'un accident de surface (fissure, rayure, trace de choc, etc.) un éclairage rasant est privilégié : les indications linéaires se détectent d'autant mieux qu'elles sont perpendiculaires au flux de lumière rasante.
- Pour une coloration de surface (brûlure, corrosion, etc.) un éclairage coaxial est privilégié.

La puissance de l'éclairage doit être adaptée au récepteur de la lumière, afin qu'un signal suffisant soit recueilli. Dans le cas d'un contrôle direct les normes préconisent un éclairement lumineux minimum de 160 à 500 lux selon le type de contrôle. Dans le cas d'un contrôle indirect, cette valeur devra être adaptée à la sensibilité du capteur d'image.

▪ **La résolution :**

La résolution (capacité du système à voir de petits défauts) doit être adaptée à la configuration de contrôle : en effet plus elle est contraignante, plus la taille du champ inspecté sera faible, et l'utilisation d'optiques, caméras, systèmes de positionnement mécanisés, etc. pourra être requise pour garantir la sensibilité. De plus l'utilisation d'optiques augmentant la résolution diminue généralement la profondeur de champ du système, ce qui augmente encore les contraintes de mise en œuvre.

À l'œil nu, il est possible de détecter des détails d'une largeur supérieure à quelques dizaines de micromètres. En utilisant des instruments d'optique, il est possible de visualiser des indications ayant une largeur de l'ordre du micromètre.

▪ **La couleur (contrôle indirect) :**

Le contrôle en couleur permet d'accéder à des informations supplémentaires, importantes en particulier dans des cas tels que la recherche de corrosion ou de dépôts, mais dans le cadre d'un contrôle indirect l'obtention d'images couleur implique une diminution importante de la sensibilité et de la résolution latérale du capteur, ainsi qu'une augmentation significative du volume des données : son utilisation devrait être limitée aux cas où elle est réellement nécessaire.

Domaine d'application :

Le contrôle visuel est une méthode largement utilisée dans tous les secteurs de l'industrie, essentiellement en contrôle de procédé ou en complément d'autres méthodes de CND. Il permet la détection et surtout la caractérisation de tous types de défauts présents en

surface d'une pièce, à la condition que le matériel d'inspection mis en œuvre ait des caractéristiques compatibles avec l'application (sensibilité, profondeur de champ, précision de positionnement en particulier). Il est utilisable sur tous types de matériaux, tant en fabrication qu'en maintenance.

La sensibilité de la méthode est peu affectée par les petites variations de géométrie, la nuance du matériau inspecté, ses caractéristiques mécaniques, etc. : le contrôle visuel est donc une méthode générale, permettant de réaliser un contrôle surfacique quand aucune autre méthode ne peut être mise en œuvre.

Le contrôle visuel atteint ses limites :

- En sensibilité sur les surfaces très brillantes ou pour la recherche de discontinuités très fines sur des pièces de géométries complexes (du fait de la faible profondeur de champ corrélée à ce type de contrôle).
- En sélectivité pour la recherche de défauts fins dont la géométrie n'est pas significativement différente de l'état de surface nominal de la pièce : dans ce cas, sa qualification peut être très complexe car la classification des indications dépend fortement du facteur humain.
- En temps de contrôle lors de la recherche de petits défauts sur des pièces de grandes dimensions à cause de la faible taille de champ associée à ce type de contrôles.

Normes associées :

- Normes actuellement en vigueur :
- NF EN 1330-10 Essais non destructifs - Terminologie - Partie 10 : termes utilisés en contrôle visuel
- NF EN 13018/A1 Essais non destructifs - Examen visuel - Principes généraux
- NF EN 13927 Essais non destructifs - Contrôle visuel – Équipement
- PrNF EN ISO 18490 Essais non destructifs — Evaluation de l'acuité visuelle du personnel END

2.3.2 Courants de Foucault (ET) :

Principe :

Cette méthode de CND consiste à créer, dans des matériaux conducteurs électriques, des courants induits par un champ magnétique variable, au moyen d'un capteur.

Ces courants induits, appelés courants de Foucault, circulent localement dans le matériau et ont une distribution et une répartition qui dépendent du champ magnétique

d'excitation, de la géométrie et des caractéristiques de conductivité électrique et de perméabilité magnétique de la pièce examinée.

En présence d'une anomalie dans la pièce contrôlée, leurs déplacements sont perturbés, entraînant ainsi une variation de l'impédance apparente du capteur qui dépend de la nature de l'anomalie et de sa dimension en volume.

C'est l'analyse de cette variation d'impédance qui fournit les indications exploitables pour effectuer le contrôle. L'interprétation des signaux recueillis s'effectue par comparaison de ceux relevés dans le matériau contrôlé avec ceux d'une pièce de référence, comportant des anomalies représentatives des phénomènes recherchés.

Cette variation est traduite en amplitude et phase sur un écran sous forme de courbes dites de "Lissajous".

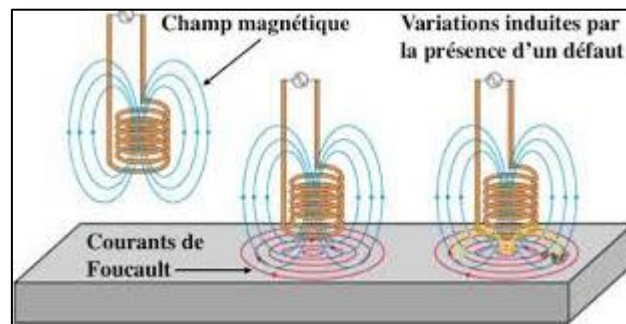


Figure 2-3 – Principe de contrôle par courants de Foucault [7]

Mode d'examen :

- **Mesure absolue** : Pour la détection de défauts longs (corrosion, usure, érosion...)

Très sensible aux variations lentes de conductivité électrique, de perméabilité magnétique et d'épaisseur du matériau, elle est utilisée en mode statique ou dynamique de caractérisation pour :

- La mesure des conductivités.
 - Le tri des matériaux.
 - La mesure des profondeurs de trempe.
 - La mesure de l'épaisseur des revêtements (peinture, dépôts électrolytiques, matières plastiques, anodisation...) ou des traitements thermo-chimiques (cémentation, nitruration...).
- **Mesure différentielle** : Pour la détection de défauts courts (fissures, soufflures, inclusions, points de corrosion, etc.)

Nécessitant un mouvement relatif entre la pièce et le capteur (mesure dynamique), cette mesure est utilisée en contrôle de santé car elle est peu sensible aux variations progressives des grandeurs qui influent sur le trajet des courants de Foucault.

Domaine d'application :

Cette méthode de CND est souvent utilisée pour détecter des défauts superficiels car les courants de Foucault ont tendance à se rassembler à la surface des corps conducteurs (effet de peau) ; elle est donc appliquée aux contrôles de tôles. Mais elle s'avère très performante pour le contrôle de structures cylindriques (barres, tubes).

Les courants de Foucault permettent également de déceler les variations de composition d'un alliage et même de mesurer des épaisseurs de revêtements. Il s'agit ainsi d'une méthode présente dans l'ensemble des industries mais en particulier dans celles de la fabrication de tubes et de la maintenance.

Le contrôle par Courants de Foucault est très apprécié du fait des possibilités diverses offertes par la sensibilité de détection et l'automatisation aisée de la méthode. En effet, l'absence de contact entre le capteur et la pièce à contrôler, la possibilité de défilement à grande vitesse et la facilité d'intégration du procédé dans les chaînes de production sont les principaux intérêts des courants de Foucault.

De plus, la reproductibilité des mesures et ce malgré la complexité des phénomènes électromagnétiques et la multitude de paramètres mis en œuvre, en font une méthode CND largement utilisée dans le cadre de maintenances ou d'étalonnages de matériel.

Normes associées :

- NF EN ISO 12718 : Essais non destructifs - Contrôle par courants de Foucault – Vocabulaire
- NF EN ISO 15549 : Essais non destructifs - Contrôle par courants de Foucault - Principes généraux.
- NF EN ISO 15548-1 : Essais non destructifs - Appareillage pour examen par courants de Foucault.
- NF EN ISO 20339 : Essais non destructifs - Appareillage pour examen par courants de Foucault - Caractéristiques des capteurs multiéléments et vérifications.

2.3.3 Ressuage (PT) :

Principe :

Le ressuage est par définition la résurgence d'un liquide (ou d'un gaz) d'une discontinuité dans laquelle il s'était préalablement introduit au cours d'une opération de pénétration. Prolongement logique de l'examen visuel, cette méthode permet donc de détecter

les discontinuités débouchant à la surface de la pièce contrôlée sous forme d'indications colorées ou fluorescentes, observées respectivement sur un fond blanc ou sur un fond noir.

Le ressuage comporte quatre phases dont la première consiste à bien nettoyer la pièce à contrôler. Un liquide coloré et/ou fluorescent, appelé « pénétrant », est ensuite appliqué sur la surface à contrôler au cours de la deuxième phase. Il pénètre par capillarité à l'intérieur des discontinuités (fissures de corrosion, porosités, piqûres, retassures, gouttes froides, lignes, replis, criques de rectification, tapures de traitement thermique, micro-amorces de rupture, etc.), nécessitant une durée de pénétration avant l'étape suivante. Durant la troisième phase, l'excès de pénétrant en surface est éliminé.

La surface peut alors être recouverte d'une couche mince de « révélateur » qui absorbe le pénétrant contenu dans les discontinuités, pendant cette quatrième phase, le révélateur fait "ressuer" le pénétrant, à la suite de quoi les indications de discontinuités apparaissent en surface.

L'observation des indications s'effectue, selon le type de pénétrant utilisé, soit sous lumière blanche artificielle (ou à la lumière du jour) soit sous rayonnement ultraviolet (UV-A).

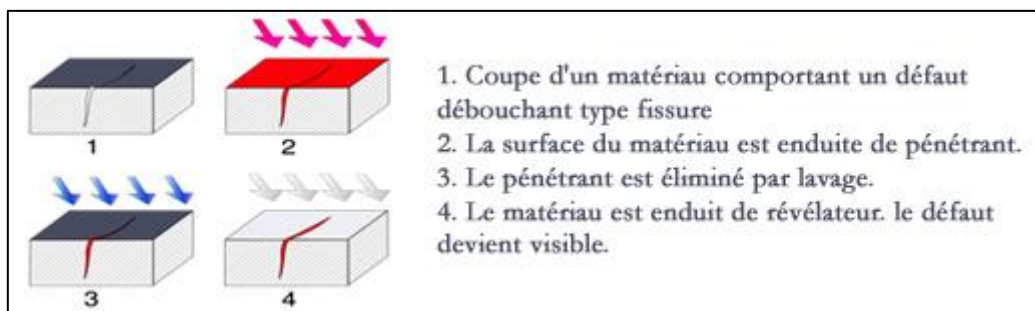


Figure 2-4 - Principe de contrôle par ressuage [7]

Mode d'examen :

Le ressuage est une méthode de CND qui s'intègre facilement dans les chaînes de production ou de maintenance. Les pièces sont traitées à différents postes : application du pénétrant, rinçage puis émulsification (dans le cas d'utilisation d'un pénétrant à post-émulsion et d'un émulsifiant hydrophile), lavage, séchage et application du révélateur. L'examen est toujours effectué, dans des conditions appropriées d'observation, par un contrôleur.

Il existe deux procédés distincts :

- Ressuage coloré : examen sous lumière blanche artificielle ou à la lumière du jour.
- Ressuage fluorescent : examen sous rayonnement ultraviolet (UV-A) ou, éventuellement, lors d'un contrôle intermédiaire, sous lumière bleue actinique.

Quel que soit le procédé utilisé, la mise en œuvre décrite ci-dessus est similaire. Les seules différences opératoires proviennent essentiellement du système de ressuage (de la famille de produits) utilisé.

Domaines d'application :

Le ressuage est ainsi une méthode largement utilisée dans le domaine des END et plus particulièrement dans des secteurs tels que : transport (aéronautique, automobile, ferroviaire, marine, remontées mécaniques), chaudronnerie, énergie (pétrole, thermique, hydraulique, nucléaire), métallurgie (fonderie, forge), complexes chimiques, mécanique, agroalimentaire (sucreries, etc.), cimenteries, Défense, manèges à sensations, prothèses médicales, plasturgie, etc., tant en fabrication qu'en maintenance.

Il permet de détecter des discontinuités ouvertes et débouchant à la surface sur tous matériaux métalliques, sur de nombreux matériaux minéraux (verre, céramiques) et également sur certains matériaux organiques. Il est donc utilisé pour contrôler :

- Des pièces moulées ou forgées.
- Des pièces mécaniques après rectification et/ou traitement thermique.
- Des pièces pré/post soudage.
- Des produits laminés ou étirés en service.

Normes associées :

- NF EN ISO 12706 : END - Contrôle par ressuage - Vocabulaire.
- NF EN ISO 3059 : END - Contrôle par ressuage et contrôle par magnétoscopie - Conditions d'observation.
- NF EN ISO 3452 : END - Examen par ressuage.

2.3.4 Radiographie (RT) :

Principe :

La radiographie est une méthode de contrôle non destructif qui consiste à obtenir une image de la densité de matière d'un objet traversé par un rayonnement électromagnétique X ou gamma. L'image est obtenue grâce à un détecteur qui est soit :

- Un film argentique.
- Un écran photostimulable à mémoire réutilisable.
- Un ensemble de détecteurs numériques.

Le principe de la méthode est basé sur l'absorption différentielle du milieu en fonction du numéro atomique des atomes le composant et de la masse volumique. Tout manque de matière induira une plus faible absorption et donc, localement, une plus forte densité optique sur le film ou un niveau de gris plus élevé dans le cas des images numériques.

En radiologie industrielle, les rayons X sont produits par un tube à rayons X (le plus souvent) ou par un accélérateur de particules pour les applications à haute énergie. Les sources de rayonnement gamma utilisées industriellement sont l'iridium 192, le cobalt 60 et le sélénium 75.

La radiographie est une technique qui permet de visualiser les manques de matière du volume de l'objet contrôlé, sur une image à deux dimensions.

En raison du caractère ionisant des rayons X ou Gamma, des consignes strictes de radioprotection doivent être appliquées.

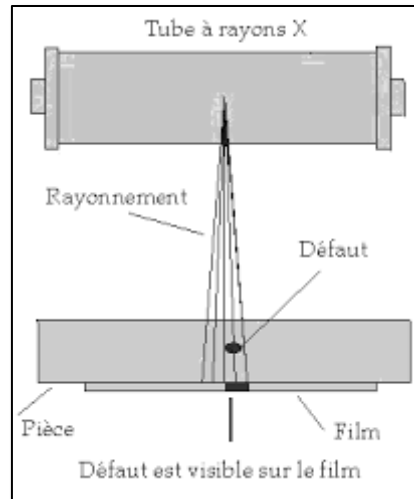


Figure 2-5 - Principe de contrôle par radiographie

Mode d'examen :

Les techniques utilisant des films ou des écrans photo-stimulables passent par une image latente obtenue lors de l'exposition aux rayonnements.

Les films argentiques sont développés manuellement ou dans une machine automatique. Le radiogramme obtenu est un négatif comportant des noircissements plus ou moins importants selon la quantité de rayonnements transmis. Le noircissement du film est caractérisé par sa densité optique traduisant sa capacité à absorber la lumière. Le film est observé sur un négatoscope possédant une source de lumière intense. Les manques de matière de l'objet apparaissent en sombre sur le radiogramme.

