

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique

Substitution du procédé chromage dur par la projection à haute vitesse par combustion d'oxygène HVOF (high velocity oxy fuel)

Réalisé par :

SMAANI Kader

Présenté et soutenu publiquement le : 16/09/2020

Composition du jury :

Président	Mr H. SEDJAL	MAA	ENP
Promoteur	Mr D. SAIDI	MCB	ENP
Promoteur	Mr B. GUERGUEB	MAA	ENP
Examineur	Mr M. LATRECHE	MAA	ENP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique

Substitution du procédé chromage dur par la projection à haute vitesse par combustion d'oxygène HVOF (high velocity oxy fuel)

Réalisé par :

SMAANI Kader

Présenté et soutenu publiquement le : 16/09/2020

Composition du jury :

Président	Mr	H. SEDJAL	MAA	ENP
Promoteur	Mr	D. SAIDI	MCB	ENP
Promoteur	Mr	B. GUERGUEB	MAA	ENP
Examineur	Mr	M. LATRECHE	MAA	ENP

ملخص :

في استئناف العمل الذي تم إجراؤه خلال العام 2018/2019 من قبل السيد خير في قضية إصلاح 4 قضبان مكبس للضاغط الترددي الذي ينتمي إلى مجمع سوناطراك (إنتاج البروبان والبيوتان من غاز النفط السائل).

يتكون الإصلاح الذي قامت به الشركة الإسبانية تي ام كوماس من استبدال طلاء الكروم الصلب البالي على سطح القضيب بتطبيق طبقة من كربيد النجستان القائم على الكوبالت عن طريق الرش بتقنية الرش الحراري.

الكلمات الدالة: الرش الحراري، الضاغط الترددي، قضيب المكبس، حمام التحليل الكهربائي.

Abstract:

In resumption of the PFE carried out during the year 2018/2019 by Mr Kheir on a case of repair of 4 piston rods of a reciprocating compressor belonging to the SONATRACH GP1Z complex (production of propane and butane from LPG).

The repair carried out by the Spanish company TM COMAS consists in replacing the hard chrome plating worn on the translation surface of the rods by an application of a layer of cobalt based tungsten carbide by HVOF spraying.

Keywords: thermal spraying, reciprocating compressor, piston rod, electrolysis bath, HVOF.

Résumé:

En reprise du PFE réalisé durant l'année 2018/2019 par Mr Kheir sur un cas de réparation de 4 tiges de piston d'un compresseur alternatif appartenant au complexe SONATRACH GP1Z (production du propane et butane à partir du GPL).

La réparation réalisée par la société Espagnole T M COMAS consiste au remplacement du chromage dur usé sur la surface de translation des tiges par une application d'une couche de carbure de tungstène base cobalt par projection HVOF.

Mots-clés : projection thermique, compresseur alternatif, tige de piston, bain d'électrolyse, HVOF.

Remercîments

Tout d'abord, Je remercie Dieu qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

Je tiens à remercier mes chers parents, ma grand-mère pour m'avoir accompagné, encouragé et soutenu. Sans eux je n'en serais pas là.

Je présente ma plus sincère gratitude, à mes encadreurs Mr D. SAIDI et Mr B. GUERGUEB pour les orientations, la confiance et la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené à bon port.

Mes vifs remerciements vont également aux membres de jury Mr H. SEDJAL et Mr M. LATRECHE pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leur suggestion.

Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

A mon cher frère Hocine, ma chère sœur Ouiza son mari Nouredine, ma tante Naima et mes cousines Mélanie et Dana pour leur appui et leur encouragement.

A toute ma famille pour leur Soutien tout au long de mon parcours universitaire.

A mes amis Salim, Chmisso, Lyes et Walid pour leurs contributions dans ce travail.

A mes amis Khaled, Raouf, Samy, Badis, Housseem, Romaissa, Houda, Kahina, Chahra et Abir qui m'ont apporté un grand soutien tout au long de mon cursus universitaire.

*Que ce travail soit l'accomplissement
de vos vœux tant allégués.*

Merci d'être toujours là pour moi

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale	11
I. Chapitre 1 : Généralité sur les compresseurs.....	13
1.1. Introduction	13
1.2. La compression.....	13
1.2.1 But de la compression.....	13
1.3. Classification des compresseurs	14
1.4. Compresseurs centrifuges.....	15
1.4.1 Classification des compresseurs centrifuges	16
1.4.1.1 Compresseur avec corps ouverts verticalement	16
1.4.1.2 compresseurs avec corps ouverts horizontalement	17
1.4.1.3 Compresseurs avec corps en forme de cloche	19
1.4.1.4 Compresseurs type SR	19
1.5. Description des compresseurs centrifuges	20
1.5.1 Principe de fonctionnement	20
1.6. Principaux défauts des machines tournantes	22
1.6.1 Déséquilibre, défaut de balourd.....	22
1.6.1.1 Balourd statique	23
1.6.1.2 Balourd de couple	23
1.6.2 Défauts d'alignement.....	24
1.6.3 Défauts de serrage.....	25
1.7. Méthodes de surveillance	25
1.8. Techniques d'exploitation	26
1.8.1 Indicateurs scalaires.....	26
1.8.1.1 RMS	26
1.8.1.2 Facteur crête	27
1.8.1.3 Kurtosis	27
1.7. Conclusion.....	29
II. Chapitre 2 : Les contrôles non destructifs	31
2.1 Introduction	31
2.2. Généralités sur le contrôle non destructif.....	31
2.2.1. Principe	31
2.2.2. Défauts et leurs origines	31
2.2.2.1 Les défauts de surface	32

2.3. Les techniques du contrôle non destructif	33
2.3.1. Les procédés optiques	33
2.3.1.1. L'examen visuel	33
2.3.1.2. Inspection automatique	33
2.3.2. Ressuage	34
2.3.3. Magnétoscopie	35
2.3.4. Courants de Foucault	36
2.3.5 Radiographie	37
2.3.6 Ultrasons	38
2.3.7. Thermographie infrarouge	39
2.4. Autres méthodes de contrôle non destructif	40
2.5. Certification du personnel en CND	41
2.6. Conclusion.....	42
III. Chapitre 3 : Traitement et préparation de surface.....	44
3.1. Introduction	44
3.2. Préparation et conditionnement de surface	44
3.2.1. Les techniques mécaniques.....	44
3.2.1.1. Grenailage	44
3.2.1.2. Sablage	45
3.2.1.3. Microbillage	47
3.2.1.4. Polissage.....	48
3.2.1.5. Tribofinition	49
3.2.1.6. L'usinage.....	50
3.2.2. Les techniques chimiques	50
3.2.2.1. Le dégraissage.....	50
3.2.3. Les techniques thermochimiques.....	50
3.2.3.1. La cémentation	50
3.2.3.2. La carbonituration.....	51
3.3. Types de traitements de surfaces.....	52
3.4. Revêtements métalliques	52
3.4.1. Notion de revêtements métalliques :.....	52
3.4.2 Le chromage	53
3.4.2.1. Le chromage dur	54
3.4.2.2. Le chromage décoratif	61
3.4.2.3 Applications	62
3.4.3. Dépôt par projection thermique	62

3.4.3.1. Projection plasma.....	62
3.4.3.2. Projection HVOF (High Velocity Oxygen Fuel)	63
3.4.3.3. Projection HVAF (High Velocity Air Fuel)	66
3.4.4 Rechargement par laser (laser cladding).....	68
3.5. Comparaison du chromage dur avec la projection thermique	69
3.6. Conclusion.....	71
IV. Chapitre 4 : Simulation et résultat.....	73
4.1 Introduction	73
4.2 Matériaux.....	73
4.3 Revêtement des éprouvettes	73
4.3.1 Dimensions de l'éprouvette	74
4.4 Simulation des différents tests.....	76
4.4.1 Essai de traction.....	76
4.4.2 Essai de compression.....	77
4.4.3 Flexion 3 points	79
4.5 Influence des principaux paramètres en projection thermique HVOF.....	83
4.5.1 Paramètres de la torche.....	84
4.5.2 Débit de matières premières (Feedstock Spray Rate).....	84
4.5.3 Propriétés inhérentes aux particules pendant la projection thermique HVOF	84
4.5.4 Distance de projection	86
4.5.5 Angle de projection.....	86
4.5.6 Température du Substrat.....	86
4.6 Conclusion.....	87
Conclusion générale.....	88
Références bibliographiques	91
Sitographie	94

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Fréquences caractéristiques des principales défaillances affectant les machines tournantes	29
Tableau 3.1 Tableau résumant les différents types d'essai	60
Tableau 3.2 Tableau de comparaison entre le chrome dur et le revêtement par projection thermique	70
Tableau 4.1 Composition chimique et propriétés mécaniques de la pièce	73
Tableau 4.2 Composition chimique et propriétés mécaniques de la pièce	74
Tableau 4.3 Composition chimique de la poudre	74
Tableau 4.4 Caractéristiques techniques de la couche de carbure de tungstène base cobalt	74

Liste des figures

Figure 1.1 Classification des compresseurs	14
Figure 1.2 Compresseur Centrifuge multi-étage.	15
Figure 1.3 Composants d'un compresseur centrifuge – Vue méridienne.....	15
Figure 1.4 Classification des compresseurs centrifuges	16
Figure 1.5 Compresseur BCL	16
Figure 1.6 Compresseur 2BCL	17
Figure 1.7 Compresseur DBCL	17
Figure 1.8 Compresseur MCL	18
Figure 1.9 Compresseur 2MCL	18
Figure 1.10 Compresseur 3MCL	18
Figure 1.11 Compresseur type BCL-VHP	19
Figure 1.12 Compresseurs type SR	19
Figure 1.13 Schéma d'un Compresseur centrifuge.....	20
Figure 1.14 Volute d'aspiration	20
Figure 1.15 Diaphragme d'aspiration.	21
Figure 1.16 Diaphragme intermédiaire.	21
Figure 1.17 Volute de refoulement	22
Figure 1.18 Tolérance d'usinage sur un rotor	23
Figure 1.19 Image de balourd statique.....	23
Figure 1.20 Image de balourd de couple.	24
Figure 1.21 Désalignement angulaire et parallèle.....	24
Figure 1.22 Défaut d'usure d'accouplement.	25
Figure 2.1 Processus de détection et traitement de défauts.....	33
Figure 2.2 Examen par ressuage	34
Figure 2.3 Inspection par magnétoscopie.	35
Figure 2.4 Inspection par Courants de Foucault.	36
Figure 2.5 Schéma du principe de la technique CND par radiographie	37
Figure 2.6 Principe du contrôle par ultrasons	38
Figure 2.7 : Inspection par thermographie	39
Figure 2.8 Equipements pour le contrôle par émission acoustique.....	40
Figure 3.1 Traitement de surface par grenailage	45
Figure 3.2 Abrasifs de sablage.....	46
Figure 3.3 Décapage à l'abrasif bille de verre	47
Figure 3.4 Polissage du cristal	48
Figure 3.5 Tribofinition	49
Figure 3.6 Organigramme récapitulatif des types de traitements de surface	52
Figure 3.7 Représentation en coupe d'acier revêtu.....	53
Figure 3.8 Observation en surface d'une couche de chromatisation jaune après séchage.	56
Figure 3.9 Evolution des fissures d'une couche de chromatisation noire sur zinc-fer en fonction du temps d'immersion.....	57
Figure 3.10 Tableau résumant les différentes méthodes d'essai.....	59
Figure 3.11 Évolution de l'aspect avec les paramètres de chromage	62
Figure 3.12 Projection plasma	63
Figure 3.13 Projection thermique HVOF.....	64
Figure 3.14 Quelques projections par système H.V.O.F	65
Figure 3.15 Différentes techniques de Projection thermique.....	66