L'image latente des écrans photo-stimulables est révélée grâce à un lecteur-numériseur. Dans ce cas, l'image radiographique est dématérialisée et se présente sous la forme d'un fichier numérique défini par sa taille en nombre de pixels et son codage en niveaux de gris. Pour que l'écran photostimulable puisse être réutilisé, après lecture de l'information, les composés sensibles au rayonnement sont ramenés dans leur état énergétique stable : c'est l'opération d'effacement. Les lecteurs-numériseurs sont principalement de deux types : les systèmes demi-lune ou ceux à cassette. Ces derniers sont moins fragiles et plus adaptés à une utilisation industrielle mais ne permettent pas de suivre la courbure des pièces. Les images numériques obtenues peuvent subir des traitements d'images afin de faciliter la détection des indications. Cette technique radiographique utilisant des écrans photostimulables est désignée par l'acronyme anglais CR (Computed Radiography) qui signifie « radiographie assistée par ordinateur ».

D'autres types de détecteurs permettent d'obtenir directement un radiogramme numérique. Ils sont utilisés avec des installations en poste fixe comportant un système de manutention à distance qui permet de faire varier la position de l'objet (ou d'une zone de

celui-ci) par rapport à la source de rayonnements. Les objets à contrôler peuvent être observés par l'opérateur soit en temps réel avec l'enregistrement éventuel d'une vidéo (radioscopie), soit en différé sur des images obtenues après traitement d'acquisition. L'observation des images numériques en différé permet de leur appliquer une opération d'optimisation des contrastes ou des traitements d'images (filtres mathématiques). Le détecteur qui était initialement un amplificateur de brillance couplé à une caméra optique est aujourd'hui remplacé par un ensemble de capteurs numériques assemblés le plus souvent sous la forme d'un panneau plat. Cette technique radiographique permettant d'obtenir directement des images numériques est désignée par l'acronyme anglais DR (Digital Radiography) qui signifie « radiographie numérique ».

Pour le contrôle automatisé de grandes structures aéronautiques des caméras type DTC (CCD en anglais) de très haute résolution (de l'ordre de 31 μm) sont parfois employées. Elles peuvent être associées à un réseau de fibres optiques positionnées à l'entrée du détecteur.

Domaine d'application :

La radiographie est utilisée industriellement pour contrôler la santé interne d'une pièce. Elle permet de détecter tout type de cavité ou de matériaux étrangers inclus dans la pièce. Les discontinuités planes sont révélées lorsque le rayonnement est parallèle au plan de l'indication. La taille des discontinuités détectables dépend de l'épaisseur traversée. La sensibilité de la méthode est plus limitée pour des matériaux denses et épais.

La radiographie est utilisée pour le contrôle des soudures ainsi que pour rechercher des imperfections de fonderie. Elle est également très utilisée pour vérifier l'intégrité des structures composites.

Intérêt de la méthode :

L'intérêt majeur de la radiographie réside dans l'obtention d'une image bien définie de l'uniformité de matière d'une pièce. La détection des indications contrastées est facile et une distinction des différents types d'indications est possible. Par rapport aux méthodes ultrasonores, elle est relativement tolérante aux états de surface et à la structure interne du matériau. Elle est applicable à tous les types de matériaux (aluminium, acier, alliages cuivreux, titane, composites,..). Les limites de la méthode sont liées aux coûts des installations et des consommables ainsi qu'aux dangers des rayonnements ionisants imposant une réglementation et des consignes strictes.

Normes associées :

- NF EN ISO 5579 : Essais non destructifs - Contrôle radiographique des matériaux métalliques au moyen de film et de rayons X et gamma - Règles de base.
- NF EN 12681 : Fonderie – Contrôle par radiographie.
- NF EN ISO 17636 : Contrôle non destructif des assemblages soudés - Contrôle par radiographie.

- NF EN ISO 11699-1 : Essais non destructifs - Film pour radiographie industrielle - Partie 1 : classification des systèmes de films pour radiographie industrielle
- NF EN 25580 : Essais non destructifs - Négatoscopes utilisés en radiographie industrielle - Exigences minimales
- NF EN 14784 : Essais non destructifs – Radiographie industrielle numérisée avec plaques-images au phosphore.
- NF EN 13068-3 : Essais non destructifs - Contrôle par radioscopie - Partie 3 : Principes généraux de contrôle par radioscopie à l'aide de rayons X et gamma des matériaux métalliques.
- NF EN ISO 19232 : Essais non destructifs - Qualité d'image des radiogrammes.

2.3.5 Magnétoscopie (MT) :

Principe :

La magnétoscopie consiste à aimanter la pièce à contrôler à l'aide d'un champ magnétique suffisamment élevé. En présence d'une discontinuité, les lignes du champ magnétique subissent une distorsion qui génère un « champ de fuite magnétique », appelé également « fuite de flux magnétique ».

Un produit indicateur est appliqué sur la surface à examiner pendant l'aimantation (technique simultanée) ou après aimantation (technique résiduelle). Le produit indicateur noir coloré et/ou fluorescent est attiré au droit du défaut par les forces magnétiques pour former des indications.

Ces indications sont observées, dans des conditions appropriées, soit en lumière blanche artificielle ou lumière du jour, soit sous rayonnement ultraviolet (UV-A) ou lumière bleue actinique, selon le type de produit indicateur utilisé.

Les indications sont d'autant mieux détectées qu'elles se situent perpendiculairement aux lignes de force du champ magnétique. Pour détecter toutes les discontinuités à la surface d'une pièce, il faut effectuer deux aimantations orthogonales l'une par rapport à l'autre. L'aimantation longitudinale met en évidence les discontinuités transversales ($\pm 45^\circ$), et l'aimantation transversale met en évidence les discontinuités longitudinales ($\pm 45^\circ$).

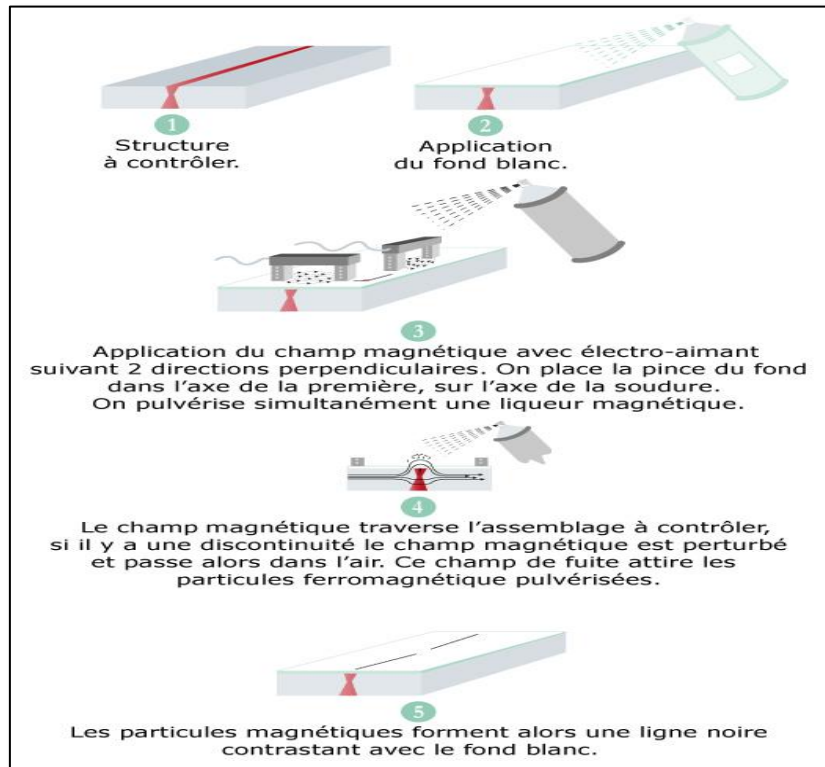


Figure 2-6 - Principe de contrôle par magnétoscopie

Mode d'examen :

La magnétoscopie peut être effectuée de diverses manières :

- Technique simultanée ou technique d'aimantation rémanente.
- Aimantation par passage soit de champ, soit de courant.
- Aimantation longitudinale, transversale ou multidirectionnelle.
- Technique d'application successive d'une aimantation transversale ou d'une aimantation longitudinale, c'est-à-dire technique combinée (aimantations transversale et longitudinale effectuées l'une après l'autre, sans observation intermédiaire).
- Courant continu ou courant alternatif sinusoïdal redressé (une ou deux alternances) ou non redressé, courant alternatif trihexaphasé (triphase redressé deux alternances), ...etc.
- Soit technique de la poudre sèche, soit technique de contrôle par voie humide.

Les équipements utilisés pour l'aimantation sont : les aimants permanents, les électroaimants portatifs, les générateurs de courants, les bancs de contrôle par magnétoscopie.

La désaimantation des pièces, lorsqu'elle est requise, est effectuée à l'aide d'un équipement de désaimantation ou de tout autre dispositif ou technique appropriés.

Domaine d'application :

La magnétoscopie est ainsi une méthode largement utilisée dans le domaine des CND et plus particulièrement dans des secteurs tels que : transport (aéronautique, automobile, ferroviaire, marine, remontées mécaniques), énergie (pétrole, thermique, hydraulique, nucléaire), chaudronnerie, métallurgie (fonderie, forge), mécanique, agro-alimentaire (sucrieries, etc.), cimenteries, complexes chimiques, Défense, manèges à sensations, etc., tant en fabrication qu'en maintenance.

Elle permet de contrôler des pièces en fer, en fonte, des aciers forgés, des soudures, des tôles, des tubes... bref, toutes sortes de pièces de géométrie simple ou complexe, pourvu que le matériau qui les constitue soit de nature ferromagnétique.

La méthode est complémentaire de celle des ultrasons ou des courants de Foucault. Là où les ultrasons détectent les discontinuités sous-jacentes peu profondes, la magnétoscopie met en évidence toutes les discontinuités débouchant en surface (ayant jusqu'à quelques micromètres de largeur), et certaines discontinuités sous-jacentes peu profondes. Contrairement aux courants de Foucault, elle est peu sensible aux effets de géométrie ; elle ne se limite pas à un contrôle local.

La magnétoscopie fait en effet partie des méthodes dites « globales », qui autorisent l'inspection de l'ensemble d'une pièce en une seule opération. Les contrôles, relativement rapides, s'effectuent aussi bien sur des vis de dix millimètres de long que sur des vilebrequins de locomotive Diesel électrique ou encore sur des trains d'atterrissage d'avions.

Normes associées :

- NF EN ISO 12707 : Essais non destructifs - Magnétoscopie – Vocabulaire.
- NF EN ISO 3059 : Essais non destructifs - Contrôle par ressuage et contrôle par magnétoscopie - Conditions d'observation.
- NF EN ISO 9934 : Essais non destructifs – Magnétoscopie.

2.3.6 Thermographie (IRT) :

Principe :

Elle permet d'obtenir, au moyen d'une caméra thermique, une carte de luminance de la scène thermique observée dans le domaine spectral de l'infrarouge. Grâce à la caméra thermique, on obtient donc une image thermique d'une scène thermique.

La technologie interne de la caméra et les programmes intégrés permettent de rendre ce rayonnement visible au travers d'une image reconstituée. L'opération de transcription de température permettra alors d'obtenir un thermogramme.

Un tel contrôle est non destructif, rapide, simple à mettre en œuvre et sans contact avec l'objet visé (sans perturbation).

Le contrôle de pièce par mesure de température permet une observation des effets thermiques de surface. Ce type de contrôle est classiquement utilisé pour le contrôle des installations électriques ainsi que celui de l'isolation thermique des bâtiments.

La thermographie infrarouge active :

Toutefois, pour des applications CND, où généralement le composant à contrôler ne génère pas spontanément de la chaleur, il existe une alternative qui consiste à lui apporter une stimulation thermique extérieure bien maîtrisée afin de provoquer l'apparition d'un gradient.

Cette méthode consiste à chauffer de manière contrôlée la surface du matériau inspecté et à mesurer l'évolution de température résultante grâce à une caméra infrarouge. On parle alors de thermographie infrarouge active.

Dans le cas de pièces défectueuses, l'analyse de la séquence d'images permet de mettre en évidence des discontinuités dans la propagation de la chaleur. Celles-ci peuvent être dues par exemple à un délaminage, une fissure ou une infiltration d'eau.

Une telle méthode présente l'avantage d'être non destructive, sans contact, rapide, modulable et facilement personnalisable en fonction des besoins.

Nous cherchons donc à observer une modification de la propagation du flux de chaleur dans la pièce à contrôler, ce qui se traduit par un contraste sur les thermogrammes.

En fonction du matériau à analyser, de son épaisseur, de la nature et de la taille du défaut recherché, différentes sources d'excitation sont utilisées afin d'échauffer la pièce à contrôler.

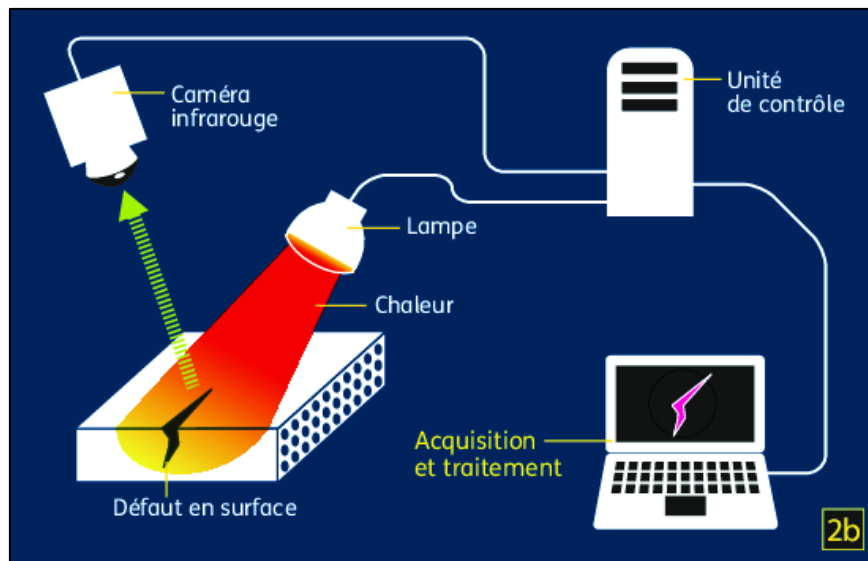


Figure 2-7 - Principe e contrôle par thermographie infrarouge active

Normes associées :

- NF A09-420 Essais non destructifs - Thermographie infrarouge - Caractérisation de l'appareillage.
- NF A09-421 Essais non destructifs - Thermographie infrarouge - Méthodes de caractérisation de l'appareillage.
- NF A09-400 Essais non destructifs - Thermographie infrarouge - Vocabulaire relatif à la caractérisation de l'appareillage.

2.3.7 Etanchéité (LT) :

Principe :

On appelle défaut d'étanchéité l'absence de matière qui autorise une fuite. Par définition la fuite est le passage d'un fluide d'un coté à l'autre d'une paroi. Il n'y a fuite que lorsque le défaut d'étanchéité est soumis à une différence de pression. Suivant le fluide concerné (liquide ou gazeux), la grandeur caractérisant une fuite est appelée « débit » ou « flux ». Les liquides étant incompressibles, nous parlons de débit-volume ou de débit-masse. Les gaz occupant le volume dont ils disposent, la quantification tient compte de la pression. Le flux de fuite se mesure en pascal mètre cube par seconde (symbole $\text{Pa m}^3\text{s}^{-1}$, dont l'expression en unités SI de base est $\text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$).

L'écoulement d'une fuite peut être modifié par :

- La nature du fluide ; air, gaz traceurs (hélium, ammoniac, halogènes, gaz du processus).
- La différence de pression entre les parois interne et externe.
- L'environnement du défaut influençant, plus ou moins, l'aptitude du passage du courant gazeux.

L'étanchéité d'un objet est déterminée par le mesurage de son flux de fuite, à savoir, la quantité de fluide qui rentre ou qui sort, dans les conditions de fonctionnement ou du contrôle.

Mode d'examen :

Le contrôle d'étanchéité est une méthode de CND qui s'applique aux pièces achevées. Elles doivent être propres, sèches et dégraissées.

Pour mettre en œuvre ces contrôles, cinq techniques sont utilisées :

- Contrôle à la bulle.
- Contrôle par variation de pression.
- Contrôle par traceur halogéné.
- Contrôle par réaction chimique du gaz ammoniac.
- Contrôle à l'hélium par spectrométrie de masse.

Domaine d'application :

Le contrôle d'étanchéité prend place en contrôle final. Il permet de garantir :

- La qualité d'un produit en évitant des entrées de fluides lors de son élaboration.
- La sûreté des matériels en confinant les produits dangereux dans le domaine de la Pétrochimie, de l'électronucléaire, du transport de gaz liquéfié.
- La sécurité des moyens de transport : automobile, aéronautique.
- La pérennité des installations dédiées à la recherche spatiale (chambres à vide, chambres de simulation) et fondamentale (accélérateurs de particules).

Les critères d'étanchéité ne sont pas définis dans des codes. Il appartient au donneur d'ordre d'en définir la valeur en fonction de ses objectifs.

Normes associées :

- NF EN 1779 Essais non destructifs - Contrôle d'étanchéité - Critères de choix de la méthode et de la technique.

- NF EN 13184 Essais non destructifs - Contrôle d'étanchéité - Méthode par variation de pression.
- NF EN 1593 Essais non destructifs - Contrôle d'étanchéité - Contrôle à la bulle.
- NF EN 1518 Essais non destructifs - Contrôle d'étanchéité - Caractérisation des détecteurs de fuite à spectrométrie de masse.
- NF EN 13625 Essais non destructifs - Contrôle d'étanchéité - Guide pour la sélection des instruments utilisés pour le mesurage des fuites gazeuses.
- NF EN 13192 Essais non destructifs - Contrôle d'étanchéité - Étalonnage des fuites de référence des gaz.

2.3.8 Emission acoustique (AT) :

Principe :

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.

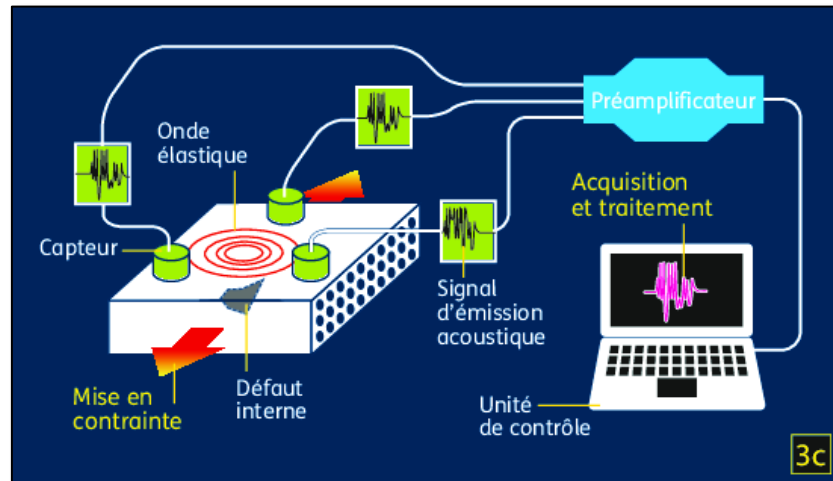


Figure 2-8 - Principe de contrôle par émission acoustique

Mode d'examen :

La mesure de l'émission acoustique générée par une structure soumise à sollicitation peut être décrite en deux phases :

- **Détection de l'onde acoustique :**

La détection est assurée généralement par des capteurs piézo-électriques permettant la conversion de l'onde acoustique en un signal électrique. Le signal d'émission acoustique est ensuite conditionné par un préamplificateur qui assure l'adaptation de l'impédance électrique, l'amplification et le filtrage. Le signal d'émission acoustique est ensuite transmis au système de mesure qui permet la numérisation, l'enregistrement des formes d'ondes en temps réel et/ou l'extraction d'un certain nombre de paramètres relatifs aux signaux. L'émission acoustique peut être continue ou discrète. Le signal d'émission acoustique discrète appelé salve a l'allure générale d'une sinusoïde amortie.

- **Analyse des données d'émission acoustique en temps réel et différé :**

Une fois les données d'émission acoustique stockées, des traitements adéquats sont appliqués afin d'évaluer les résultats des mesures. Ces traitements portent sur les paramètres des salves (analyses historique et statistique), mais permettent aussi de grouper les salves détectées par les différentes voies de mesure pour localiser les sources d'émission acoustique.

Domaines d'application :

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

- Contrôle de l'intégrité des équipements sous pression. L'émission acoustique est une alternative à l'épreuve hydraulique pour la requalification des équipements sous pression.
- Contrôle des structures industrielles telles que les réacteurs nucléaires.

- Contrôle en ligne des procédés de fabrication des matériaux.
- Surveillance des installations en fonctionnement.
- Détection des fuites.
- Détection de la corrosion.

Normes associées :

- NF EN 1330-9 : Essais non-destructifs - Terminologie - Partie 9 : termes utilisés en contrôle par émission acoustique.
- NF EN 13477 : Essais non destructifs - Émission acoustique - Caractérisation de l'équipement.
- NF EN 13554 : Essais non destructifs - Émission acoustique - Principes généraux.
- NF EN 14584 : Essais non destructifs - Essais d'émission acoustique - Contrôle des équipements métalliques sous pression pendant l'épreuve.
- NF EN 15495 : Essais non destructifs - Émission acoustique - Vérification des équipements métalliques sous pression pendant l'épreuve.

2.3.9 Ultrasons (UT) :

Principe :

Le principe du contrôle par ultrasons consiste à émettre et faire se propager une onde ultrasonore dans la pièce à inspecter puis à recueillir et analyser l'onde à l'issue de son interaction avec le matériau. Sur la base de ce principe très général, il existe de nombreuses techniques spécifiques, suivant que le contrôle est effectué en transmission ou bien en réflexion, suivant que les dispositifs en émission et en réception sont confondus ou non, suivant le type et l'inclinaison des ondes ultrasonores utilisées, etc.

La modalité de contrôle la plus répandue, dite en réflexion, est comparable à l'échographie médicale. L'émetteur et le récepteur (confondus ou non) sont positionnés du même côté de la pièce. Le récepteur recueille les échos engendrés par réflexion ou diffraction sur les obstacles rencontrés par l'onde, tels que les défauts, les interfaces entre matériaux ou encore la surface de la pièce.

Les dispositifs émetteurs et récepteurs, dits « traducteurs ultrasonores », sont en général basés sur l'effet piézo-électrique. L'élément principal, le transducteur, est constitué d'une pastille piézo-électrique convertissant un signal électrique en vibration mécanique et inversement.

Une évolution majeure dans le domaine des contrôles par ultrasons a été la progression des techniques multiéléments utilisant des réseaux de transducteurs piézo-électriques pilotés électroniquement à la réception ou à l'émission. Cette technologie, aujourd'hui couramment utilisée, permet d'adapter les caractéristiques de l'onde émise, en particulier sa focalisation ou son inclinaison, en appliquant aux différents éléments des retards électroniques calculés en fonction de l'objectif visé. Une région de l'espace peut être ainsi balayée ou le faisceau ultrasonore peut être ainsi focalisé dans le matériau à différentes profondeurs, à l'aide d'un même transducteur.

La fréquence des ondes ultrasonores utilisées varie en fonction des matériaux et des applications sur une gamme qui s'étend environ de 100 kHz à 20 MHz. Le choix de la fréquence résulte d'un compromis, entre résolution spatiale (d'autant meilleure que la fréquence est élevée) et pouvoir de pénétration (qui décroît avec la fréquence en raison du phénomène d'atténuation). Le contrôle d'une pièce en acier s'effectue typiquement à des fréquences variant entre 1 et 5 MHz.

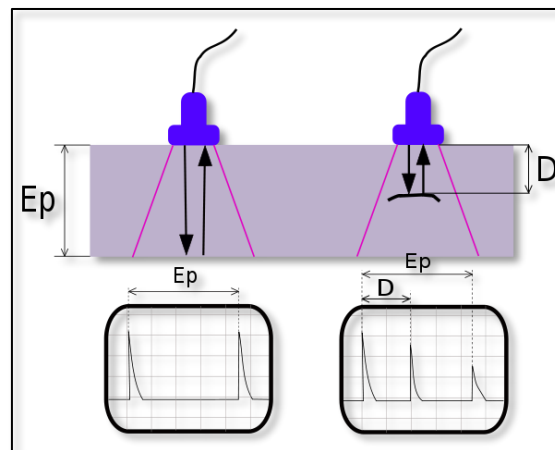


Figure 2-9 - Principe de contrôle par ultrasons

Mode d'examen :

Dans la configuration dite en réflexion, la plus commune, l'inspection d'une pièce consiste à déplacer un transducteur ultrasonore, jouant les rôles d'émetteur et de récepteur, sur ou au-dessus de la surface et à collecter puis analyser les signaux reçus.

On distingue les contrôles au contact, pour lesquels le transducteur ultrasonore est positionné sur la surface de la pièce avec utilisation d'un couplant et les contrôles en immersion, le transducteur étant alors déplacé à une certaine distance de la pièce dans un milieu liquide, en général de l'eau. On distingue également les contrôles manuels pour lesquels le déplacement du transducteur est effectué par un opérateur et les contrôles automatisés.

Le choix du transducteur, de ses dimensions, de la fréquence des ondes qu'il fournit, de l'application de réglages spécifiques (lois de retards pour les multiéléments) détermine les

caractéristiques du faisceau ultrasonore transmis dans la pièce et par voie de conséquence la sensibilité et la résolution spatiale du contrôle. Aujourd'hui, la modélisation est couramment utilisée en phase de conception pour estimer ces caractéristiques.

Le diagnostic s'effectue à partir de l'analyse des signaux reçus, la présence d'un défaut se signalant par la réception d'échos provenant de la réflexion ou diffraction du faisceau incident. Le temps de vol, c'est-à-dire le temps séparant la réception de l'écho de l'excitation de l'émetteur informe sur la localisation du défaut tandis que l'amplitude est utilisée pour la détection. La fenêtre d'acquisition temporelle est ainsi définie en fonction de la région de la pièce dans laquelle les défauts sont recherchés.

Suivant l'application, le diagnostic peut s'appuyer sur un simple dépassement d'un seuil en amplitude lors du déplacement du capteur ou bien faire intervenir une analyse plus poussée d'images échographiques de la région inspectée. Les amplitudes mesurées sont toujours des amplitudes relatives à une référence. Un contrôle par ultrasons comporte toujours une phase de calibration sur des maquettes contenant des réflecteurs de référence à partir de laquelle sont notamment définis les seuils de détection.

Domaines d'application :

Les ultrasons sont l'une des méthodes de CND les plus largement utilisées aujourd'hui. Méthode large spectre, elle peut s'appliquer à de nombreux matériaux et s'adapter à différentes géométries. Elle peut être utilisée pour la détection de tout défaut se traduisant par une discontinuité des propriétés mécaniques (fissure, inclusion, porosité, etc.).

Parmi les très nombreuses applications, citons la recherche de fissures dans les matériaux métalliques, le contrôle des soudures, le contrôle des matériaux composites, en particulier pour l'aéronautique, la recherche de porosités, etc.

A côté de la détection de défauts, les ultrasons sont également utilisés pour de l'analyse dimensionnelle (mesure d'épaisseur), le tri et la caractérisation de matériaux (identification de nuances d'acier) ou la caractérisation de traitements de surface (traitements thermiques par exemple).

Normes associées :

- NF EN 1330-4 : Essais non destructifs - Terminologie - Partie 4 : termes utilisés pour les essais par ultrasons.
- NF EN 16018 Essais non-destructifs - Terminologie - Termes utilisés pour le contrôle par ultrasons en multiéléments.
- NF EN ISO 16810 Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons - Principes généraux.
- NF EN ISO 16811 Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons - Réglage de la sensibilité et de la base de temps.

- NF EN ISO 16823 Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons - Technique par transmission.
- NF EN ISO 16826 Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons - Contrôle des discontinuités perpendiculaires à la surface.
- NF EN ISO 16827 Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons - Caractérisation et dimensionnement des discontinuités.
- NF EN ISO 16828 Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons - Technique de diffraction du temps de vol utilisée comme méthode de détection et de dimensionnement des discontinuités.
- NF EN ISO 2400 Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons - Spécifications relatives au bloc d'étalonnage n° 1.
- NF EN ISO 7963 Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons - Spécifications relatives au bloc d'étalonnage n° 2.
- NF ISO 12715 Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons - Blocs de référence et modes opératoires des essais pour la caractérisation des faisceaux acoustiques des traducteurs utilisés dans les contrôles par contact.
- NF A09-325 Essais non destructifs - Ultrasons - Faisceaux acoustiques – Généralités.
- NF EN 12668 : Essais non destructifs - Caractérisation et vérification de l'appareillage de contrôle par ultrasons.
- EN 18563 : Essais non destructifs - Caractérisation et vérification de l'appareillage de contrôle multiélément par ultrasons.
- NF EN 17635 : Contrôle non destructif des assemblages soudés - Règles générales pour les matériaux métalliques (A 89-500).
- ISO 5577 : Non-destructive testing – Ultrasonic testing – Vocabulary.

2.4 Avantages et inconvénients de certaines méthodes :

Tableau 2-2 - Avantages et inconvénients des méthodes de CND

Méthode	Avantages	Inconvénients
Examen visuel (simple)	<ul style="list-style-type: none"> - Souplesse de mise en œuvre. - Peu onéreux 	<ul style="list-style-type: none"> - Définition incomplète des critères. - Complémentaire à une autre technique.

Examen visuel (assisté)	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne précision. - Preuve : photo, enregistrement 	<ul style="list-style-type: none"> - Difficulté de repérage (espace). - Parfois onéreux (endoscope).
Ressuage	<ul style="list-style-type: none"> - Facile d'emploi. - Rapide et sensible. - Peu onéreux. 	<ul style="list-style-type: none"> - Uniquement sur défauts surfaciques. - Bon état de surface nécessaire. - Multiples manipulations.
Magnétoscopie	<ul style="list-style-type: none"> - Sensible pour défauts sous-jacents. - Facile d'emploi. - Peu de calibration. 	<ul style="list-style-type: none"> - Uniquement matériaux ferromagnétiques. - Pas d'information de profondeur.
Courants de Foucault	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de contact nécessaire. - Grande sensibilité. - Dimensionnement de défauts possible. 	<ul style="list-style-type: none"> - Essentiellement sur métaux. - Faible profondeur. - Sensible à la température et parasites.
Test d'étanchéité	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne sensibilité (microfissuration). 	<ul style="list-style-type: none"> - Cout parfois élevé.
Emission acoustique	<ul style="list-style-type: none"> - Technique intéressante pour suivre l'évolution d'une signature dans le temps. 	<ul style="list-style-type: none"> - Interprétation délicate. - Cout élevé.
Ultrasons	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne résolution (dimensionnement et fissuration). - Résultats rapides. - Dimensionnement et localisation. 	<ul style="list-style-type: none"> - Influence de l'état de surface. - Utilisation de milieu intermédiaire. - Importance de l'orientation des défauts.