Figure 3.16 Projection thermique HVAF.....	67
Figure 3.17 Procédé de rechargement par laser	68
Figure 4.1 Dimensions des éprouvettes pour essais de traction selon les normes	74
Figure 4.2 La norme utilisée pour notre éprouvette.....	75
Figure 4.3 Propriétés du chromage dur et de carbure de tungstène base cobalt	75
Figure 4.4 L'éprouvette avec maillage.	75
Figure 4.5 Figure représentant la contrainte de Von-Mises pour le chromage dur (en traction).....	76
Figure 4.6 Figure représentant la contrainte principale maximale pour le chromage dur (en traction)	76
Figure 4.7 Figure représentant la contrainte de Von-Mises pour WC-Co (en traction)	77
Figure 4.8 Figure représentant la contrainte principale maximale pour WC-Co (en traction)	77
Figure 4.9 Figure représentant la contrainte de Von-Mises pour le chromage dur	78
Figure 4.10 Figure représentant la contrainte principale maximale pour le chromage dur	78
Figure 4.11 Figure représentant la contrainte de Von-Mises pour WC-Co	78
Figure 4.12 Figure représentant la contrainte principale maximale pour WC-Co.....	79
Figure 4.13 Test de flexion 3 points	79
Figure 4.14 Dimensions de l'éprouvette pour essais de flexion selon les normes.....	80
Figure 4.15 Dimensions de l'éprouvette pour essais de flexion selon les normes.....	80
Figure 4.16 L'éprouvette utilisée pour la flexion 3 points avec maillage.....	80
Figure 4.17 Figure représentant la contrainte de Von-Mises pour le chromage dur	81
Figure 4.18 Figure représentant la contrainte principale maximale pour le chromage dur	81
Figure 4.19 Figure représentant le déplacement directionnel suivant l'axe y pour le chromage dur	81
Figure 4.20 Figure représentant la contrainte de Von-Mises pour le WC-Co	82
Figure 4.21 Figure représentant la contrainte principale maximale pour le WC-Co.....	82
Figure 4.22 Figure représentant le déplacement directionnel suivant l'axe y pour le WC-Co.....	82
Figure 4.23 Effet de la taille de particule (18 μm et 46 μm) sur l'évaluation de la vitesse d'une particule en fonction de la distance de projection d'une poudre d'alumine obtenue avec la projection au plasma.	85
Figure 4.24 Effet de la taille des particules sur l'évaluation de la température d'une particule.....	85
Figure 4.25 Schéma de distance de projection dans les procédés de projection thermique	86

Introduction générale

Qui ne veut pas une machine à vie qui ne cesse pas de produire et si cette machine représente le cœur d'un processus compliqué et dans le cas où ce cœur s'arrête toute l'opération est interrompue provoquant ainsi des pertes économiques. Pour éviter cela, nous devons adopter une maintenance fiable pour prévenir et prédire la panne avant son occurrence et par la suite adopter une méthodologie de réparation adéquate. Dans ce mémoire intitulé : « Méthodologie de suivi et de réparation d'une tige de piston d'un compresseur alternatif », pourquoi celui-ci, d'ailleurs, et pas un autre ? Pour la simple raison que la résolution des problèmes industriels est de se mesurer à des défis stimulants qui nécessitent une façon de faire spéciale. Ces défis permettent de motiver davantage et d'aider à apprendre une nouvelle technologie et initier dans un nouveau domaine. La démarche est osée, et constitue selon nous un défi considérable dans le but de détecter les pannes au niveau de la tige de piston du compresseur et les corriger.

Dans notre cas d'application, la panne se présente au niveau de la tige de piston du compresseur de la phase trois du complexe GP1Z située à Arzew. Dans ce dernier le suivi est basé sur l'analyse vibratoire renforcé par un contrôle systématique qui a fini par détecter un des défauts au niveau de la tige de piston, puis dans le but d'améliorer le processus au niveau de l'analyse vibratoire. Des techniques d'analyse vibratoire ont été proposées pour augmenter l'efficacité du processus du suivi. Par la suite pour réparer la tige de piston un contrôle non destructif a été fait pour déceler toutes les anomalies et les localiser. Ce contrôle permet de choisir les techniques de rechargement adéquates dans le but de réparer la tige et d'augmenter sa durée de vie tout en identifiant les causes qui ont provoqué ces défauts.

Chapitre 1

I. Chapitre 1 : Généralité sur les compresseurs

1.1. Introduction

Les turbocompresseurs sont des machines dans lesquelles, un fluide échange de l'énergie avec des impulseurs munis d'aubes, tournant autour d'un axe.

L'indice principal de ces compresseurs est la continuité de l'écoulement de l'entrée à la sortie.

Les aubes ménagent entre elles des canaux par lesquels le fluide s'écoule. Elles sont des obstacles prolongés donnant la direction au fluide qui les traverse.

Les turbocompresseurs peuvent être divisés en plusieurs types à savoir :

- Ventilateurs
- Soufflantes
- Compresseurs

Les turbocompresseurs sont appliqués dans divers domaines, ils peuvent être utilisés dans l'industrie du gaz, la métallurgie mécanique etc....

Les avantages de ces machines sont qu'elles peuvent être accouplées directement à un moteur électrique ou à une turbine sans mécanisme bielle-manivelle. C'est pour cette raison qu'elles sont moins encombrantes par rapport aux compresseurs à piston.

Les compresseurs sont des appareils qui transforment l'énergie mécanique fournie par une machine motrice en énergie de pression.

1.2. La compression

C'est une opération qui consiste à faire passer le fluide d'une pression P_a appelée pression d'aspiration à une pression P_r (supérieure à P_a) appelée pression de refoulement. Le travail requis pour effectuer cette opération est appelé "travail de compression".

L'énergie cinétique générée par la roue est convertie en énergie de pression dans le diffuseur.

Un compresseur est une machine dynamique utilisée pour effectuer des opérations de compression de gaz.

1.2.1 But de la compression

Cette opération a pour but de :

- Faire circuler un gaz dans un circuit fermé.
- Produire des conditions favorables (de pression) pour des réactions chimiques.
- Envoyer un gaz dans un pipe-line de la zone de production vers l'utilisateur.
- Obtenir de l'air comprimé pour la combustion.

1.3. Classification des compresseurs

Les compresseurs peuvent être classés selon les caractéristiques suivantes :

- Le principe de fonctionnement (volumétrique, dynamique)
- Mouvement des pièces mobiles (mouvement linéaire, rotatif)
- Les compressions d'air
- Les compressions des gaz

En général, il existe deux grandes familles de compresseur, les compresseurs volumétriques et turbocompresseurs. Dans les premiers, l'élévation de pression est obtenue en réduisant un certain volume de gaz par action mécanique, dans les seconds, on augmente la pression en convertissant de façon continue l'énergie cinétique communiquée au gaz en énergie de pression due à l'écoulement autour des aubages dans la roue.

- **Les turbocompresseurs :** (Compresseurs centrifuges et axiaux)

Dans les compresseurs centrifuges, le mouvement du gaz est assuré par la rotation rapide de la roue à aubes (sous l'action des forces centrifuges).

Dans les compresseurs axiaux, le gaz se déplace le long de l'axe de rotation des roues à aubes.

- **Les compresseurs volumétriques :** (Compresseurs à piston et rotatifs)

Dans les compresseurs à piston, le mouvement du gaz s'effectue par le mouvement rectiligne alternatif du piston entraîné par le mécanisme bielle - manivelle.

Dans les compresseurs rotatifs, le mouvement du gaz est effectué par la rotation de l'élément de refoulement (à vis sans fin ; à palettes etc....).

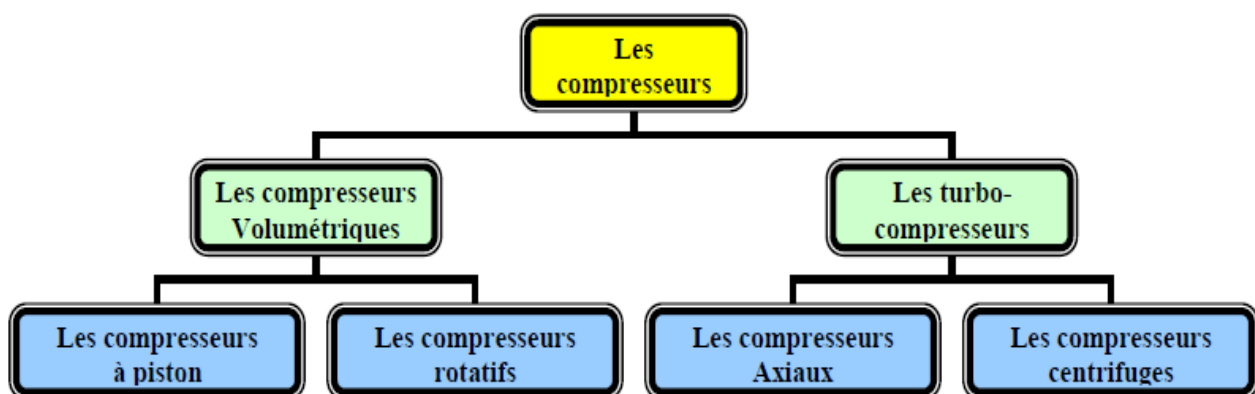


Figure I.1 Classification des compresseurs

1.4. Compresseurs centrifuges

Le compresseur centrifuge est une turbomachine dans laquelle le gaz s'écoule principalement dans le sens radial. L'énergie nécessaire pour augmenter la pression de gaz est fournie en fluide par les aubes d'une roue centrifuge. Ces aubes divisent la surface latérale de la roue en secteurs servant de canaux d'écoulement, et forment un aubage.

Les roues solidaires à l'arbre fournissent de l'énergie à ce dernier. Une partie de cette énergie est transformée en augmentation de pression directement dans les roues, le reste dans le stator, c'est-à-dire dans les diffuseurs.

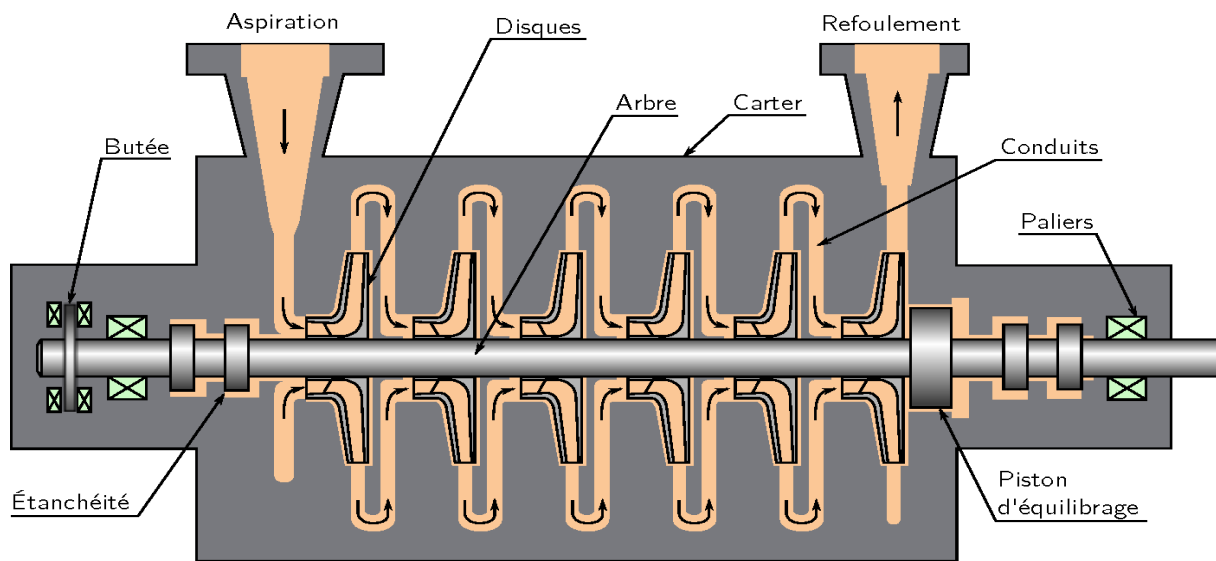


Figure I.2 Compresseur Centrifuge multi-étage. [1].