2.5 Critères de choix d'un CND :

Tableau 2-3 - Critères de choix d'un CND selon le type de défaut [8]

Applications	Défauts	Ressuage	Magnétoscopie	Radiographie	Ultrasons	Courants de Foucault	Examen visuel
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		
	Fissures	x	x	x	x		
	Impuretés non métalliques	x		x	x		
	Porosité	x		x	x		
Produits finis	Fissures de traitement thermique	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	

2.6 Conclusion :

Après avoir expliqué brièvement les principes généraux et le but des contrôles non destructifs, nous avons d'abord décrit en détails les principes physiques, les modes d'examen et les domaines d'application des 9 principales familles de procédés du contrôle non destructif, à savoir : les procédés d'examen visuel, les procédés par courants de Foucault, le ressuage, les procédés radiographiques, magnétoscopiques et thermographiques, les procédés par flux de fuite, les procédés acoustiques et enfin les procédés de contrôle par ultrasons.

Par la suite, les avantages et inconvénients de chaque procédé ont été abordés ainsi que les limites d'utilisation de ces contrôles.

Enfin, nous avons montré que le choix d'un procédé de contrôle ou d'un autre dépend de plusieurs facteurs tels que la nature des matériaux, le mode de fabrication des pièces et la nature du défaut à détecter éventuellement.

Chapitre 3 : Fondements théoriques sur les compresseurs centrifuges

3.1 Introduction :

Tout processus énergétique consiste à établir des transferts de travail et de chaleur dans des appareils appropriés.

Dans les machines volumétriques, cet échange d'énergie a lieu par déformations de capacités à l'intérieur desquelles le fluide est provisoirement emprisonné. Dans les turbomachines, les écoulements sont supposés permanents en première approximation, ce qui n'est pas le cas pour les machines volumétriques.

Les turbomachines (pompes, ventilateurs, compresseurs et turbines), jouent dans ces conversions d'énergie un rôle important d'échangeur de travail entre le fluide évoluant d'une part et un organe mécanique d'autre part. Ce dernier possède une partie en mouvement constituée d'un rotor muni d'ailettes. Par exemple, une turbine est un dispositif permettant d'extraire du travail sur un fluide lorsqu'il se détend depuis une haute pression jusqu'à une pression plus faible.

Les turbomachines de compression et de détente sont des machines dans lesquelles un fluide subit une transformation lors de son écoulement, en partie le long de conduits fixes formant le stator de la machine, et en partie le long de conduits mobiles appartenant au rotor, organe recevant ou transmettant la puissance mécanique selon le cas. Ces conduits offerts au fluide sont munis d'aubes. Dans une turbine, le rotor ou arbre d'entraînement transmet la puissance mécanique à un appareil récepteur qui peut être un alternateur, une pompe, un compresseur, etc. lequel utilise cette puissance à ses propres fins.

L'objectif de ce chapitre est de présenter tout d'abord les différents types de compresseurs. Dans un second temps, on s'intéressera aux compresseurs centrifuges, leurs types ainsi que leurs composants, tout en rappelant les principes de leur fonctionnement. Enfin, une partie sera consacrée à l'étude du rotor.

3.2 Différents types de compresseurs :

Un compresseur est un organe mécanique destiné à augmenter par un procédé uniquement mécanique la pression d'un gaz. Pour exercer la même fonction sur un liquide, quasi incompressible, on utilise une pompe. Les fluides traversant les compresseurs peuvent être de nature diverse :

- Gaz pur.
- Mélange gazeux.
- Vapeur surchauffée ou saturée.

Les compresseurs peuvent être classés selon les caractéristiques suivantes :

- Le principe de fonctionnement (volumétrique, dynamique).
- Le mouvement des pièces mobiles (mouvement linéaire, rotatif).
- Le type du fluide à compresser (air, gaz).

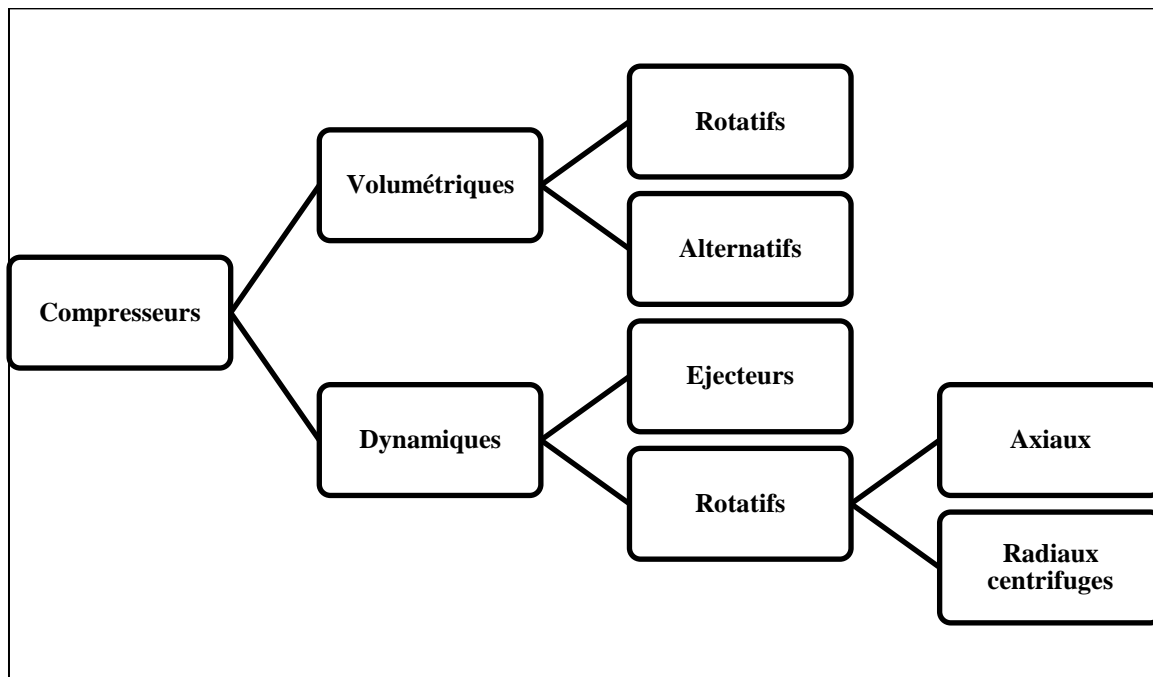


Figure 3-1 - Classification des différents types de compresseurs [9]

3.3 Généralités sur les compresseurs centrifuges :

3.3.1 Description générale d'un compresseur centrifuge :

Un compresseur centrifuge est une machine dynamique, à travers laquelle passe un flux continu de fluide qui reçoit de l'énergie des roues à arbre intégré. Cette énergie est transformée en pression (en partie à travers les roues et en partie dans la section du stator, c'est-à-dire dans les diffuseurs).

Ce type de machine est composé d'un carter extérieur (A) contenant une partie statorique, appelée faisceau de membranes (B), et d'un rotor formé d'un arbre (C), d'une ou plusieurs roues (D), d'un tambour d'équilibrage (E) et d'un collet de butée (F).

Le rotor quant à lui, est entraîné au moyen d'un moyeu (G) et est maintenu en position axiale par un palier de butée (I), tout en tournant sur des paliers lisses (H). Le rotor est équipé de joints à labyrinthe (L) et, si nécessaire, de joints d'extrémité à film d'huile (M).

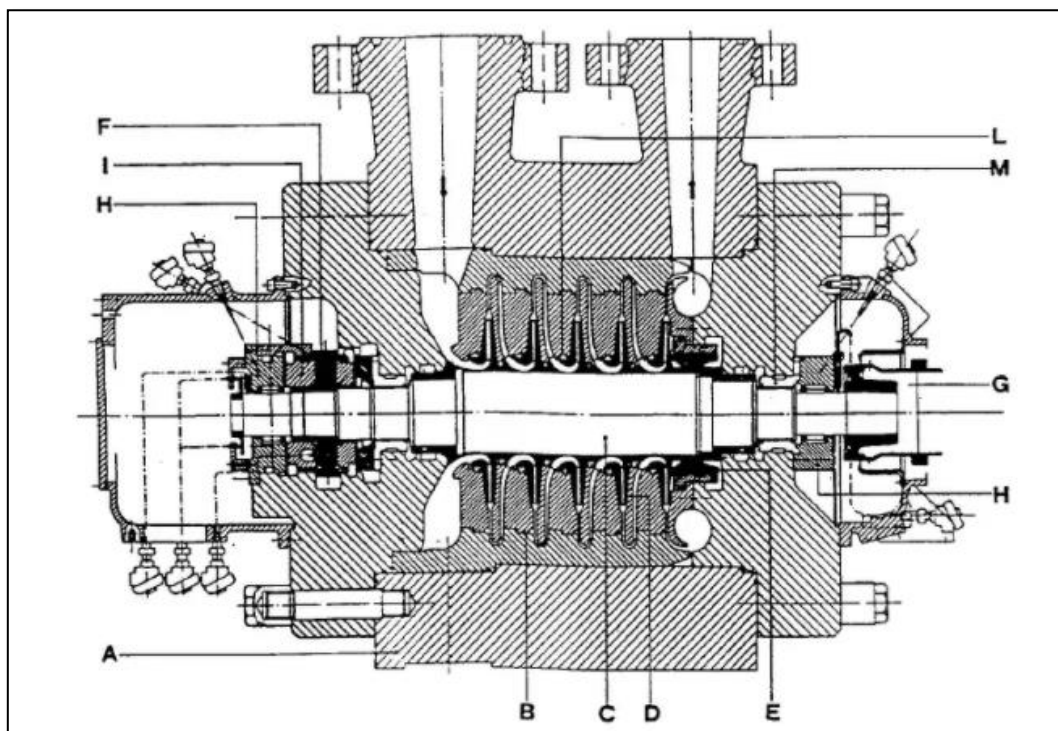


Figure 3-2 - Vue en coupe du schéma d'un compresseur centrifuge [10]

3.3.2 Types de compresseurs centrifuges :

Les compresseurs centrifuges ont des formes différentes en fonction du service pour lequel ils doivent être utilisés, et en fonction de la pression nominale.

Pour les classer, on peut adopter les subdivisions suivantes :

- **Compresseurs avec corps ouverts horizontalement :**

Les corps ouverts horizontalement, constituent évidemment des corps unis sur le plan du joint horizontal. Ils sont utilisés pour des pressions de fonctionnement restant au-dessous de 60 bars. Les volutes d'aspiration, de refoulement et celles intermédiaires, ainsi que, les tuyauteries de l'huile de graissage et tous les autres raccordements du compresseur avec le reste de l'installation, se font normalement moyennant le demi corps inférieur.

Grâce à ce système, il suffit d'enlever les boulons de liaisons le long du plan de joint horizontal pour pouvoir soulever le demi corps supérieur et accéder facilement à tous les organes internes du compresseur tels que le rotor, les diaphragmes et les joints à labyrinthe. Les compresseurs avec corps ouverts horizontalement sont indiqués par le sigle MCL et peuvent être subdivisés à leur tour suivant le nombre d'étages compresseurs.

- **Compresseur avec corps ouverts verticalement :**

Les corps ouverts verticalement sont constitués d'un cylindre fermé aux extrémités par deux flasques c'est pour cette raison que ce type de compresseur est dénommé baril.

Ces compresseurs, généralement multi étagés, peuvent fonctionner à des pressions élevées. Le rotor et les diaphragmes situés à l'intérieur du corps ne diffèrent pas fondamentalement de ceux des compresseurs MCL.

- **Compresseurs type SR :**

Il s'agit de compresseurs pour des services à des pressions relativement basses, leur caractéristique est d'avoir plusieurs arbres et à roues relatives, montées en porte-à-faux. Les roues sont ouvertes, c'est-à-dire sans contre disque, pour permettre des vitesses périphériques élevées de compression pour chaque étage.

L'aspiration de chaque roue est axiale tandis que le refoulement est radial. Ces compresseurs sont généralement utilisés pour comprimer de l'air, de la vapeur et pour des applications géothermiques.

- **Compresseurs avec boîtiers cloche :**

Les compresseurs à barillet pour haute pression ont des boîtiers en forme de cloche et sont fermés avec des anneaux de cisaillement au lieu de boulons.

- **Compresseurs de pipeline :**

Ceux-ci ont des boîtiers en forme de cloche avec un seul couvercle d'extrémité vertical. Ils sont généralement utilisés pour le transport de gaz naturel. Ils ont normalement

des buses d'aspiration et de refoulement latérales placées l'une en face de l'autre pour faciliter l'installation sur les gazoducs.

3.3.3 Mode de fonctionnement des compresseurs centrifuges :

Le gaz est aspiré dans le compresseur par une buse d'aspiration et entre dans une chambre annulaire (volute d'entrée), s'écoulant de celle-ci de toutes les directions vers le centre selon un schéma radial uniforme. Sur le côté de la chambre opposé à la buse d'aspiration se trouve une ailette qui empêche les tourbillons de gaz.

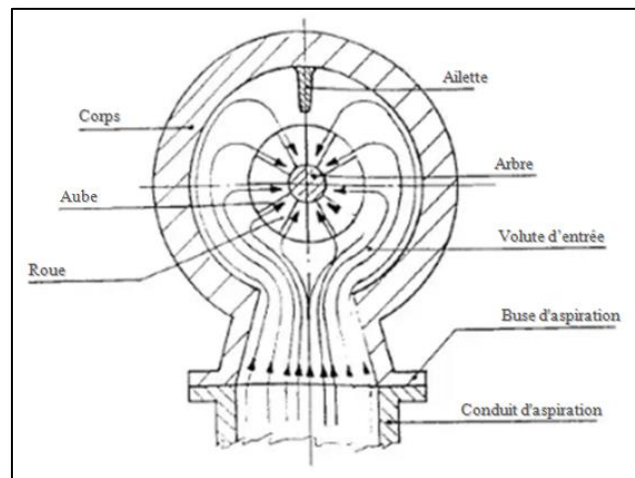


Figure 3-3 - Vue qualitative de l'écoulement dans la volute d'entrée [10]

Le gaz s'écoule dans le diaphragme d'aspiration et est ensuite capté par la première roue.

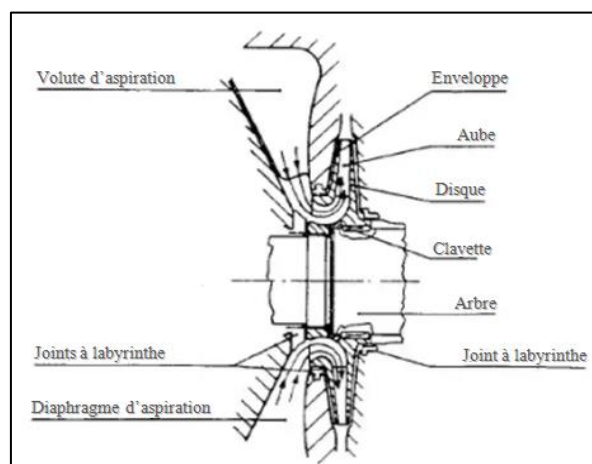


Figure 3-4 - Vue en coupe de l'écoulement dans le diaphragme d'aspiration [10]

Les roues sont constituées de deux disques, appelés disque et enveloppe, reliés par des aubes qui sont serrées sur l'arbre et maintenues par une ou deux clavettes. La roue pousse le gaz vers l'extérieur en augmentant sa vitesse et sa pression ; la vitesse de sortie aura une composante radiale et une composante tangentielle. Du côté du disque, la roue est exposée à la pression de refoulement et de l'autre côté, en partie à la même pression et en partie à la pression d'aspiration. Ainsi, une force de poussée est créée vers l'aspiration.

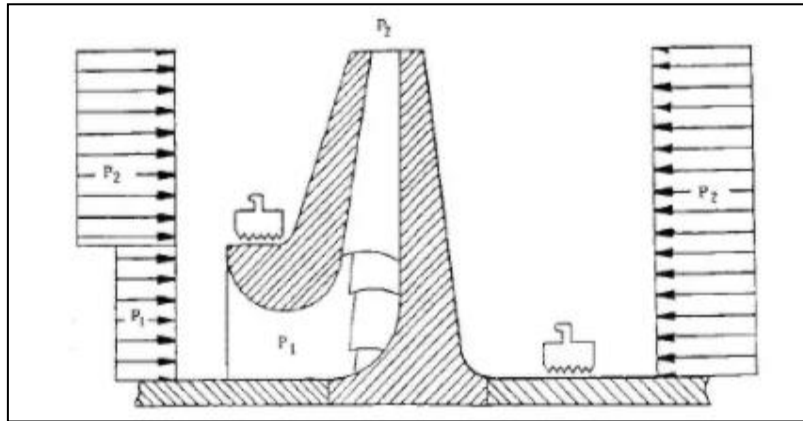


Figure 3-5 - Répartition de la pression sur la roue [10]

Le gaz passe ensuite dans une chambre circulaire (diffuseur), en suivant un trajet en spirale où il perd en vitesse et augmente en pression (comme le fait le fluide dans les conduits).

Le gaz s'écoule ensuite le long du canal de retour ; il s'agit d'une chambre circulaire délimitée par deux anneaux qui forment le diaphragme intermédiaire, qui à son tour est muni d'aubes pour diriger le gaz vers l'entrée de la roue suivante. Les aubes sont disposées de manière à redresser le flux de gaz en spirale afin d'obtenir une sortie radiale et l'entrée axiale de la roue suivante. Le trajet du gaz est le même pour chaque roue.

Des joints à labyrinthe sont installés sur les diaphragmes pour minimiser les fuites de gaz internes. Ces joints sont formés par des bagues faites en deux ou plusieurs parties. La dernière roue d'un étage (le terme "étage" désigne la zone de compression entre deux buses consécutives) envoie le gaz dans un diffuseur qui conduit à une chambre annulaire appelée volute de refoulement.

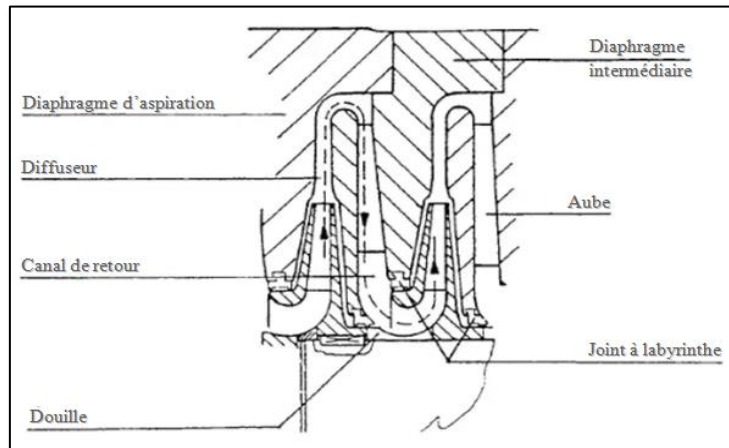


Figure 3-6 - Vue en coupe de l'écoulement à travers le diaphragme intermédiaire [10]

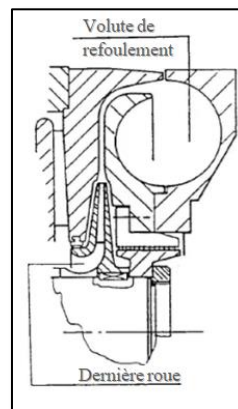


Figure 3-7 - Vue en coupe de l'écoulement à travers la dernière roue d'un étage [10]

La volute de refoulement est une chambre circulaire qui recueille le gaz de la limite extérieure du diffuseur et la transmet à la buse de décharge. Près de cette dernière, il y a une autre ailette qui empêche le gaz de continuer à circuler autour de la volute.

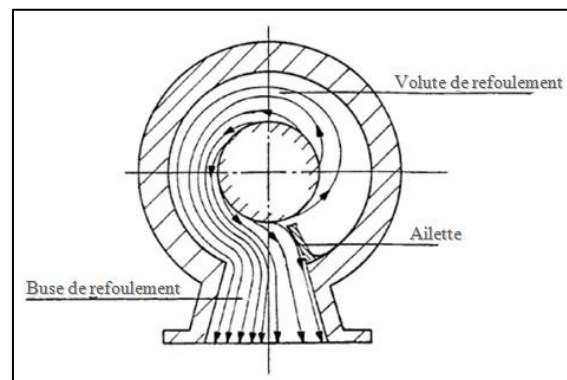


Figure 3-8 - Vue qualitative de l'écoulement dans la volute de refoulement [10]

3.3.4 Caractérisation du compresseur centrifuge X04J :

Tableau 3-1 - Caractéristiques du compresseur X04J [11]

Fabricant	Dresser Rand
Modèle	3M8-6
Gamme de vitesse	5 153 à 8 324 tr/min
Première vitesse critique	3 350 tr/min
Poids	15 872 kg
Poids du rotor	685 kg
Pression d'admission	0.2 bar eff (± 0.1 bar)
Pression de refoulement	2.6 bar eff (± 0.4 bar)
Température d'admission	-34 °C ($\pm 10^{\circ}\text{C}$)
Température de refoulement	69 °C ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)
Débit	30 000 kg/h ($\pm 10\,000$ kg/h)
Nombre de roues	6
Diamètre de la plus grande roue	685 mm
Consommation	2 362 KW

3.4 Processus de réparation du rotor utilisé par TMComas :

La réparation et la restauration du rotor (arbre et différents composants) doit se faire en conformité avec les plans dimensionnels et documents spécifiques au rotor objet de la réparation.

Lors de la réparation avec revêtement de surface, les nouveaux matériaux utilisés doivent être similaires aux matériaux d'origine. Aussi pour la confection de nouveaux composants (bagues, chemises, ...etc.), les matériaux doivent être similaires aux anciens ou bien avec des propriétés de résistance meilleures.

3.4.1 Réparation de l'arbre :

Une considération importante doit être portée au choix de la méthode de réparation des tourillons d'arbre car des dommages du revêtement ou de la métallisation peuvent se produire par les rouleaux de l'équilibreuse lors de l'équilibrage du rotor.

Le redressement de la flèche de l'arbre n'est recommandé qu'après la confirmation de la stabilité thermique de ce dernier.

Le processus de réparation de quelconque surface de l'arbre doit adéquatement garantir la transmission du couple nécessaire et résister aux contraintes applicables.

L'arbre peut être restauré en utilisant les processus suivants recommandés par la norme API 687 :

- Le soudage à l'arc sous protection de gaz inerte avec électrode infusible de tungstène (TIG).
- Le soudage à l'arc submergé (SAW).
- Le procédé HVOF (High Velocity Oxygen Fuel).
- Le procédé HVLF (High Velocity Liquid Fuel).
- Le procédé de combustion intermittente.
- Le procédé de revêtement par laser Cladding.

La finition de la surface de l'arbre réparé est recommandée selon le tableau suivant :

Tableau 3-2 - Valeurs recommandées de la rugosité absolue des surfaces finies de l'arbre [12]

Surface réparée et finie	Rugosité absolue
Pistes des sondes	0.4 µm
tourillons d'arbre du palier et collier de butée	0.4 µm
Zone d'étanchéité	0.4 µm
Autres zones	0.8 µm
Surface de montage du moyeu d'accouplement	0.4 µm à 0.8 µm selon le mode de montage (hydraulique ou juste).

3.4.2 Equilibrage du rotor :

Une fois les inspections et réparations du rotor achevées, le rotor doit être équilibré selon les standards API ou ISO avec transmission de rapport détaillé.

Un nettoyage minutieux du rotor avec tous les composants est indispensable afin d'enlever toute impureté, rouille, graisse ou matières étrangères.

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.

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.

La machine d'équilibrage doit être capable de donner les informations suivantes :

- Séparation du plan.

- Equilibrage dynamique.
- Equilibrage statique / couple.
- **Equilibrage des composants du rotor à vitesse réduite :**

En équilibrage à vitesse réduite, les composants majeurs de l'ensemble tournant (arbre, piston d'équilibrage, roue, ...etc.) doivent être séparément équilibrés avant l'assemblage du rotor.

Pour l'équilibrage de l'arbre, il est indispensable de combler les sièges de clavettes par des demi-clavettes couronnées de mêmes dimensions avec enregistrement de la lecture initiale de l'équilibreuse avant la correction.

Les moyeux d'accouplement, les colliers de butées, les écrous de blocage, etc. devraient être équilibrés par une équilibreuse verticale.

Comme pour l'ensemble tournant, les critères et tolérances d'équilibrage sont les mêmes pour les composants. Aucune correction de l'équilibrage n'est tolérée sur les surfaces critiques.

Le maximum résiduel permissible du déséquilibre par plan doit être défini par les standards applicables à chaque équipement ou par l'expression suivante :

$$U_{max} = 6350 \frac{W}{N} \quad [g.mm]$$

Avec :

- U_{max} : résiduel du déséquilibre [g.mm].
- W : masse statique du composant et du mandrin [kg].
- N : vitesse maximale continue [tr/min].

- **Equilibrage du rotor assemblé à vitesse réduite :**

Après l'assemblage du rotor, un équilibrage séquentiel à vitesse réduite est indispensable sauf si le standard du prestataire préconise une méthode d'équilibrage à grande vitesse après un accord mutuel entre le client et le prestataire. Dans tous les cas, un équilibrage à vitesse réduite des composants majeurs de l'ensemble tournant est impératif.

Le maximum résiduel permissible du déséquilibre par plan mesuré au tourillon est défini par l'expression précédente.

- **Équilibrage du rotor à grande vitesse :**

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.

Généralement les rotors des turbines et compresseurs ne nécessitent pas d'équilibrage à grande vitesse sauf avis contraire du standard applicable ou de l'engineering du prestataire justifié par des critères valables, à savoir :

- Rotors dont les vibrations montent d'une manière alarmante lors du passage par la vitesse critique.
- Rotors à grande sensibilité au balourd.
- Rotors dont les conditions de service sont très critiques ou inaccessibles.
- Rotors flexibles et longs.
- Rotors déjà équilibrés à grande vitesse sans être désassemblés.

Note :

L'équilibrage à grande vitesse nécessite des paliers lisses aux lieux des rouleaux antifriction utilisés dans l'équilibrage à vitesse réduite.

3.4.3 Qualité d'équilibrage G :

Le déséquilibre résiduel admissible peut être lu sur le diagramme suivant :

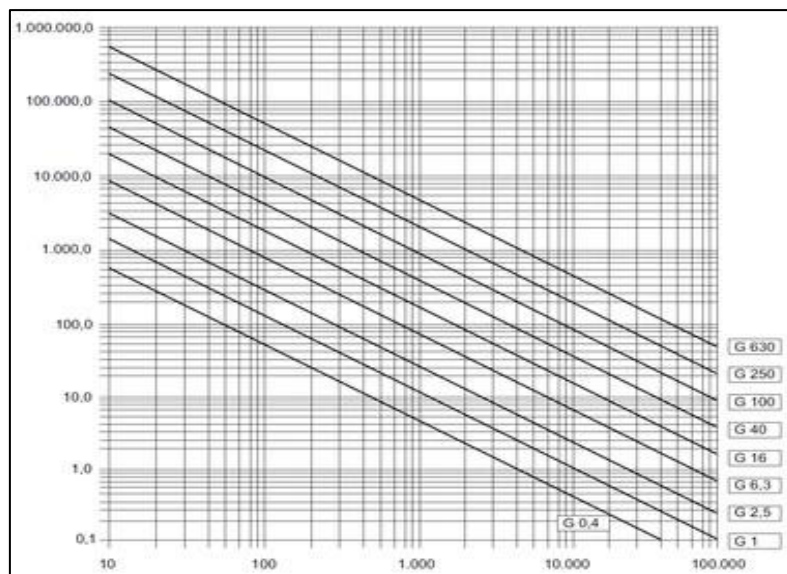


Figure 3-9 - Diagramme du déséquilibre résiduel admissible en fonction de la vitesse de rotation et du poids du rotor

Axe x : Nombre de tours (vitesse d'utilisation).

Axe y : Déséquilibre admissible par rapport au poids du rotor.

Dans la norme DIN ISO 1940-1 (anciennement VDI-directive 2060) sont définies les bases de la mesure du déséquilibre et de l'équilibrage. La précision d'un équilibrage est déterminée par la classe de qualité d'équilibrage G.

La qualité d'équilibrage ne compte toujours que pour une vitesse d'utilisation donnée du rotor. Le déséquilibre résiduel admissible est calculé par le nombre de tours d'utilisation (régime), le poids du rotor et la qualité d'équilibrage par la formule suivante :

$$U_{adm} = 4774.65 \frac{G \cdot M}{n} \quad [g \cdot mm]$$

Avec :

- U_{adm} : déséquilibre admissible du rotor.
- G : qualité d'équilibrage.
- M : masse du rotor en kg.
- n : nombre de tours d'utilisation.

3.5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons fait l'étude des compresseurs centrifuges, en évoquant les différents types qui existent, une partie du chapitre a été dédiée au mode de fonctionnement de ces derniers en expliquant le parcours des gaz dans chaque composant du compresseur. Enfin, nous avons mis la lumière sur le processus de réparation utilisé par l'entreprise TM Comas afin de procéder à l'équilibrage du rotor. Nous avons conclu qu'une maîtrise des techniques de réparation et des différentes normes qui régissent la fiabilité du matériel est indispensable afin d'assurer une bonne réparation et d'optimiser la durée de vie.

Chapitre 4 : Simulation du comportement du rotor du compresseur X04J sous essais mécaniques

4.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons continuer l'étude faite par M. SLAMANI Zoheir pour son mémoire de fin d'études soutenu en 2019. Vu l'impossibilité de travailler sur les vrais échantillons préparés avec une composition chimique semblable au rotor du compresseur centrifuge X04J, nous allons en premier lieu utiliser le logiciel Solidworks afin de créer des éprouvettes sur lesquelles la simulation de d'un nombre de tests sera faite via le logiciel Ansys – Workbench.

4.2 Rappel du processus de revêtement par Laser Cladding [11] :

Le revêtement au laser est un procédé de surfaçage 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. 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.

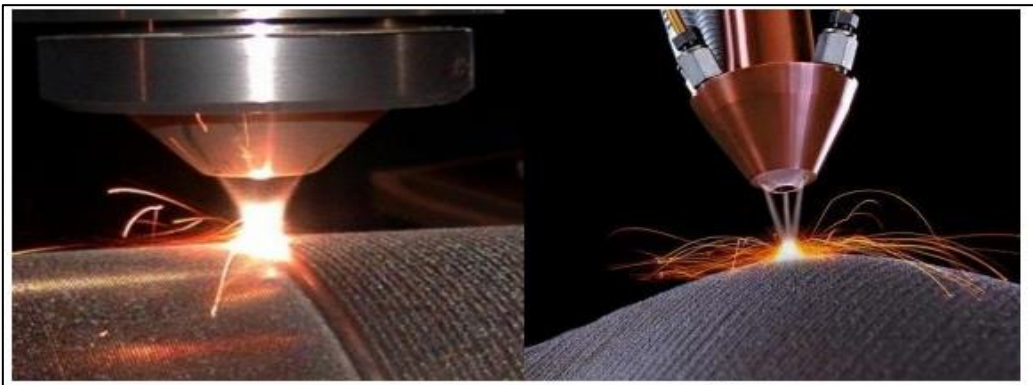


Figure 4-1 - Revêtement par laser Cladding

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.