Les deux composants spécifiques aux compresseurs centrifuges sont le rouet et le diffuseur radial, schématisé sur la figure 1.3. Ils peuvent éventuellement être suivis par un redresseur axial.

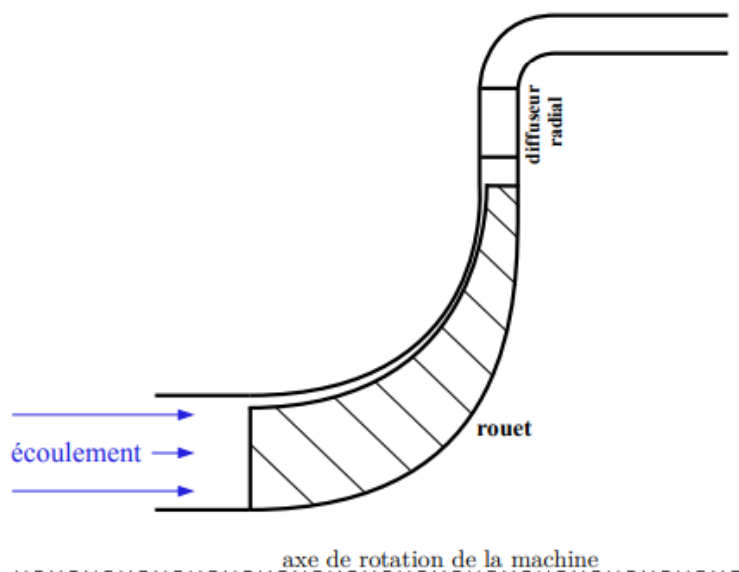


Figure I.3 Composants d'un compresseur centrifuge – Vue méridienne. [2]

1.4.1 Classification des 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.

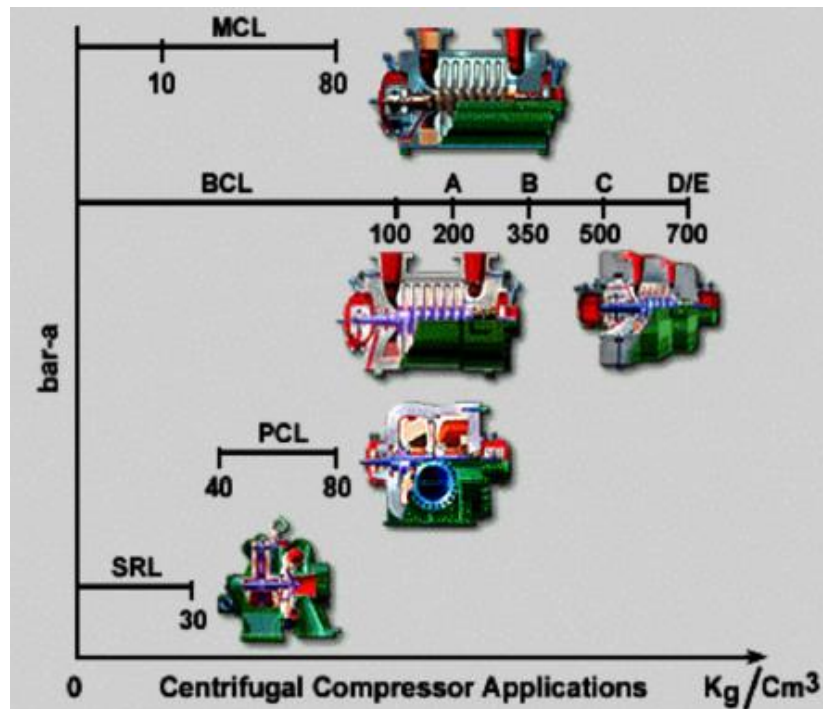


Figure I.4 Classification des compresseurs centrifuges [3]

1.4.1.1 Compresseur avec corps ouverts verticalement

Ces compresseurs sont généralement multi étagés, et peuvent fonctionner à haute pression. L'étanchéité est assurée par un joint torique monté entre le corps et le couvercle, ce dernier est rapporté à l'enveloppe par boulonnage qui facilite le montage et le démontage de l'ensemble aérodynamique.

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 « barrel ». Ces compresseurs, généralement multi-étages, peuvent fonctionner à des pressions élevées (jusqu'à 700 kg/cm²).

- Compresseur BCL

Ce sont des compresseurs du type barrel prévoyant un seul étage de compression.

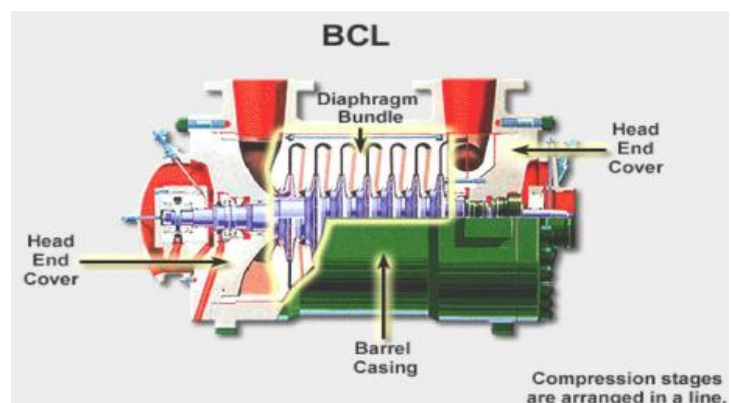


Figure I.5 Compresseur BCL [4]

- Compresseurs 2BCL

Il s'agit de compresseurs de type baril avec deux étagés de compression en série dans un seul corps.

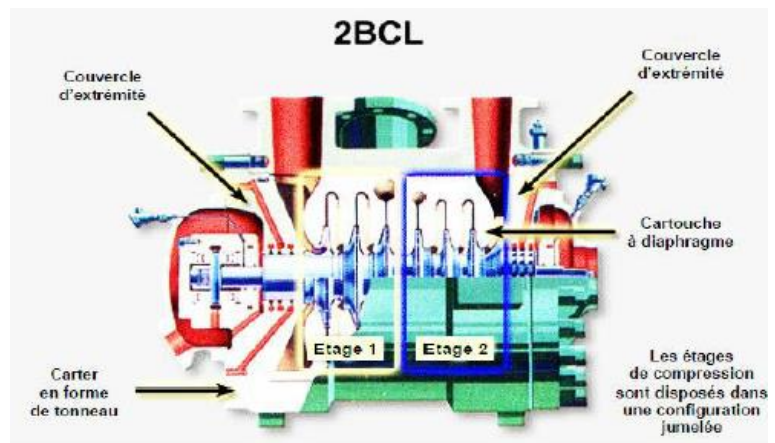


Figure I.6 Compresseur 2BCL [4]

- Compresseurs DBCL

Ce sont des compresseurs barils à haute pression ; ont des corps en forme de cloche et sont fermés par des segments à la place des boulons.

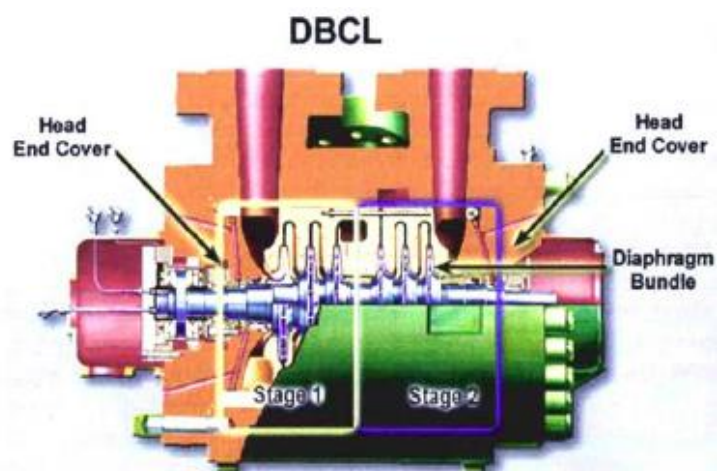


Figure I.7 Compresseur DBCL [4]

1.4.1.2 compresseurs avec corps ouverts horizontalement

Ces compresseurs fonctionnent généralement à de basses pressions et débits importants.

Le corps ouvert horizontalement est constitué évidemment de demi corps unis sur le joint horizontal, les tubulures d'aspiration et de refoulement ainsi celles intermédiaires, les tuyauteries d'huile de graissage et tous les raccords du compresseur et le reste de l'installation se font normalement moyennant le demi corps inférieur, ce qui permet une maintenance aisée.

L'enveloppe est moulée et généralement avec une surépaisseur de corrosion de 3mm. Les tubulures en fonderie utilisent une volute extérieure au niveau du refoulement pour réduire l'entraxe entre les paliers.

Les compresseurs avec corps ouvert horizontalement sont indiqués par le signe MCL et peuvent être subdivisés à leur tour suivant le nombre de section.

- Compresseur MCL

Ce sont des compresseurs multi-étages et comprennent un étage de compression.

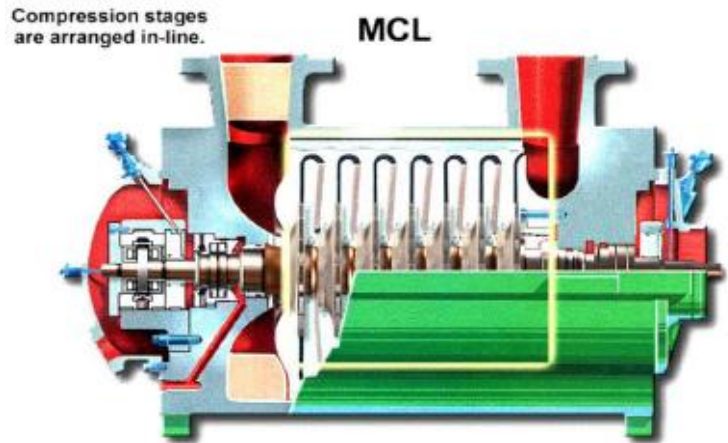


Figure I.8 Compresseur MCL [4]

- Compresseur 2MCL

Il s'agit de compresseur multi étagés groupant deux étages de compression en série avec une réfrigération intermédiaire dans la même machine.

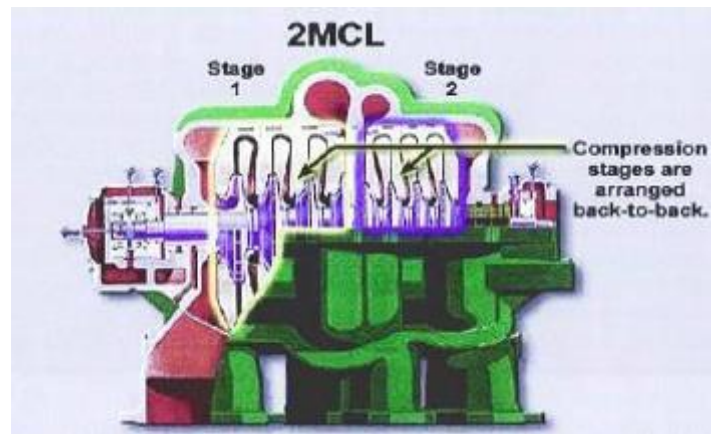


Figure I.9 Compresseur 2MCL [4]

- Compresseur 3MCL

Ce sont des compresseurs multi-étages généralement avec plus de deux étages de Compression réalisés dans un seul corps ; en général, ils sont utilisés pour des services où on a besoin de comprimer des débits de gaz divers à des niveaux de pression différentes, soit avec injection ou avec extraction de gaz pendant la compression.

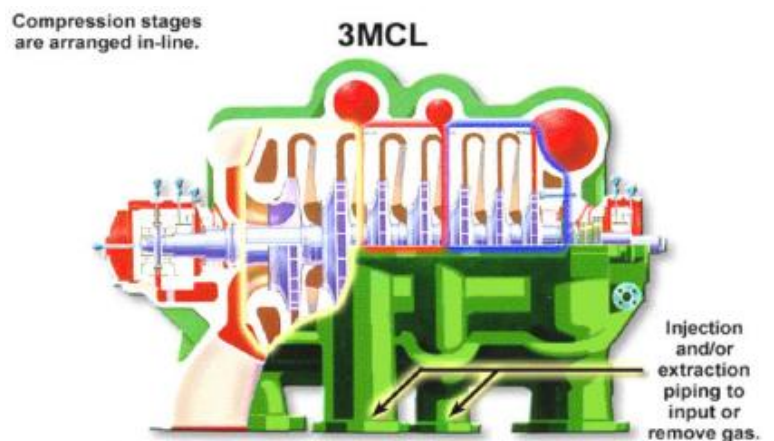


Figure I.10 Compresseur 3MCL [4]

1.4.1.3 Compresseurs avec corps en forme de cloche

- Compresseurs type BCL-VHP

Les corps de ces compresseurs sont en forme de cloche avec un seul flasque de fermeture sur un plan vertical au lieu de deux ; comme pour les BCL, et généralement ils sont utilisés pour transporter le gaz naturel les brides d'aspiration et de refoulement sont latérales et opposées pour pouvoir les raccorder plus facilement aux canalisations du gazoduc.

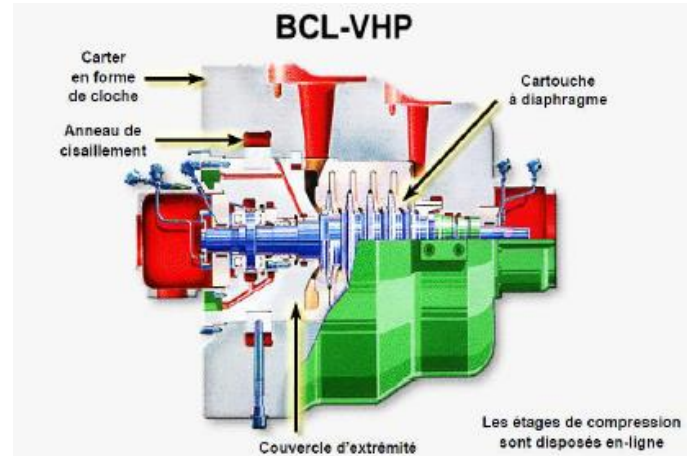


Figure I.11 Compresseur type BCL-VHP [3]

1.4.1.4 Compresseurs type SR

Il s'agit de compresseurs pour des services à des pressions relativement basses, leur caractéristique est d'avoir plusieurs arbres et les roues relatives, montées en porte-à-faux. La roue est du type ouvert, 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 etc....

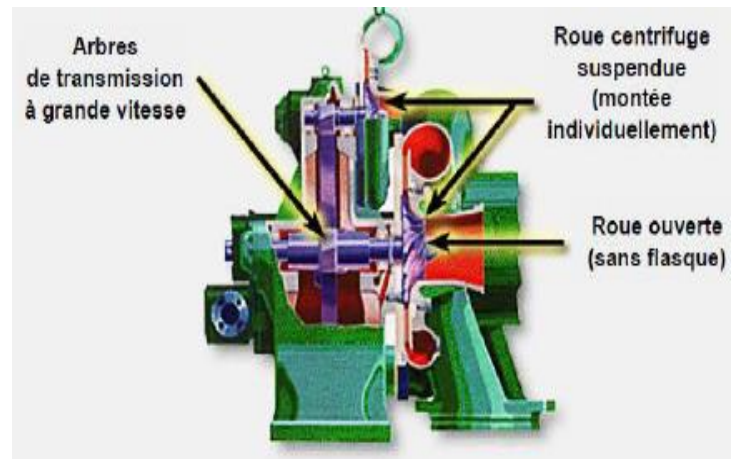


Figure I.12 Compresseurs type SR [3]

1.5. Description des compresseurs centrifuges

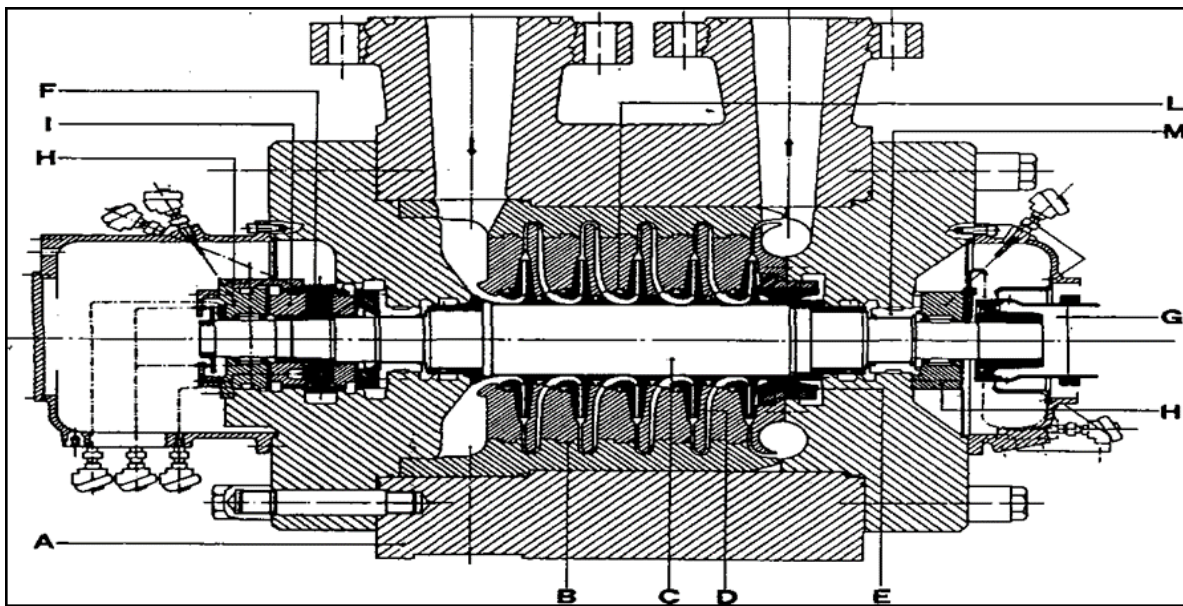


Figure I.13 Schéma d'un Compresseur centrifuge

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

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

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

1.5.1 Principe de fonctionnement

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

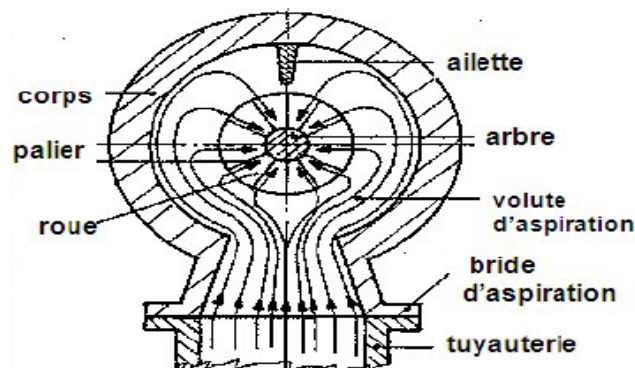


Figure I.14 Volute d'aspiration

Le gaz entre dans le diaphragme d'aspiration et donc aspiré par la première roue.

La roue pousse le gaz vers la périphérie en augmentant sa pression ; la vitesse à la sortie aura une composante radiale et une composante tangentielle.

Ensuite, d'un mouvement en spirale, le gaz parcourt une chambre circulaire formée d'un diffuseur où la vitesse diminue avec une augmentation de la pression.

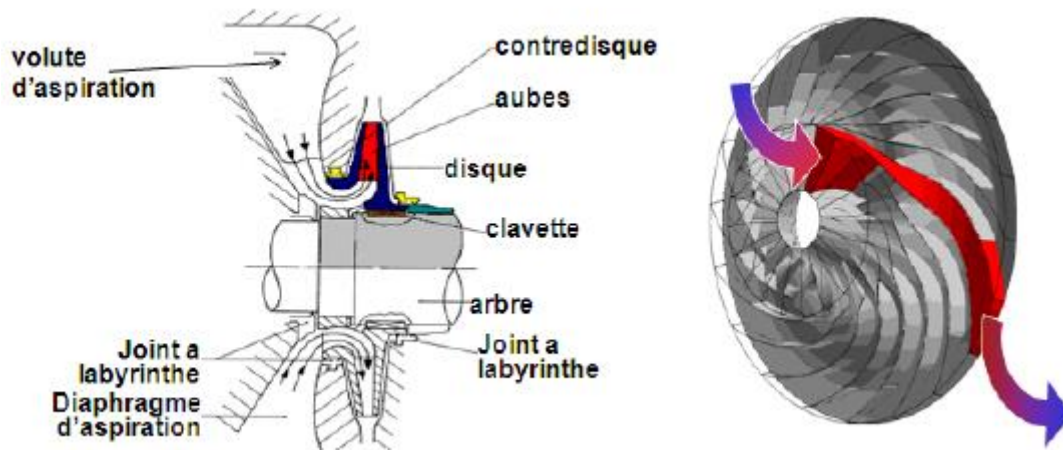


Figure I.15 Diaphragme d'aspiration.

Puis le gaz parcourt le canal de retour ; celui-ci est une chambre circulaire délimitée par deux anneaux formant le diaphragme intermédiaire où se trouvent les aubes qui ont la tâche de diriger le gaz vers l'aspiration de la roue suivante.

La disposition des aubes est telle qu'elle permet de redresser le mouvement en spirale du gaz de manière à obtenir une sortie radiale et une entrée axiale vers la roue suivante. Ensuite le gaz est aspiré par la deuxième roue et, pour chaque roue, le même parcours se répète.

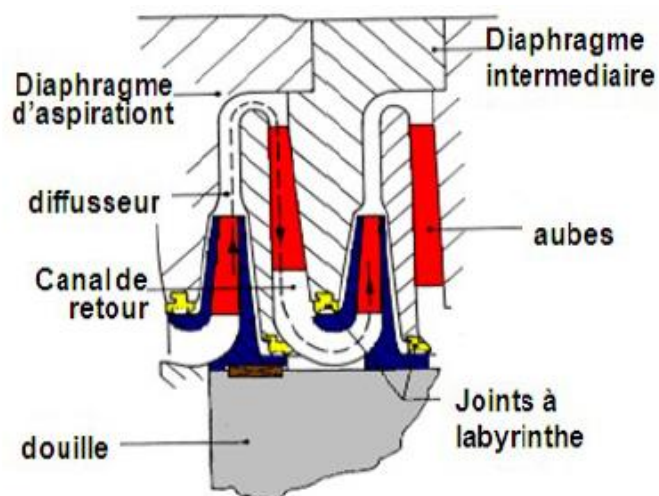


Figure I.16 Diaphragme intermédiaire.