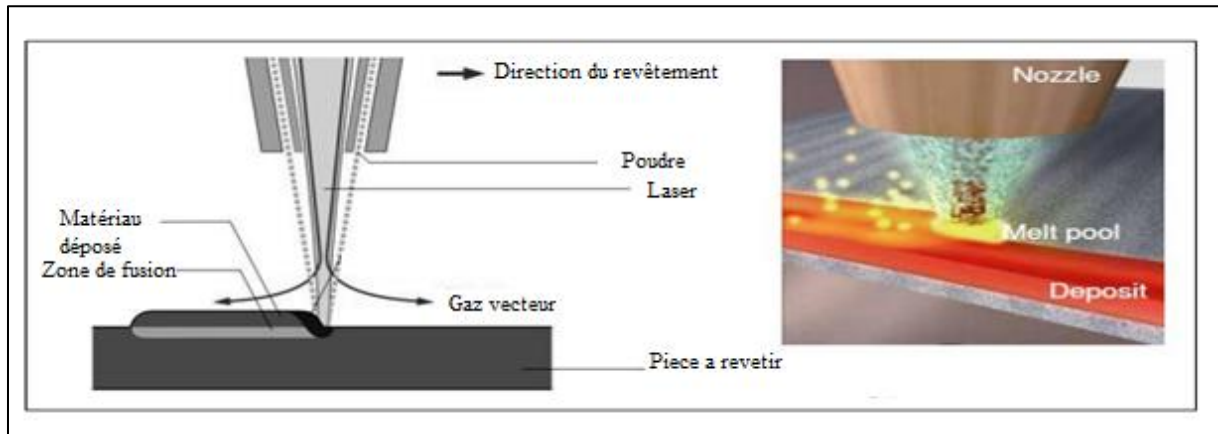


Figure 4-2 - Représentation du revêtement par Laser Cladding

Champs d'application :

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

Avantages :

- Meilleure technique pour le revêtement de toute forme.
- 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.
- 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.

4.3 Rappel des résultats de l'analyse chimique du rotor et de la poudre de revêtement :

Une analyse chimique par spectrométrie à émission optique a été effectuée sur l'arbre du rotor et a donné les résultats suivants :

	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 4-3 - Résultats de l'analyse chimique de l'arbre du rotor [11]

Une telle composition chimique prouve que le rotor du compresseur X04J est composé à partir d'un matériau acier de type CK45 selon la norme allemande DIN qui est équivalent à un type C45E selon la norme européenne EN 10083.1 et à un acier 1045 selon la norme américaine AISI/SAE.

Les propriétés mécaniques de l'acier CK45 sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 4-1 - Propriétés mécaniques de l'acier CK45

Matériau	Module de Young (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de poisson	Limite d'élasticité en traction (MPa)	Limite à la rupture en traction (MPa)
Acier CK45	206 000	79 845	0.29	310	590

L'analyse chimique de la poudre utilisée pour le revêtement par laser Cladding donne :

Tableau 4-2 - Analyse chimique de la poudre du revêtement [11]

	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

Cette poudre de revêtement est fondue et projetée sur le substrat, produisant une liaison par fusion entre les deux avec un minimum de mélange, afin de donner un dépôt de densité élevée et aux propriétés mécaniques supérieures à celles du substrat.

Tableau 4-3 - Propriétés mécaniques du matériau de revêtement

Matériau	Module de Young (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de poisson	Limite d'élasticité en traction (MPa)	Limite à la rupture en traction (MPa)
Dépôt par laser cladding	700 000	289 260	0.21	700	980

4.4 Simulation des essais mécaniques :

4.4.1 But de la simulation :

Le but de ce chapitre étant d'étudier la différence entre le comportement de l'arbre du compresseur avant intervention de l'entreprise TM Comas et son comportement après le rechargement de surface effectué avec laser Cladding. Pour la simulation nous avons décidé d'analyser le comportement du rotor face à un premier essai de torsion et un second de flexion.

La contrainte de torsion est la sollicitation principale à laquelle est soumis un arbre. Ce type de sollicitation implique que les contraintes maximales sont à la surface de la pièce. La qualité de cette surface est donc un paramètre essentiel pour la résistance d'un arbre. Ce dernier peut être également soumis à des contraintes de flexion et de charge axiale. Dans ces cas, les efforts mécaniques au sein de la matière sont souvent variables, à la manière d'une sinusoïde. Cela implique alors une résistance nécessaire à la fatigue.

Pour ce faire, une première éprouvette de même composition chimique que le rotor en question sera conçue en utilisant les résultats de l'analyse chimique faite précédemment par M. SLAMANI.

Une seconde éprouvette faite d'un assemblage entre un substrat en acier CK45 et un revêtement par laser cladding dont les propriétés mécaniques sont supérieures, a été conçue et représentera notre arbre après rechargement de surface.

4.4.2 Choix des dimensions et conception des éprouvettes :

- Eprouvette utilisée lors de la torsion :

Le type d'éprouvette à été choisi selon la norme ISO 3167 :

Tableau 4-4 - Dimensions de l'éprouvette pour l'essai de torsion selon les normes ISO

Norme	Type	L ₀ (mm)	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	b (mm)	d (mm)	Forme
ISO 3167	A	80 ± 2	90 ± 4	>150 (170)	20 ± 0,2	>4 (10)	Haltère

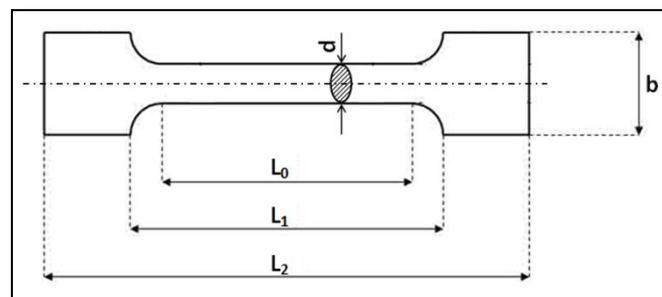


Figure 4-4 - Schéma de la première éprouvette

La conception de l'éprouvette a été faite à l'aide du logiciel Solidworks, qui sera par la suite exportée à Workbench.

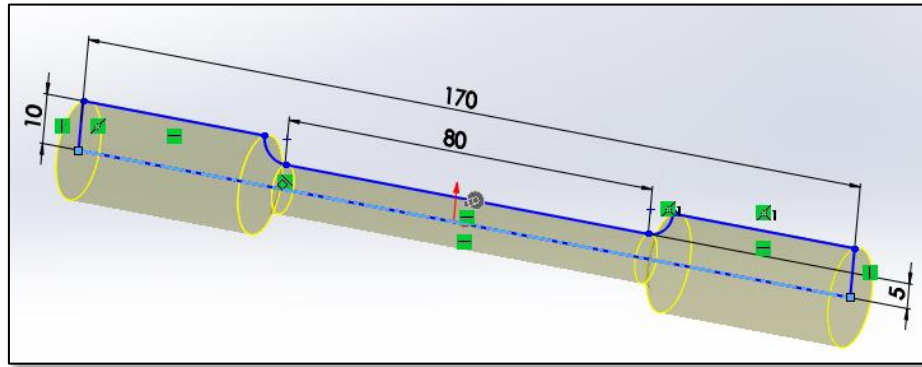


Figure 4-5 - Conception de l'éprouvette de torsion

Afin de modéliser le rotor après revêtement par laser cladding, une éprouvette cylindrique creuse d'une épaisseur égale à $300\ \mu\text{m}$ représentant la couche de revêtement a été assemblée par blocage avec l'éprouvette décrite ci-dessus.

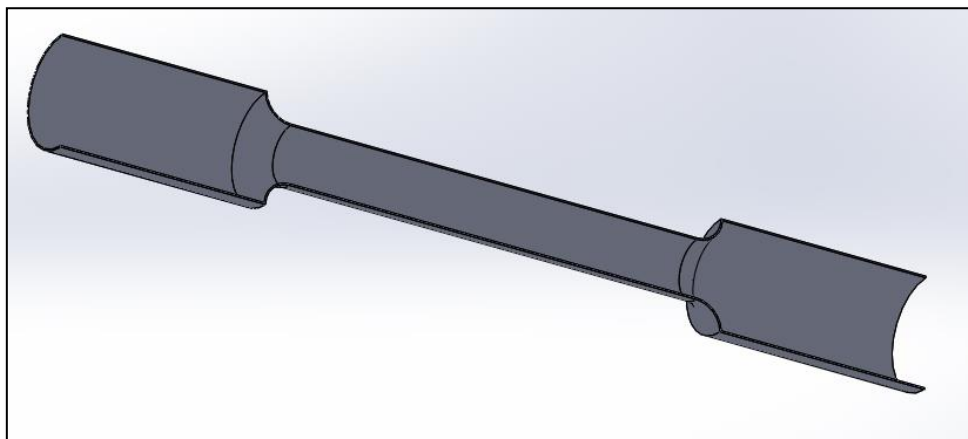


Figure 4-6 - Vue en coupe du revêtement de la première éprouvette

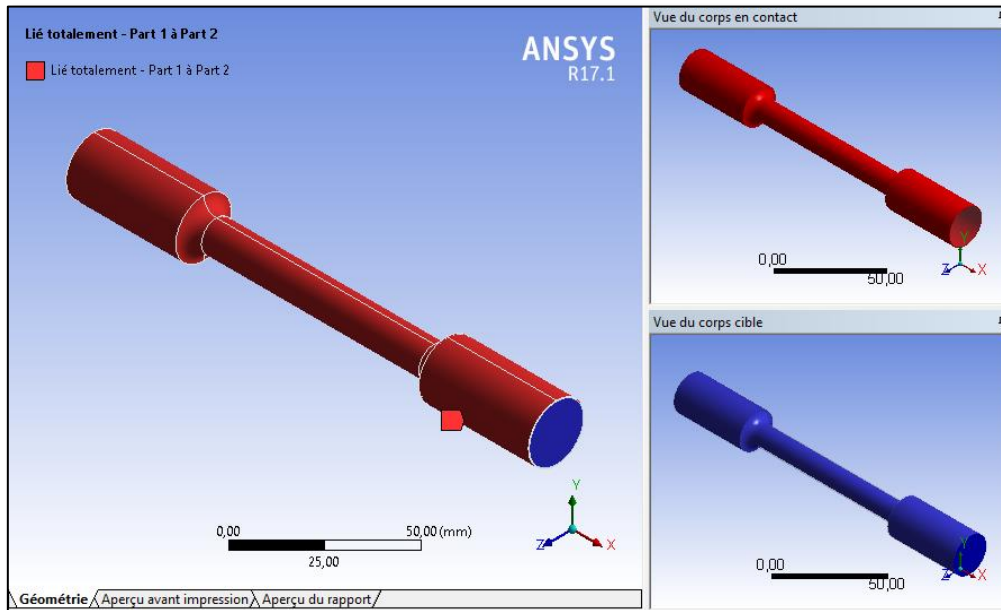


Figure 4-7 - Assemblage de l'éprouvette de torsion avec le revêtement par laser cladding

- **Eprouvette utilisée lors de la flexion :**

Le type d'éprouvette à été choisi selon la norme ISO 178 :

Tableau 4-5 - Dimensions de l'éprouvette pour l'essai de flexion selon les normes ISO

Norme	l (mm)	b (mm)	h (mm)
ISO 178	≥ 80	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$



Figure 4-8 - Schéma de la seconde éprouvette

La conception de la deuxième éprouvette a été réalisée de la même manière citée précédemment.

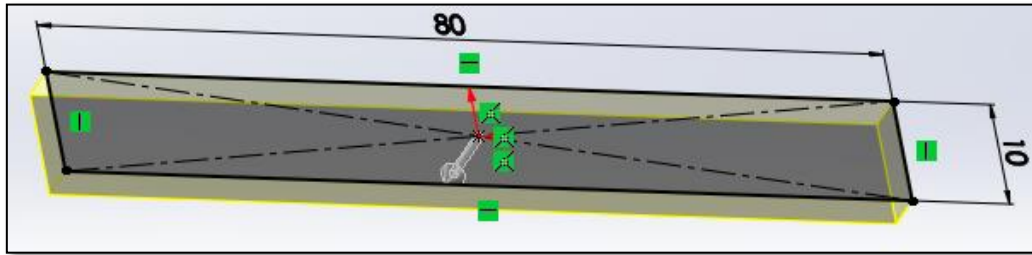


Figure 4-9 - Conception de la seconde éprouvette

Afin de modéliser le rotor après revêtement par laser cladding, une éprouvette plate, d'une épaisseur égale à $300\ \mu\text{m}$ représentant la couche de revêtement a été assemblée par blocage avec l'éprouvette décrite ci-dessus.

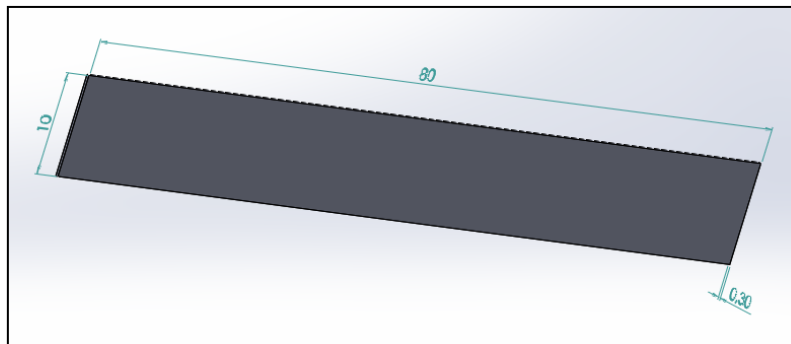


Figure 4-10 - Conception du revêtement de la seconde éprouvette

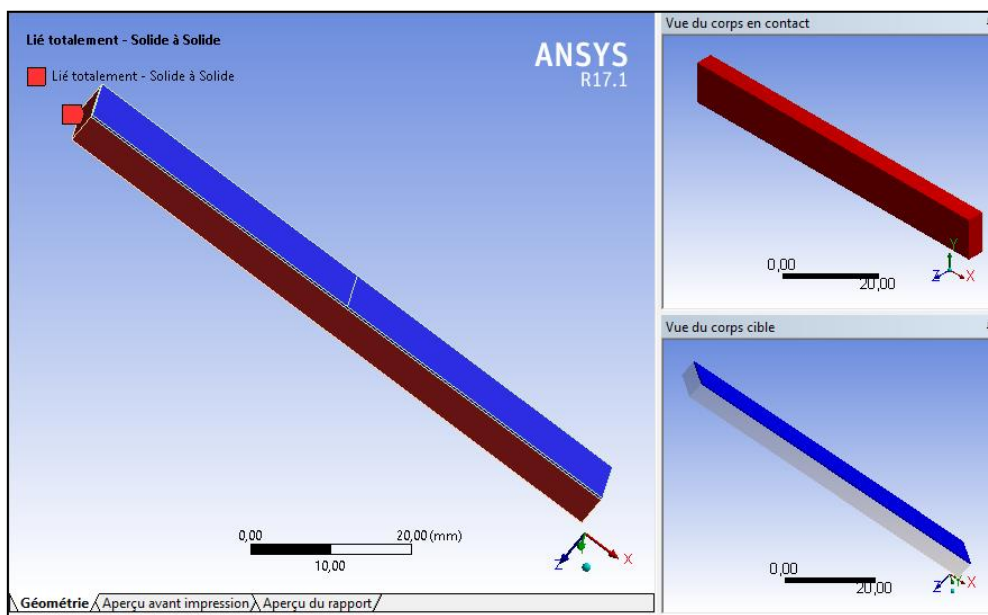


Figure 4-11 - Assemblage de l'éprouvette de flexion avec le revêtement par laser cladding

4.4.3 Essai de torsion :

L'essai de torsion consiste à solliciter une éprouvette à deux couples de moments opposés agissant dans des plans parallèles à son axe.