Pour réduire au minimum les fuites internes de gaz, des joints labyrinthes formés de 2 ou plusieurs segments de bagues sont montés sur le diaphragme.

La dernière roue de l'étage envoie le gaz dans un diffuseur qui mène à une chambre annulaire appelée volute de refoulement qui collecte le gaz de la périphérie des diffuseurs et le dirigeant vers la bride de refoulement, près de cette dernière il y a une autre ailette qui empêche le gaz de continuer à retourner dans la volute et qu'il envoie à la bride de refoulement.

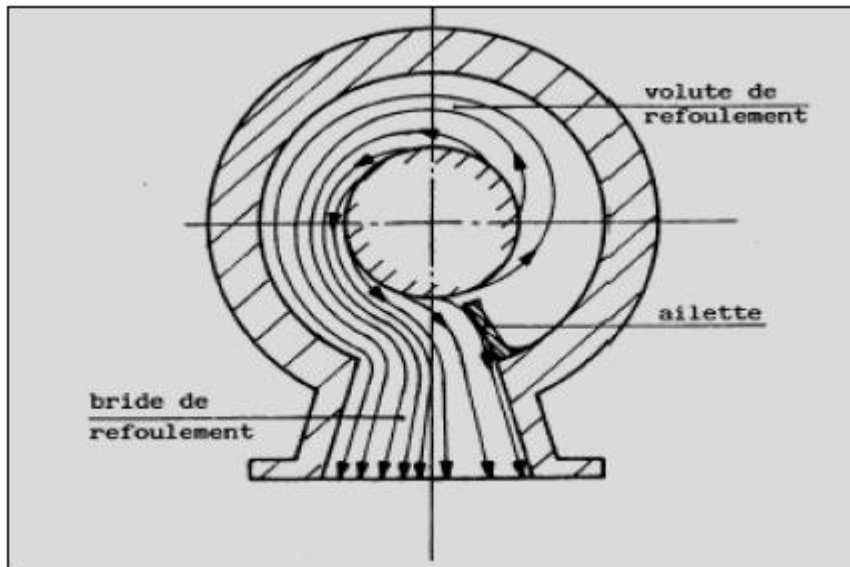


Figure I.17 Volute de refoulement

1.6. Principaux défauts des machines tournantes

L'identification d'anomalies à un stade précoce, le suivi de leurs évolutions et le diagnostic de l'état d'une machine ne sont possibles que si, préalablement, l'on connaît les symptômes vibratoires associés à chaque défaut susceptible de l'affecter, c'est-à-dire si l'on connaît les images vibratoires induites par ces défauts. On ne trouve que ce que l'on recherche et, si l'on ne sait ce que l'on doit trouver, on risque de chercher longtemps sans résultat.

Il est donc essentiel de connaître la cinématique de la machine et les manifestations dynamiques ou symptômes associés aux différents défauts potentiels, afin de définir les indicateurs de surveillance, les techniques de traitement des signaux nécessaires au calcul de ces indicateurs ou à la mise en évidence de ces images et, enfin, pour formuler un diagnostic sur son état. [6]

1.6.1 Déséquilibre, défaut de balourd

C'est la cause de vibration la plus commune et la plus fréquente rencontrée. Ce phénomène se produit à la vitesse de rotation, et peut être causé par une mauvaise répartition spatiale des masses dans la structure, entraînant un déplacement du centre de gravité en dehors de l'axe géométrique du rotor de la machine tournante. [7]

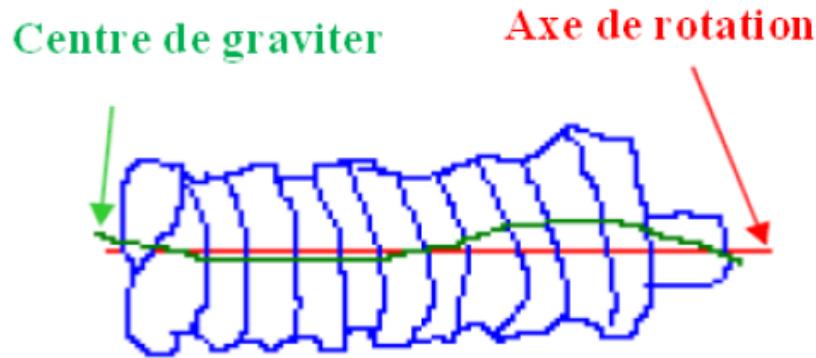


Figure I.18 Tolérance d'usinage sur un rotor [6]

1.6.1.1 Balourd statique

Le balourd statique est la condition de déséquilibre où l'axe central principal est décalé parallèlement au centre de rotation.

Le balourd statique, peut être décelé en plaçant la pièce ouvrière sur des tranchants de couteaux parallèles. Le côté lourd du rotor se déplacera vers le bas.

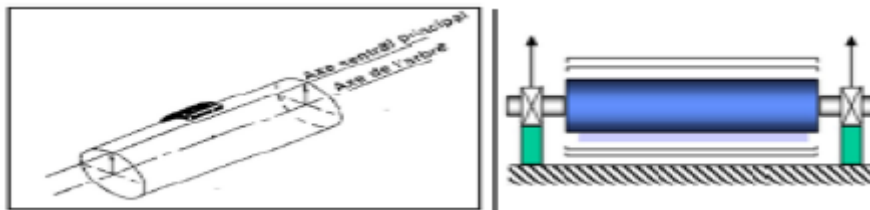


Figure I.19 Image de balourd statique.[8]

Ce type de balourd peut être corrigé en ajoutant ou en enlevant du poids dans un seul plan de correction.

1.6.1.2 Balourd de couple

Le couple est tout simplement deux forces parallèles égales agissant en direction opposée, mais sur la même ligne droite.

Le balourd à chaque extrémité du rotor, mais sur des côtés opposés de la ligne du centre de rotation, crée un déséquilibre de couple.

Le balourd de couple devient apparent seulement lorsque la pièce est en rotation, et peut souvent être identifié en comparant les lectures d'amplitude et de phase de vibration du palier au de l'arbre à chaque bout de rotor.

Contrairement au balourd statique, qui peut être corrigé sur un seul plan, le balourd de couple ne peut être corrigé qu'en faisant des corrections d'équilibre sur deux plans.

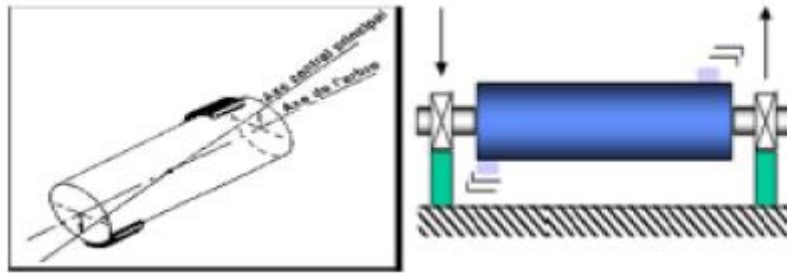


Figure I.20 Image de balourd de couple. [8]

1.6.2 Défauts d’alignement

Un défaut d’alignement peut apparaître lorsqu’un arbre doit entrainer un autre arbre, souvent par l’intermédiaire d’un accouplement.

Ce défaut est très commun dans les machines tournantes. La force mécanique est transmise par les arbres couplés qui doivent être alignés, sinon, des vibrations significatives peuvent se produire.

On constate deux types de désalignement (parallèle et angulaire) :

- Désalignement parallèle :
Il se produit quand les axes de rotation des deux machines ont le même angle, d’orientation, mais ils sont séparés verticalement, chacun de l’autre.
Le désalignement parallèle se caractérise par une vibration radiale élevée.
- Désalignement angulaire :
Il se produit quand l’axe de rotation des deux machines a un angle différent. Le désalignement angulaire se caractérise par une vibration axiale élevée.

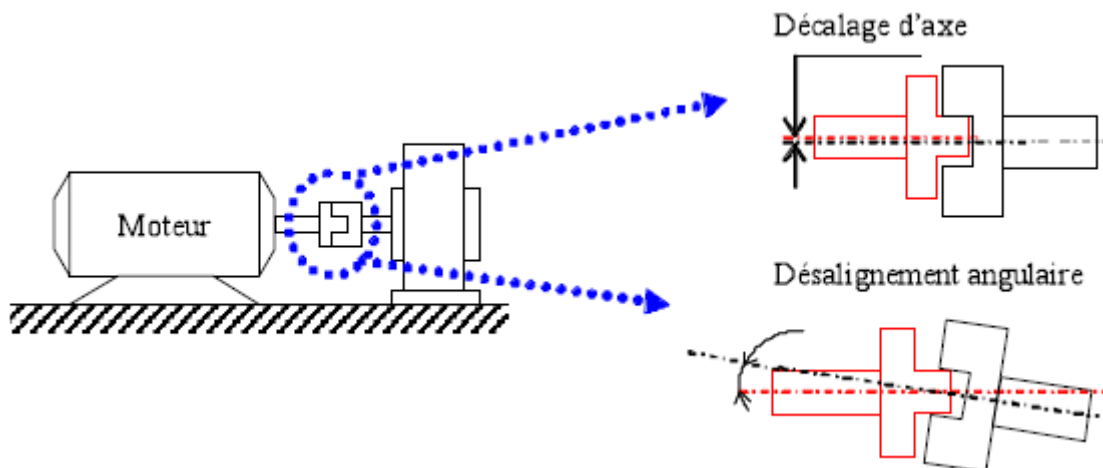


Figure I.21 Désalignement angulaire et parallèle.

1.6.3 Défauts de serrage

Lorsqu'un palier est desserré ou présente une possibilité de mouvement partiel dans le plan radial, il apparaît une vibration radiale à une fréquence radiale égale à deux fois la vitesse de rotation. Cette vibration se traduit sous l'effet de balourd initial et elle peut prendre une amplitude élevée en fonction du degré de desserrage du palier.

Le mauvais serrage de la structure de la machine génère des vibrations et un certain bruit. Le spectre typique mesuré sur une machine dans laquelle il existe un jeu contient un grand nombre de pics à des fréquences multiples de la fréquence de rotation.

La figure 1.22 montre un exemple de spectre sur une machine dont le joint de l'accouplement est usé. La fréquence de rotation est de 23,25 Hz.

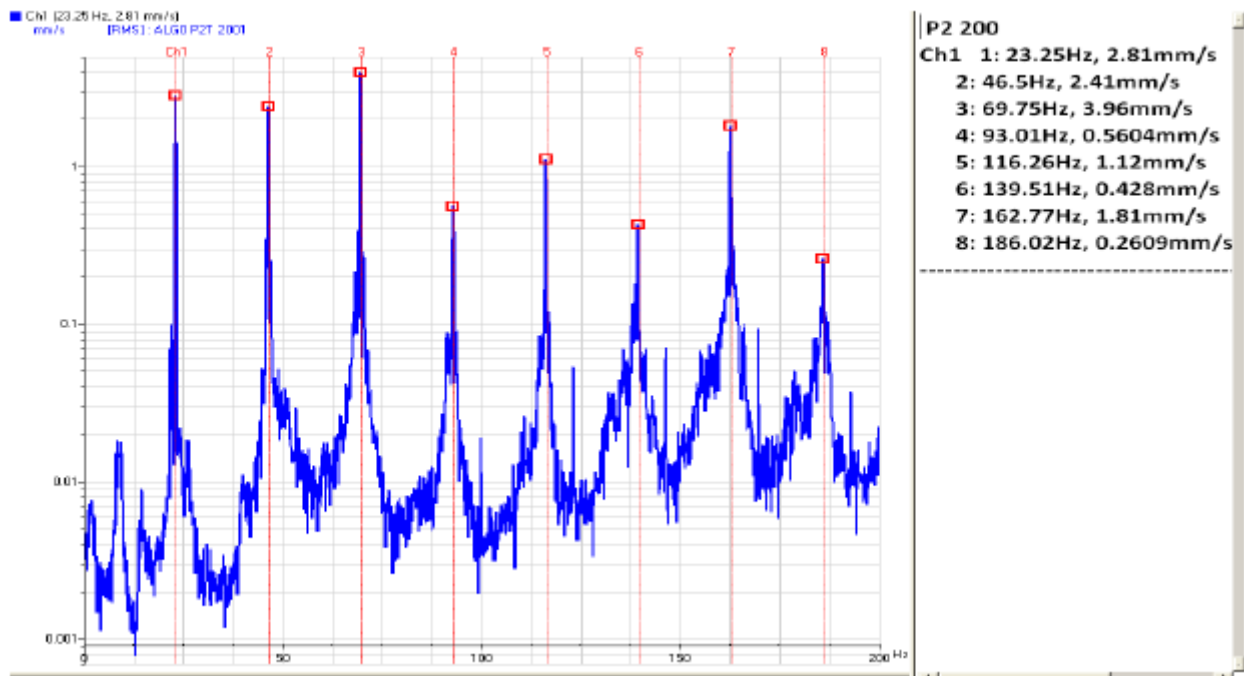


Figure I.22 Défaut d'usure d'accouplement. [9] [10]

1.7. Méthodes de surveillance

De manière générale, la surveillance s'assimile au suivi des conditions de fonctionnement d'un système, afin de détecter les éventuelles carences de ce dernier. Alors que le diagnostic est assimilé à l'identification du dysfonctionnement une fois le mode défaillant décelé. Quelques concepts de base de la surveillance des systèmes sont donnés comme suit :

- **Mode de fonctionnement** : Le mode normal de fonctionnement d'un système est observé lorsque la variance de ses variables caractéristiques n'excède pas un certain seuil autour de leurs valeurs nominales. Dans le cas contraire, le système est considéré en mode défaillant.

- **Un défaut** est défini comme une anomalie du comportement normal du système qui ne remet pas forcément en cause sa fonction
- **Une panne** est considérée comme l'incapacité d'un dispositif à remplir une tâche requise. Un système peut toutefois être considéré en panne dès l'apparition d'une défaillance.
- **Un symptôme** est l'événement ou l'ensemble d'événements à travers lesquels est détecté le passage d'un mode de fonctionnement normal à un mode défaillant (et/ou) est identifié le mode de défaillance rencontré.

Dans le cas des systèmes complexes, l'apparition d'un seul symptôme ne signifie pas forcément le passage en mode de défaillance, la supervision basée sur une seule variable peut induire à des résultats incorrects à cause du manque d'information.

1.8. Techniques d'exploitation

Un intérêt particulier a été donné dans ces travaux à l'analyse vibratoire comme source d'information vue, par la plupart, comme la technique la plus adéquate et la plus globale pour la surveillance des machines tournantes.

Dans cette section seront décrites les principales techniques et méthodes d'exploitation de l'information délivrée par les capteurs de vibration. [12]

1.8.1 Indicateurs scalaires

Basée sur les signaux temporels extraits des capteurs de vibration et filtrés sur certaines plages fréquentielles. Cette technique rapide, extrait des indicateurs, pour la plupart statistiques, résumant l'information contenue dans le signal et permettant de générer un repère. Le suivi d'évolution du repère donne une information plus ou moins précise et complète, sur son état de fonctionnement. L'utilisation de ces techniques donne une première information à partir des signaux, mais nécessite d'être accompagnée par des investigations plus poussées dans le cadre du diagnostic.

Une multitude d'indicateurs existent, plus ou moins performants et adéquats pour le dépistage de certaines défaillances plus que d'autres. Les indicateurs les plus utilisés sont décrits comme suit [13].

1.8.1.1 RMS

Le RMS, nommée aussi valeur efficace ou moyenne quadratique d'un signal, correspond à la racine carrée du moment d'ordre deux et est calculé comme montré par l'équation :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [s(t)]^2}$$

Où : $s(t)$ est le signal temporel mesuré.

N_e : représente le nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

Le RMS est un des premiers indicateurs utilisé en industrie, dû notamment à sa simplicité et à sa rapidité d'exécution. Une variation excessive du niveau RMS signifie en général un changement de l'état de fonctionnement et donc une défaillance. L'un des inconvénients majeurs de l'utilisation du RMS c'est qu'il donne généralement une alarme assez tardive, notamment pour le cas des défauts de roulements, où la variation du signal due à l'apparition du défaut est masquée par d'autres composantes d'amplitudes plus élevées.

1.8.1.2 Facteur crête

Le facteur crête F_c est un indicateur plus spécifique, qui permet d'observer de plus près le signal vibratoire. Le suivi du facteur crête permet un dépistage plus précoce des défauts en mesurant le rapport entre la valeur maximale du module du signal (valeur crête) sur la valeur efficace, comme montré par l'équation :

$$F_c = \frac{\text{Valeur crête}}{RMS} = \frac{\text{Sup } |s(t)|}{\sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [s(t)]^2}}$$

Le facteur crête suit une distribution normale, sa valeur varie en générale entre 3 et 6, pour un fonctionnement sans défaut et peut aller au-delà de 6 dès l'apparition d'une défaillance.

D'autres indicateurs ont été développés sur la base du facteur crête, tels que le facteur K, en multipliant la valeur crête par la valeur efficace ou la valeur crête à crête, mesurant l'écart entre les amplitudes des pics supérieur et inférieur.

1.8.1.3 Kurtosis

Plus spécifique au dépistage des défauts de roulements, le kurtosis est une grandeur statistique permettant d'analyser le caractère « pointu » ou « plat » d'une distribution, et donc d'observer la forme du signal. Dérivé du moment statistique d'ordre quatre, il est défini comme le rapport de la valeur moyenne du signal élevée à la puissance 4 sur le carré de son énergie. Il est donné par la formule suivante :

$$Kurtosis = \frac{M_4}{M_2^2} = \frac{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [s(t) - \bar{s}]^4}{\left[\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} (s(t) - \bar{s})^2 \right]^2}$$

Où : M_2 et M_4 sont les moments statistiques d'ordre 2 et 4.

$s(t)$ est le signal temporel,

\bar{s} est la valeur moyenne des amplitudes,

N_e est le nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

Le Kurtosis approche la valeur de 3 pour un fonctionnement sans défauts de roulement, et augmente de façon remarquable dès l'apparition d'impulsions dues à la naissance d'un défaut. Le Kurtosis tend à revenir à 3 dès que la dégradation entre en phase terminale.

Pour être plus efficaces le Kurtosis et le facteur crête sont calculés dans certaines bandes fréquentielles où l'effet engendré par les dégradations est plus visible.

Le tableau suivant montre les défaillances les plus courantes affectant les machines tournantes et leurs fréquences caractéristiques.

Défaut	Fréquences caractéristiques
Balourd	Fréquence de rotation (FR)
Désalignement	FR, 2FR, Généralement 2FR est plus élevée que FR, et les vibrations axiales sont plus élevées que les radiales.
Défaut de fixation	0.5 FR, FR et plusieurs dépend de leurs harmoniques
Tourbillons d'hile	40-50% de FR
Roulements	<p>Fréquences correspondantes aux passages des éléments roulants données par les équations suivantes</p> $\text{Bague externe} = \frac{FR}{2} N_b \left(1 - \frac{D_b \cos \theta}{D_p}\right)$ $\text{Bague interne} = \frac{FR}{2} N_b \left(1 + \frac{D_b \cos \theta}{D_p}\right)$ $\text{Cage} = \frac{FR}{2} \left(1 - \frac{D_b \cos \theta}{D_p}\right)$ $\text{Bille} = \frac{FR D_p}{2 D_b} \left[1 - \left(\frac{D_b \cos \theta}{D_p}\right)^2\right]$ <p>N_b : Nombre d'éléments roulants D_b : Diamètre des éléments roulants</p>
Engrenages	<p>Donné par</p> $\text{Engrana}ge = N FR \pm k FR$ <p>N= Nombre de dents k= 0,1,2,3. . .</p>

Courroies	<p>La fréquence de rotation de la courroie est donnée par</p> $F_{rc} = \frac{\pi D_1}{L} f_1 = \frac{\pi D_2}{L} f_2$ <p>Pour le cas d'usure dans les courroies crantées :</p> $F_c = N FR \pm k F_{rc}$ <p>D_1 : Diamètre de la poulie 1 D_2 : Diamètre de la poulie 2 L : Longueur de la courroie N : Nombre de dents de la poulie k= 0,1,2,3. . .</p>
-----------	---

Tableau I.1 Fréquences caractéristiques des principales défaillances affectant les machines tournantes [11]

1.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par présenter de manière générale les compresseurs centrifuges et apprécier leur importance. Nous avons également vu un grand nombre de défaillances qui pourraient modifier ses conditions de fonctionnement. Ces défauts peuvent être capter par l'analyse vibratoire, qui permet à elle seule de détecter tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes.

Chapitre 2

II. Chapitre 2 : Les contrôles non destructifs

2.1 Introduction

Le contrôle non destructif (CND) est une technique non invasive permettant de déterminer l'intégrité d'un matériau, d'un composant ou d'une structure. Le CND offre un excellent équilibre entre le contrôle de la qualité et la rentabilité parce qu'il permet d'inspecter sans interférer l'utilisation finale d'un produit.

L'objectif principal des CND est de prédire ou d'évaluer les performances et la durée de vie d'un composant ou d'un système à différents stades des cycles de fabrication et de service. Les CND sont utilisés pour le contrôle de la qualité des installations et des produits, ainsi que pour l'évaluation de l'aptitude ou de la finalité afin d'évaluer la durée de vie restante des composants de l'installation (lignes de traitement, conduites et cuves).

2.2. Généralités sur le contrôle non destructif

2.2.1. Principe

L'ensemble des techniques et procédés de CND fournissent 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 d'elles qui est la mise en évidence de toutes les défauts susceptibles d'altérer la disponibilité et/ou la sécurité d'emploi, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné.

Généralement on peut distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la technique d'inspection employée :

- Mise en œuvre d'un processus physique énergétique ;
- Modulation ou altération de ce processus par les défauts ;
- Détection de ces modifications par un capteur approprié ;
- Traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée. [14]

2.2.2. Défauts et leurs origines

Détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci. On a l'habitude de classer les défauts en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface et les défauts internes. [14]

2.2.2.1 Les défauts de surface

Accessible à l'observateur direct mais pas toujours visibles à l'œil nu, ils peuvent se classer en deux catégories distinctes :

- Défauts ponctuels, correspondent aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, craquelures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue.
- Défauts d'aspect, correspondent à c'est-à-dire à une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur). [15]

- **Les défauts internes**

Sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Leur nomenclature est spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle. Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de porosités, de soufflures, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées, forgées, laminées, soudées.

- **Origines des défauts**

Les origines des défauts sont multiples selon les domaines étudiés. Plusieurs critères peuvent être pris en compte lors de leur classification. Dans la suite, nous allons citer deux Classification qui sont généralement adoptées et englobent toutes les origines possibles des défauts.