- **Introduction du type de matériau et des propriétés mécaniques des éprouvettes :**

	A	B	C
1	Propriété	Valeur	Unité
2	<input checked="" type="checkbox"/> Masse volumique	7,85E-06	kg mm ⁻³
3	<input checked="" type="checkbox"/> Coefficient isotrope sécant de dilatation thermique		
6	<input checked="" type="checkbox"/> Elasticité isotrope		
7	Dériver de	Module de Young et c...	
8	Module de Young	2,06E+05	MPa
9	Coefficient de Poisson	0,29	
10	Module de compressibilité	1,6349E+05	MPa
11	Module de cisaillement	79845	MPa
12	<input checked="" type="checkbox"/> Contrainte alternée - Contrainte moyenne	<input checked="" type="checkbox"/> Tabulaire	
16	<input checked="" type="checkbox"/> Paramètres de durée de vie		
24	<input checked="" type="checkbox"/> Limite d'élasticité en traction	310	MPa
25	<input checked="" type="checkbox"/> Limite d'élasticité en compression	310	MPa
26	<input checked="" type="checkbox"/> Limite à la rupture en traction	590	MPa
27	<input checked="" type="checkbox"/> Limite à la rupture en compression	0	MPa

Figure 4-12 - Propriétés mécaniques de l'acier CK45

	A	B	C
1	Propriété	Valeur	Unité
2	<input checked="" type="checkbox"/> Masse volumique	7,85E-06	kg mm ⁻³
3	<input checked="" type="checkbox"/> Coefficient isotrope sécant de dilatation thermique		
6	<input checked="" type="checkbox"/> Elasticité isotrope		
7	Dériver de	Module de Young et c...	
8	Module de Young	7E+05	MPa
9	Coefficient de Poisson	0,21	
10	Module de compressibilité	4,023E+05	MPa
11	Module de cisaillement	2,8926E+05	MPa
12	<input checked="" type="checkbox"/> Contrainte alternée - Contrainte moyenne	<input checked="" type="checkbox"/> Tabulaire	
16	<input checked="" type="checkbox"/> Paramètres de durée de vie		
24	<input checked="" type="checkbox"/> Limite d'élasticité en traction	700	MPa
25	<input checked="" type="checkbox"/> Limite d'élasticité en compression	700	MPa
26	<input checked="" type="checkbox"/> Limite à la rupture en traction	980	MPa
27	<input checked="" type="checkbox"/> Limite à la rupture en compression	0	MPa

Figure 4-13 - Propriétés mécaniques de la couche de revêtement

- **Importation de la géométrie réalisée et maillage :**

Un maillage fin adaptatif a été utilisé sur les deux éprouvettes.

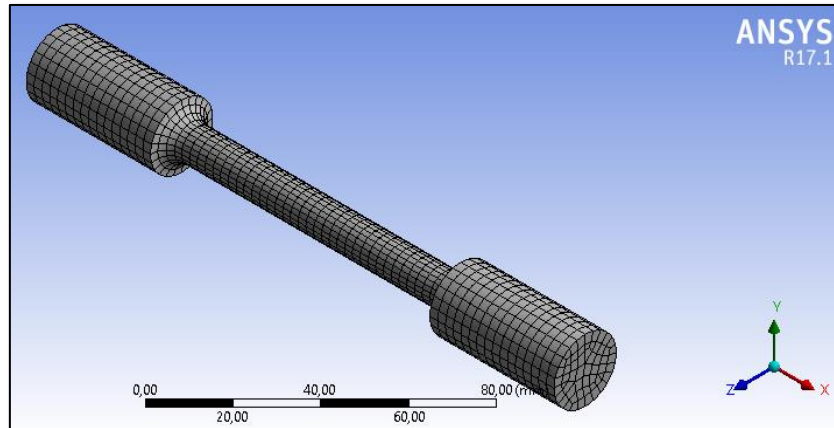


Figure 4-14 - Maillage de l'éprouvette pour essai de torsion

- **Application des sollicitations liées à la torsion :**

Afin de réaliser l'essai de torsion, nous allons fixer l'une des extrémités de l'éprouvette et appliquer un moment agissant sur le plan perpendiculaire à son axe sur l'autre extrémité. Ce qui donnera une sollicitation se réduisant à deux couples M et $-M$ égaux et opposés d'axe.

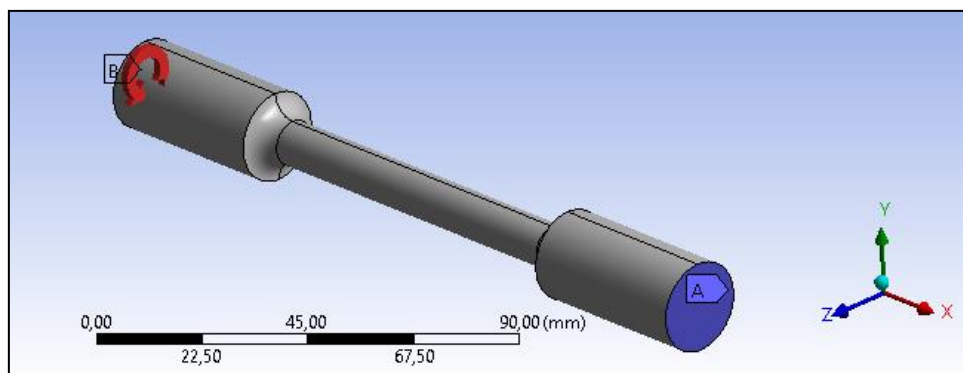


Figure 4-15 - Application des sollicitations liées à la torsion

4.4.4 Essai de flexion :

L'essai de flexion est l'application d'un effort sur une poutre pour mesurer la résistance à la rupture d'un matériau.

Les étapes suivies sont les mêmes que celles de l'essai de traction, en commençant par la spécification des propriétés mécaniques des deux échantillons jusqu'à la génération du maillage.

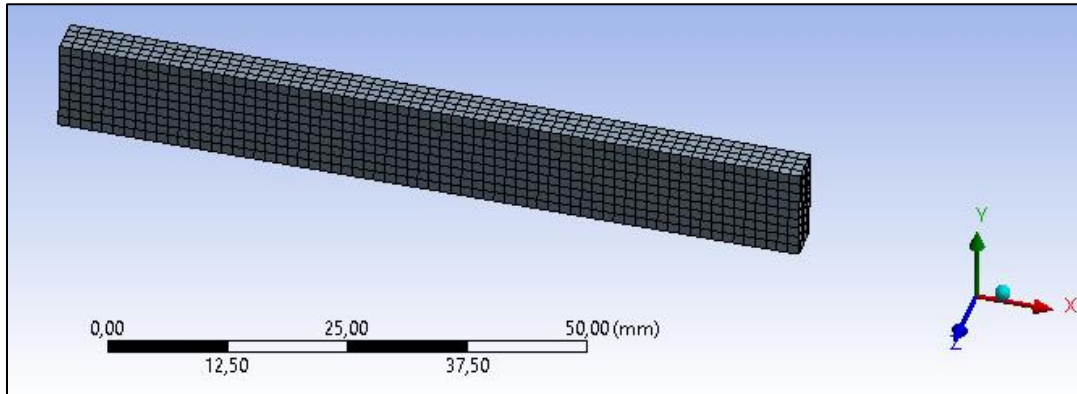


Figure 4-16 - Maillage de l'éprouvette pour essai de flexion

- **Application des sollicitations liées à la flexion :**

La flexion trois points est un essai mécanique classique. Il représente le cas d'une poutre posée sur deux appuis simples et soumise à une charge concentrée, appliquée au milieu de la poutre avec elle aussi un contact simple.

Afin d'empêcher tout mouvement du corps pendant la simulation, les conditions suivantes ont été ajoutées :

- Appui simple appliqué sur l'arête de la première extrémité.
- Appui double appliqué sur l'arête de la deuxième extrémité.
- Force concentrée au milieu de l'éprouvette d'une valeur de 200 N.

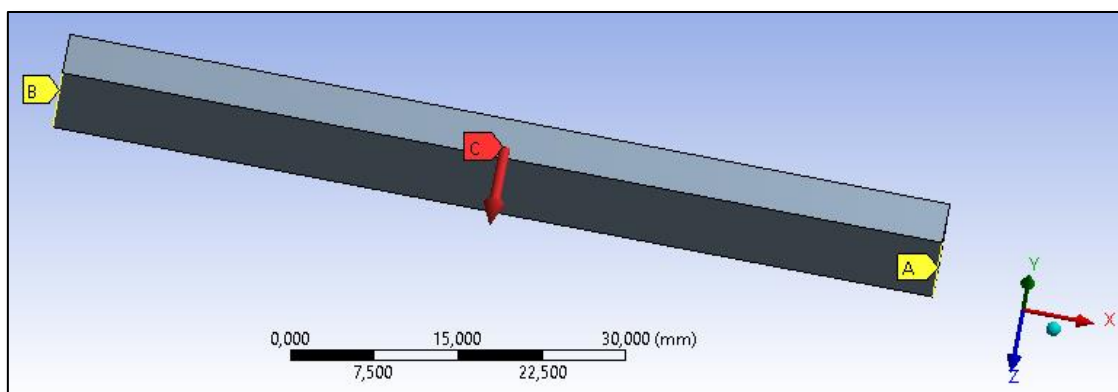


Figure 4-17 - Application des sollicitations liées à la flexion

4.5 Résultats et discussion :

Lors de la simulation, deux échantillons ont été utilisés :

- Echantillon 1 : Eprouvette en acier CK45.
- Echantillon 2 : Eprouvette en acier CK45 assemblée avec une couche de revêtement par laser Cladding.

4.5.1 Résultats de l'essai de torsion :

Les calculs de la contrainte maximale principale ainsi que de la déformation élastique maximale de l'éprouvette ont été fait par le logiciel afin de montrer le résultat des sollicitations de torsion, et d'en déduire le comportement de l'arbre du compresseur avant et après son revêtement par laser Cladding.

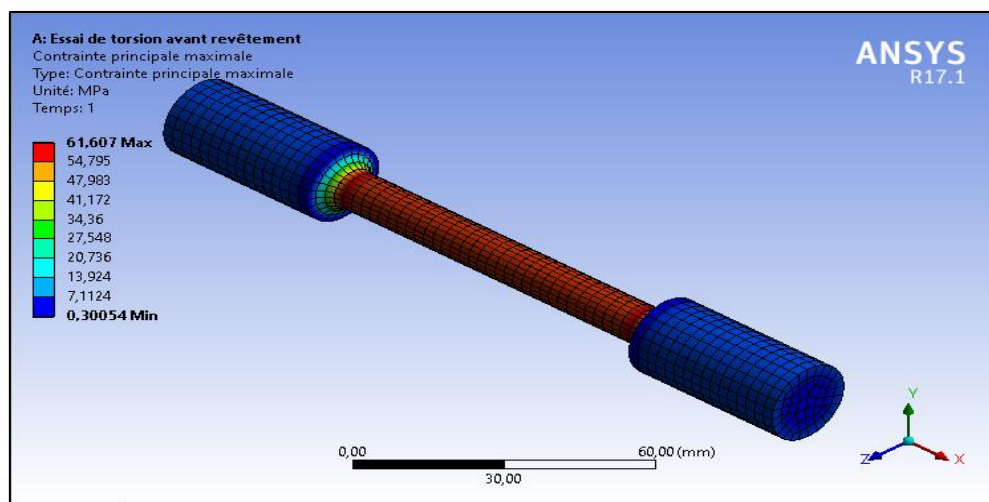


Figure 4-18 - Contrainte principale maximale due à l'essai de torsion sur l'échantillon 1

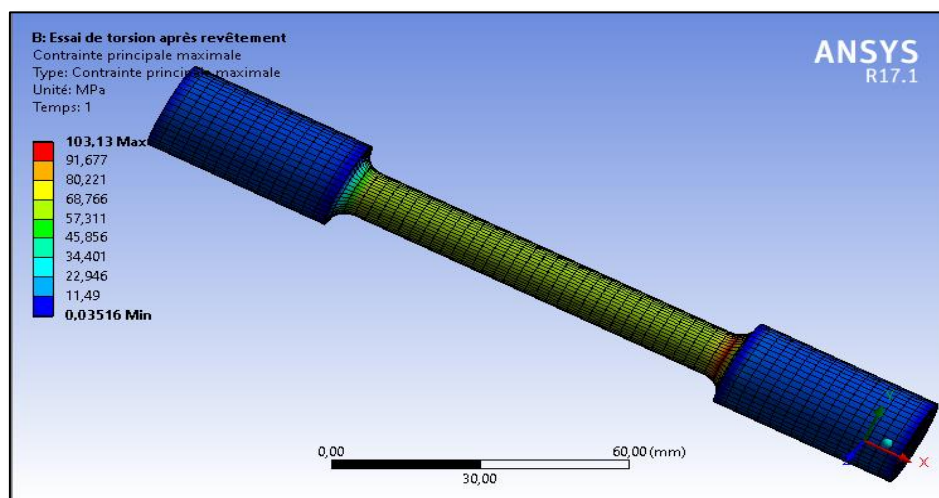


Figure 4-19 - Contrainte principale maximale due à l'essai de torsion sur l'échantillon 2

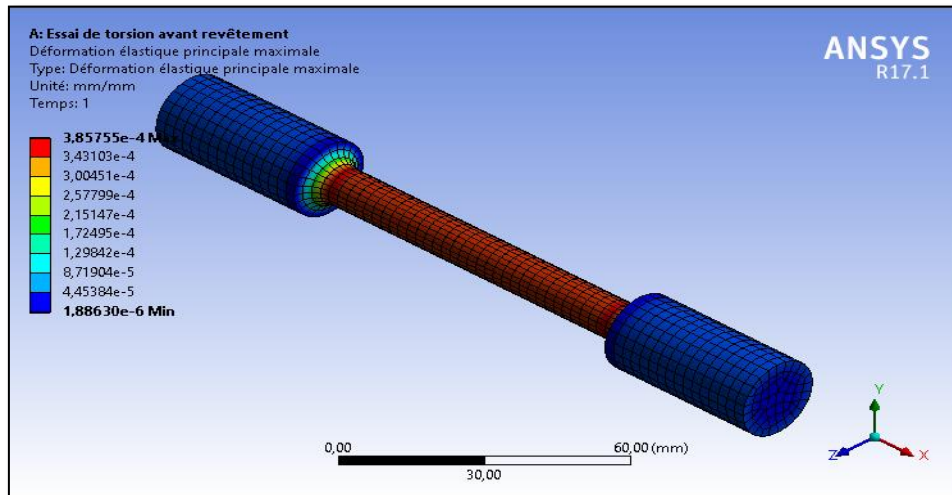


Figure 4-20 - Déformation élastique maximale due à l'essai de torsion sur l'échantillon 1

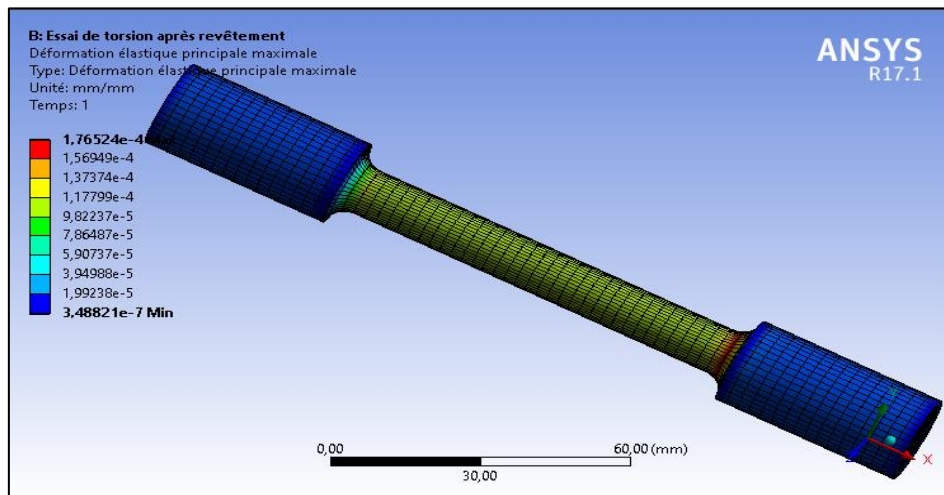


Figure 4-21 - Déformation élastique maximale due à l'essai de torsion sur l'échantillon 2

- **Discussion :**

Nous remarquons d'abord une valeur de contrainte maximale au niveau de la section de l'éprouvette où le moment a été appliqué, cette valeur reste inférieure à la limite élastique, au niveau de la partie centrale de l'éprouvette, sur l'échantillon 1, les valeurs de la contrainte maximale qui ont une moyenne de 56 MPa restent inférieures à celles du second échantillon, où la moyenne est d'environ 60 MPa.