Il s'agit des origines des défauts suivant *leur phase d'apparition* et selon *l'environnement et la nature du spécimen inspecté*.

Phase d'apparition ; les causes des défauts peuvent être répertoriées suivant leur phase d'apparition en :

Défauts de fabrication : Ce sont des défauts générés par les différents procédés de construction ou d'assemblage. On trouve des défauts de forme, d'inclusions, de porosités, de fissurations, de moulage ou de soudage.

Défauts de service : Ce sont des défauts qui apparaissent dans des structures au cours d'utilisation, comme des fissures dues à la fatigue, défauts de collage et de fixation,

Selon l'environnement et la nature du spécimen inspecté ; Il est possible également de faire une classification en :

Matériaux solides : porosités, fissures, corrosion, ...

Assemblages : défauts de soudures, de collages d'ajustement, ...

Structures et constructions : corrosion sur les rails de chemin de fer, fissuration des ponts, ...

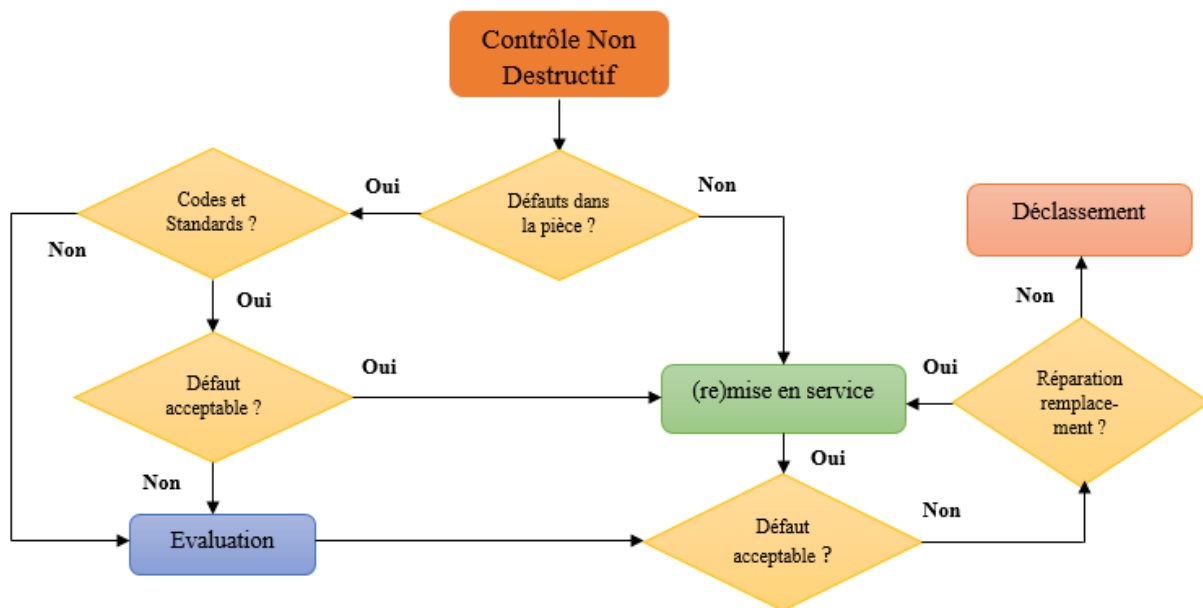


Figure II.1 Processus de détection et traitement de défauts

2.3. Les techniques du contrôle non destructif

Du fait que les origines et les types des défauts sont multiples, plusieurs techniques du CND ont été développées pour répondre aux différentes problématiques rencontrées. Le choix d'une méthode du CND dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux constituant les pièces à contrôler, la nature de l'information recherchée (position ou forme du défaut), le type de contrôle à effectuer (possibilité de contact ou non avec la pièce) et les problèmes économiques. Dans la section suivante, nous allons donner un aperçu global des techniques les plus répandues industriellement. [16]

2.3.1. Les procédés optiques

Les procédés optiques constituent un type de techniques qu'il convient de séparer en deux catégories, selon que le contrôle soit automatisé ou non.

2.3.1.1. L'examen visuel

C'est le contrôle le plus élémentaire, il est la base des contrôles optiques non automatiques. Il peut être aidé, par un éclairage classique. Il reste cependant sujet aux inconvénients liés à l'œil humain, c'est-à-dire une faible productivité et une certaine subjectivité, entraînant un manque de fiabilité.

2.3.1.2. Inspection automatique

Elle est réalisée en général à partir des acquisitions d'images par balayage laser ou par utilisation de barrettes de capteurs optiques, suivies de traitement d'image tel que la reconnaissance de formes. Ce type de contrôle, beaucoup plus efficace, est cependant plus complexe à mettre en œuvre et par conséquent restreint à des applications très particulières.

Avantages

- Examen simple, rapide et pas coûteux ;
- Souplesse d'inspection.

Inconvénients

- Détection limitée aux défauts superficiels ;
- La surface doit être propre ;
- Automatisation difficile et influence de l'opérateur.

2.3.2. Ressuage

Le ressuage est une technique destinée à révéler la présence de fissures en surface de pièces planes ou quasi-planes, elle consiste à appliquer sur la surface à contrôler préalablement nettoyée et séchée, un liquide d'imprégnation coloré ou fluorescent, qui pénètre dans les fissures. Le nettoyage de la cible est nécessaire pour éliminer l'excès du liquide présent à la surface de la pièce.

Un révélateur qui peut être liquide ou sous forme de poudre est ensuite appliqué qui, réagissant avec le pénétrant resté dans les fissures forme des images révélatrices des défauts et interprétables par le contrôleur.

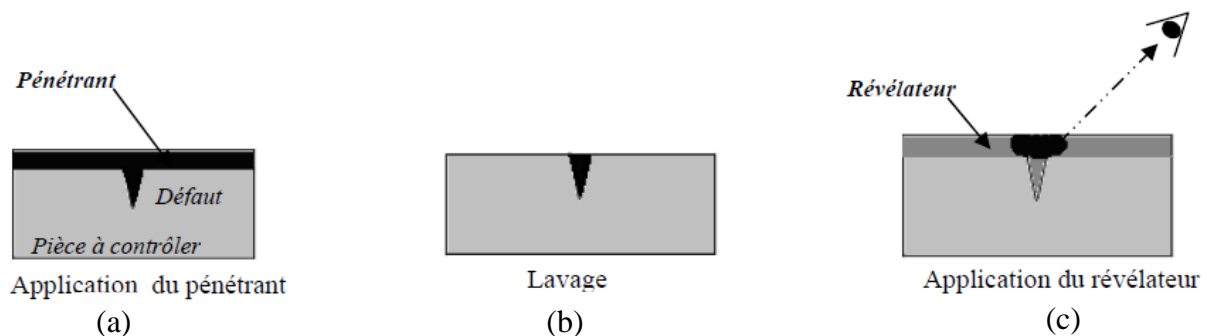


Figure II.2 Examen par ressuage [17]

Domaines d'application

- Procédé adapté à la détection des défauts de compacité débouchant en surface dans le cas de matériaux non poreux.
- Après fabrication, détection principalement des retassures, des porosités et des fissures.
- En service, détection des fissures de fatigue.

Avantages

- Facilité de mise en œuvre ;
- Appliqué sur les matériaux diélectriques et non ferromagnétique.

Inconvénients

- Limite de l'application sur les matériaux non poreux ;
- L'interprétation des résultats est subjective : Il est impossible de déterminer les dimensions exactes des défauts.

2.3.3. Magnétoscopie

Le contrôle par magnétoscopie fait appel aux propriétés magnétiques du matériau inspecté. L'effet de dispersion du flux de fuite peut être mis en évidence en aspergeant la surface contrôlée d'une liqueur magnétique constituée de très fines particules ferromagnétiques et d'un liquide porteur (poudre de fer ou de magnétite colorée). Les particules noires ou fluorescentes viennent s'agglomérer sur le champ de fuite, à l'endroit du défaut, le rendant ainsi parfaitement visible, comme l'illustre la figure.

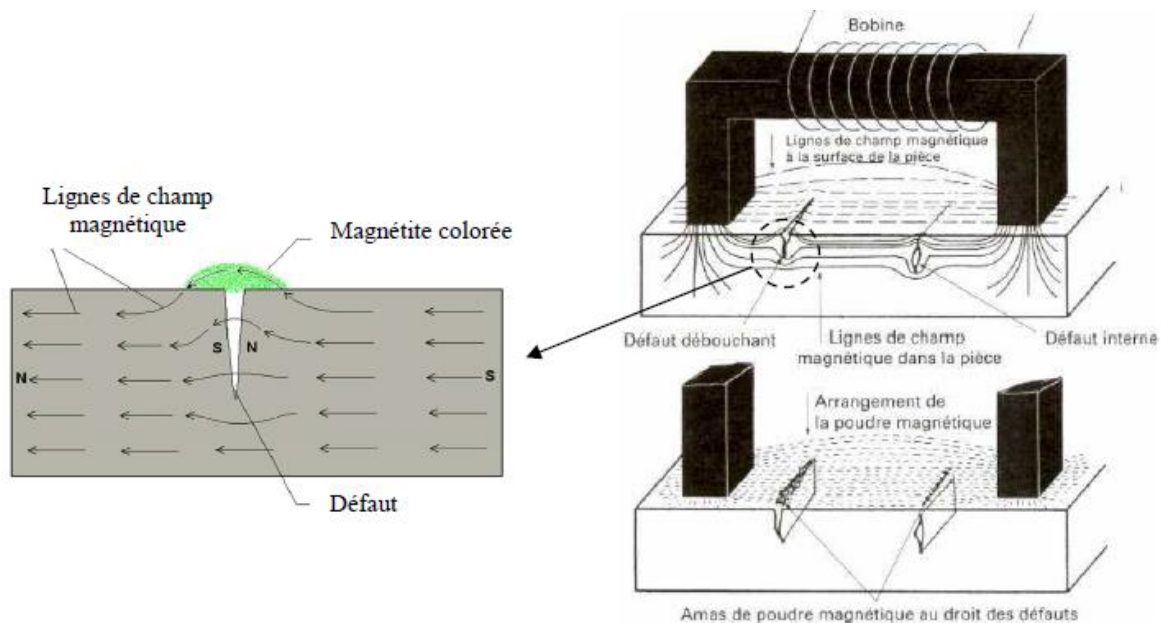


Figure II.3 Inspection par magnétoscopie. [17]

Domaines d'application

- Procédé adapté à la détection des défauts de compacité débouchant en surface ou proche de la surface, sur des matériaux ferromagnétiques (aciers au carbone, fontes, nickel).
- En service, détection de fissures de fatigue et de corrosion sous tension.

Avantages

- Simple, peu coûteux et rapide ;
- Détection des défauts débouchant et sous-jacents.

Inconvénients

- Applicable seulement aux matériaux ferromagnétiques ;
- Aimantation dépend de la perméabilité de la pièce examinée ;

- La sensibilité de détection des défauts dépend en effet de la nature, de la direction et de l'intensité de la magnétisation de la pièce.

2.3.4. Courants de Foucault

Son principe consiste à soumettre la pièce à inspecter à l'action d'un champ magnétique variable dans le temps, à l'aide d'une bobine parcourue par un courant électrique. Ce faisant, on induit des courants de Foucault dans le matériau à contrôler. La trajectoire des courants induits est perturbée par des variations locales, soit de la géométrie, soit des caractéristiques électromagnétiques du matériau. La perturbation locale des lignes de courant conduit à une modification du champ induit, lequel s'oppose à chaque instant au champ d'excitation. Par conséquent, le courant traversant la bobine d'excitation varie. Autrement dit, l'impédance de la bobine est modifiée.