Il en est de même pour la déformation élastique de l'éprouvette face à la sollicitation de torsion. L'échantillon avec rechargement se déforme d'une manière deux fois moins importante comparée à celui d'origine.

4.5.2 Résultats de l'essai de flexion :

Afin d'analyser l'effet d'un revêtement par laser Cladding sur le comportement de l'arbre du compresseur, les contraintes principales maximales et les déplacements des deux échantillons suite à l'essai de flexion ont été comparés.

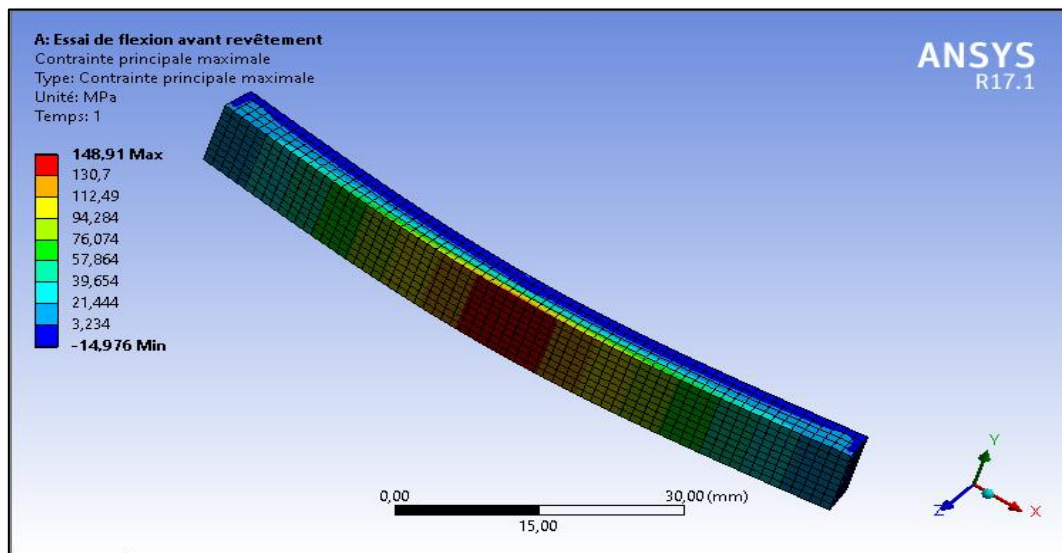


Figure 4-22 - Contrainte principale maximale due à l'essai de flexion sur l'échantillon 1

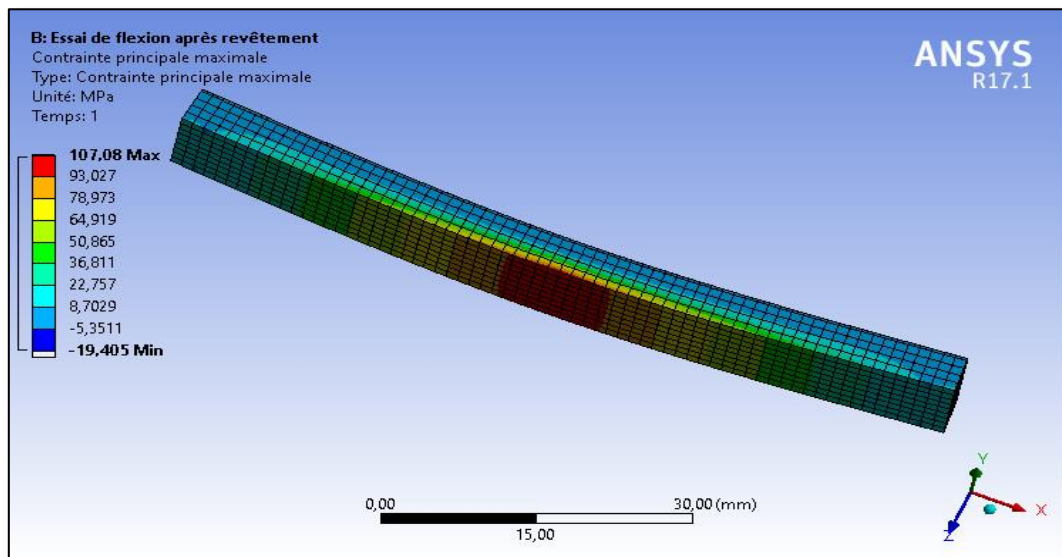


Figure 4-23 - Contrainte principale maximale due à l'essai de flexion sur l'échantillon 2

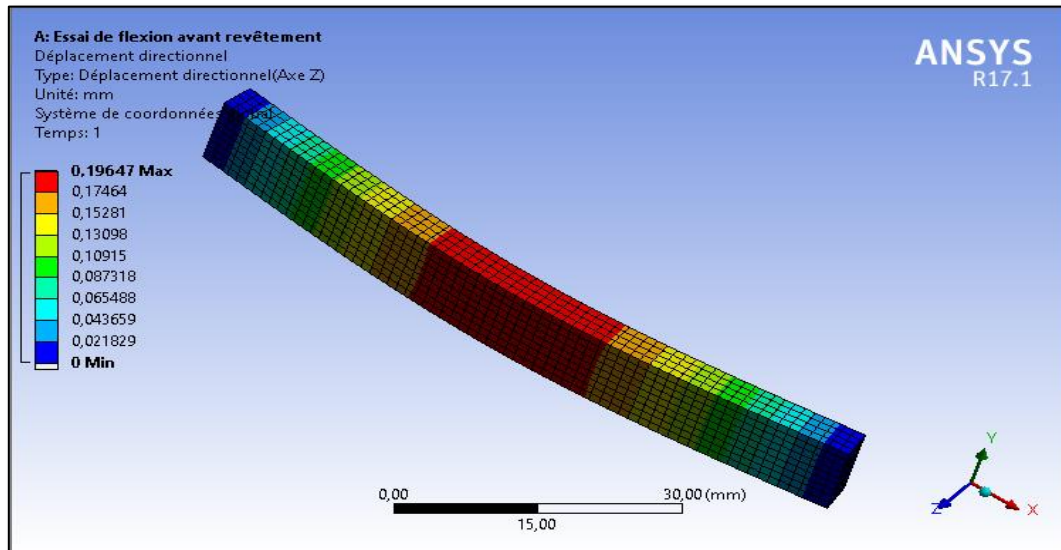


Figure 4-24 - Déplacement directionnel dû à l'essai de flexion sur l'échantillon 1

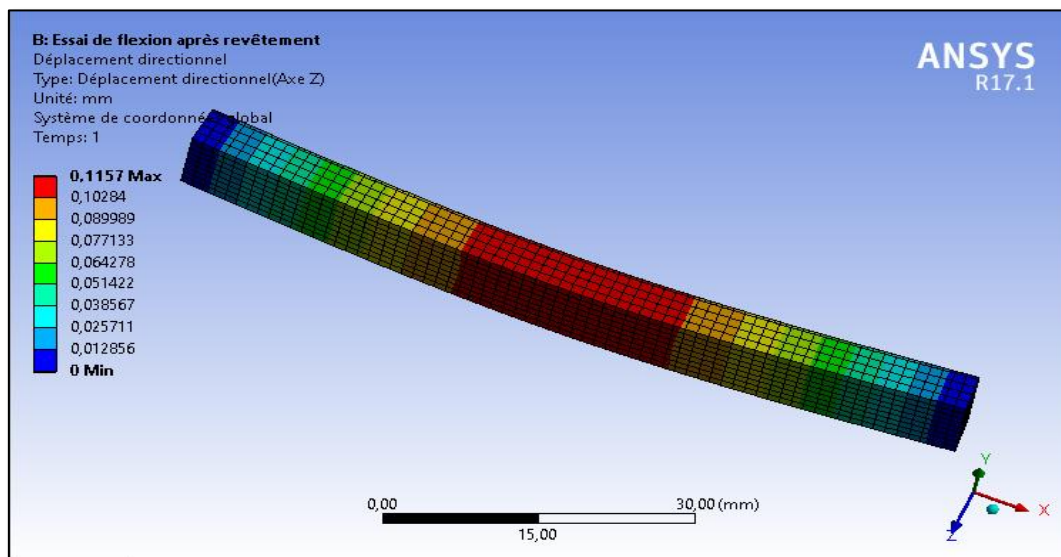


Figure 4-25 - Déplacement directionnel dû à l'essai de flexion sur l'échantillon 2

- **Discussion :**

Une importante différence est remarquée au niveau de la contrainte maximale supérieure. Dans le premier cas, cette contrainte est égale à 148 MPa comparée à l'échantillon 2 où une valeur de 107 MPa est obtenue. Il est à noter que toutes les déformations ont lieu dans le domaine élastique, et en ce qui concerne le déplacement directionnel, nous remarquons qu'il est moins important sur l'échantillon après revêtement que sur le premier où le laser cladding n'a pas été utilisé.

4.6 Conclusion :

Le laser cladding est une technologie de rechargement de soudage de dernière génération qui permet d'avoir une meilleure durée de vie des pièces, un dépôt résistant à la corrosion et un rechargement dur résistant à l'usure et aux chocs.

A travers ces tests nous concluons que la méthode de revêtement par laser cladding donne d'assez bons résultats aux essais mécaniques de traction et de flexion. Le laser a donc démontré sa vraie utilité au niveau du test de torsion avec une déformation maximale de l'éprouvette non-traitée égale à deux fois sa valeur après revêtement, tout autant qu'en test de flexion qui a donné un déplacement moins important après le revêtement de l'éprouvette. Ce qui prouve que cette technique de rechargement est un très bon choix pour l'arbre du compresseur centrifuge et donne un ensemble plus résistant.

Conclusion générale :

Ce modeste travail par lequel je clôture mes cinq années d'études supérieures m'a permis d'approfondir mes connaissances en matière de maintenance de machines tournantes et plus spécifiquement de compresseurs centrifuges.

Durant la période du projet, j'ai pu acquérir un savoir inestimable sur les différentes méthodes de contrôles non-destructifs et les réglementations régissant leurs modes d'examens. Les recherches effectuées m'ont mieux éclairée sur la manière utilisée pour choisir un procédé de contrôle au détriment d'un autre. La décision est alors prise après étude de la composition des matériaux, du mode de fabrication des pièces ainsi que de la nature des défauts à détecter, un compromis doit alors être fait entre ces facteurs dans le but de trouver le CND le plus adéquat.

Pour les méthodes préparation de surface, j'en ai conclu qu'elles sont tout aussi importantes en maintenance, qu'elles soient mécaniques (sablage, nettoyage par cryogénie, tribofinition, soféisation...etc.), thermiques (trempe superficielle) ou thermochimique (cémentation). Elles permettent d'avoir une surface dite propre dont tous les contaminants indésirables ont été éliminés. Une mauvaise préparation de surface est dans la majorité des cas l'origine d'un revêtement de surface défaillant. Une surface propre est une qualité transitoire et le conditionnement doit être suivi dans les plus brefs délais par le revêtement pour avoir une adhérence irréprochable.

A travers le troisième chapitre, j'ai pu explorer la technologie derrière les compresseurs en général et les compresseurs centrifuges en particulier. Le processus de réparation établi par le prestataire TM Comas passe par plusieurs étapes, en commençant par l'inspection du compresseur pièce par pièce afin de déceler les anomalies ayant causé la défaillance. Les rechargements effectués sur la surface du rotor sont recommandés par la norme API 687 : soudage TIG, soudage à l'arc submergé SAW, les procédés HVOF et HVLF, le procédé de combustion intermittente, ainsi que le procédé de revêtement par laser Cladding, qui a fait le sujet du dernier chapitre dédié à la simulation.

Pour rappel, la simulation avait été faite en utilisant deux éprouvettes de propriétés mécaniques différentes : un premier échantillon représentant l'arbre du rotor en acier de type ck45, puis, un deuxième représentant ce même arbre après intervention de maintenance et rechargement par laser cladding. Ce qu'il faut préciser c'est que cette méthode de projection est de dernière génération et que son efficacité a déjà été prouvée précédemment en comparaison avec le procédé HVOF. Les résultats obtenus après simulation de sollicitations en torsion et en flexion ont confirmé les mérites du procédé, avec une déformation maximale sous torsion et un déplacement directionnel sous flexion considérablement réduits après revêtement par laser.

Références bibliographiques :

- [1]. Epoxy 3000. Différence entre sablage, grenailage et microbillage [en ligne]. Consulté le 05/04/2020. Disponible sur : <https://www.epoxy3000.com/>
- [2]. FILAB : laboratoire d'analyse de chimie organique, minérale et matériau. Le grenailage : une approche efficace pour le traitement des matériaux [en ligne]. Consulté le 05/04/2020. Disponible sur : <https://filab.fr/>
- [3]. Sofrap. Société française de produits métallurgiques [en ligne]. Consulté le 10/04/2020. Disponible sur : <http://www.sofrap.biz/>
- [4]. Brest surfaces technologie. Traitement de surface [en ligne]. Consulté le 07/04/2020. Disponible sur : <https://www.bst-traitement.fr/>
- [5]. Wikipédia l'encyclopédie libre. Zingage [en ligne]. Consulté le 07/04/2020. Disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/>
- [6]. Gerster, l'univers du traitement thermique. Trempe [en ligne]. Consulté le 10/04/2020. Disponible sur : <https://www.gerster.ch/fr/>
- [7]. International contrôles. Principes généraux et méthodes de contrôle [en ligne]. Consulté le 21/05/2020. Disponible sur : <https://www.internationalcontroles.com/fr/>
- [8]. Hubert Faigner. Ressources et cours en ligne pour le bts maintenance des systèmes [en ligne]. Consulté le 22/05/2020. Disponible sur : <https://hubertfaigner.fr/>
- [9]. BENREZZAK Samir. Etude de la performance d'un Compresseur centrifuge multi-étagés K101 A de la station de Oued Noumer. MASTER en Maintenance industrielle : Génie Mécanique. Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid, 2013.
- [10]. HANLON, Paul C. Compressors-Handbooks. McGraw-Hill Education, 2001.
- [11]. SLAMANI Zoheir. Méthodologie de maintenance du rotor d'un compresseur centrifuge, Complexe GL2/Z, Arzew. Mémoire de projet de fin d'études d'ingénieur : Génie Mécanique. Alger : Ecole nationale polytechnique, 2019.
- [12]. Spécification de réparation des rotors des turbines et compresseurs, Sonatrach - complexe GL2/Z, Mars 2017.