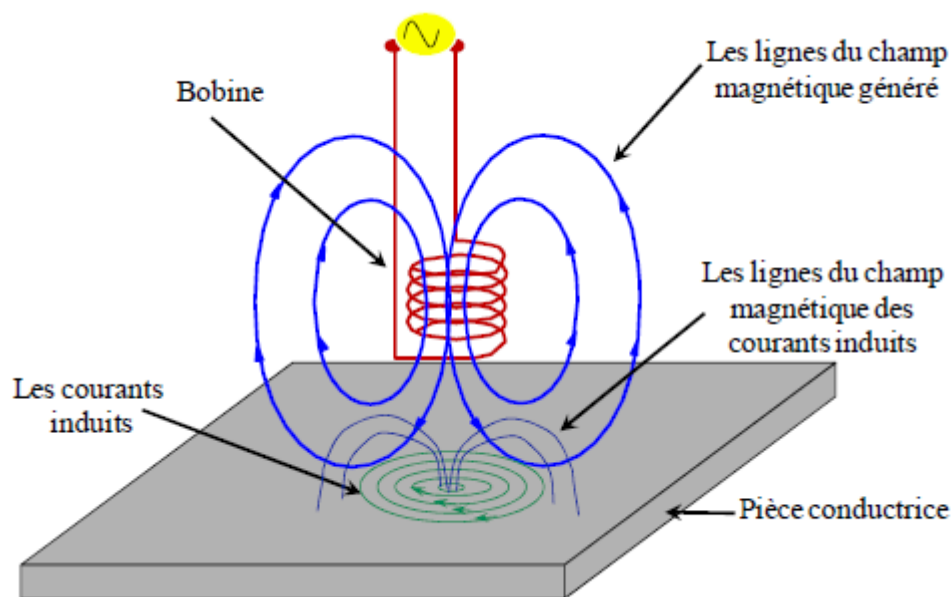


Figure II.4 Inspection par Courants de Foucault. [18][19]

Pour réaliser le contrôle complet d'une pièce, il faut déplacer la bobine à la surface de celle-ci et détecter les variations d'impédance, qui traduisent la présence d'une anomalie à l'intérieur de la pièce.

La sensibilité de la méthode dépend des paramètres suivants :

- Conductivité électrique du matériau inspecté ;
- Perméabilité magnétique de la pièce ;
- Caractéristiques géométriques du capteur ;
- Position de la pièce inspectée par rapport au capteur.

Avantages

- Simple, peu coûteux et rapide ;
- Grande sensibilité de détection des défauts (dimensionnelles, structurales...)
- Evaluer le dimensionnement et la profondeur d'un défaut ;

- Pas des conditions de sécurité ni pour l'opérateur ni pour l'environnement ;
- Inspection sans contact.
- Automatisation possible pour des pièces de géométrie constante (tubes, barres et câbles).

Inconvénients

- La profondeur d'inspection dépend de la fréquence d'excitation ;
- La détection du défaut se fait d'une manière locale ;
- Inspection limitée aux matériaux électriquement conducteurs ;
- La position du capteur par rapport au spécimen peut influencer l'efficacité de détection des défauts ;
- La compétence et la formation sont exigées pour le personnel d'inspection.

2.3.5 Radiographie

La radiographie est une méthode de CND couramment employée pour contrôler l'intégrité de nombreux matériaux ou sonder le cœur d'une pièce. Le principe de cette technique est basé sur la formation d'une image qui traduit l'absorption subie par un rayonnement ionisant ayant traversé l'objet à contrôler. Le rayonnement transmis à travers la pièce vient ainsi impressionner un film qui fournit, après développement, une « image » de la zone traversée.

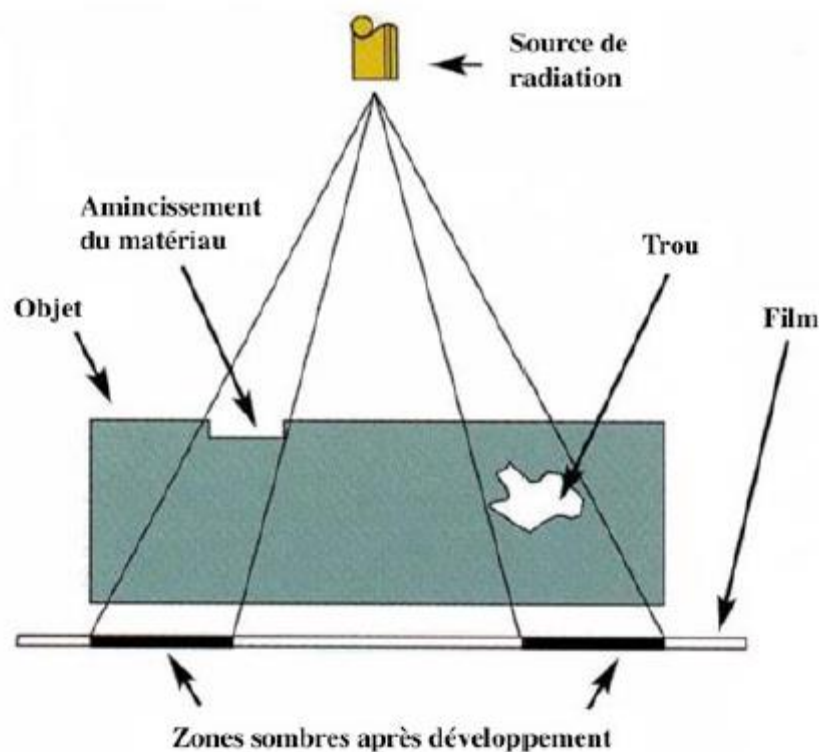


Figure II.5 Schéma du principe de la technique CND par radiographie [19]

Cette méthode de CND permet de déceler essentiellement des défauts internes mais peut être utilisée pour inspecter des surfaces. La mise en évidence de ces défauts est assurée par une variation de densité optique sur le radiogramme suite aux différences d'absorption des rayons entre une zone saine et une zone défectueuse.

Domaines d'application

- Procédé adapté à la recherche de défauts volumique ou de défauts plans parallèles au rayonnement
- En service, détection de la corrosion.

Avantages

- Possibilité de radiographier des formes complexes et des épaisseurs d'acier variant de quelques micromètres à 600 mm ;
- Apprécier la nature et la taille des défauts.
- Dimensionnement et identification possible des défauts.

Inconvénients

- L'interprétation des images demande un niveau d'expertise de l'opérateur ;
- Difficulté de localiser les défauts en profondeur ;
- Cette technique est extrêmement coûteuse et impose des conditions de sécurité ;
- Mesures de protection doivent être constamment prise.

2.3.6 Ultrasons

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques prenant naissance et se propageant dans tout support matériel présentant une certaine élasticité. Les ultrasons correspondent à des fréquences oscillatoires supérieures à la limite d'audibilité humaine et s'étendant dans une large gamme allant de 15kHz à plus de 100MHz. L'ultrason est basé sur la transmission, la réflexion, et l'absorption d'une onde ultrasonore, qui se propage dans la pièce à contrôler. Le train d'onde émis se réfléchit dans le fond de la pièce et sur les défauts puis revient vers le transducteur qui joue souvent le rôle d'un émetteur/récepteur. L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut.

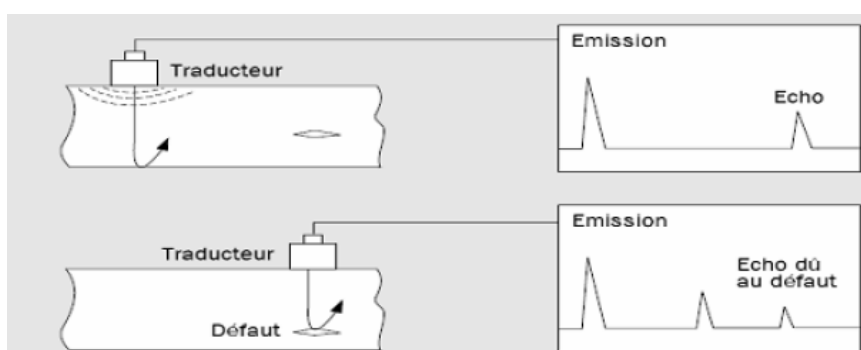


Figure II.6 Principe du contrôle par ultrasons [18]

Avantages

- Capable de détecter un défaut interne ;
- Applicable pour la mesure de l'épaisseur, la détection de la discontinuité et la détermination des propriétés des matériaux ;

- Peut fournir la taille de la discontinuité détectée ;
- Très sensible à la discontinuité de type planaire ;
- Adapté à l'automatisation ;
- La plupart des équipements sont portables et adaptés à l'inspection sur le terrain ;
- Applicable aux matériaux épais.

Inconvénients

- Incapable de détecter un défaut dont le plan est parallèle à la direction du faisceau sonore
- Exige l'utilisation d'un coupleur pour améliorer la transmission du son
- Nécessite un opérateur très compétent et expérimenté
- Pas aussi fiable pour la discontinuité de surface et de subsurface en raison de l'interférence entre les l'impulsion et le signal en raison de la discontinuité.

2.3.7. Thermographie infrarouge

Cette technique consiste à chauffer la surface du matériau inspecté par apport d'énergie (mécanique, air chaud, lampes flash) et à mesurer l'élévation de température résultante avec une caméra infrarouge. L'inspection en thermographie infrarouge peut se faire selon deux approches : *la thermographie active et passive*. Dans les deux cas, l'investigation consiste à détecter la présence d'un gradient de température qui révèle la présence d'un défaut, qui peut être provoqué soit par une hausse ou une baisse de température.

En thermographie active, le processus de détection nécessite l'apport d'une stimulation thermique extérieure afin de provoquer l'apparition d'un gradient. Par opposition, la thermographie passive n'utilise pas de stimulation extérieure, l'objet ou le défaut à détecter générant un gradient thermique naturellement.

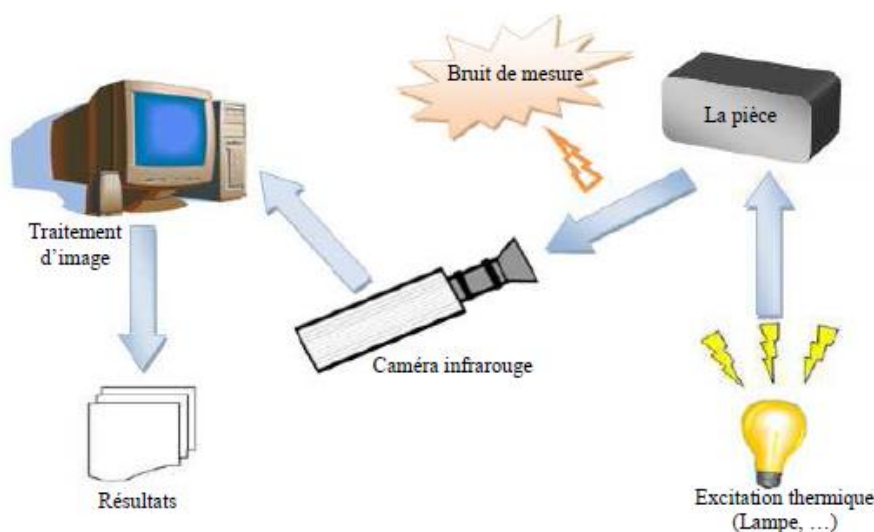


Figure II.7 : Inspection par thermographie

Avantages

- Méthode relativement rapide et sans contact ;
- Les cavités (champs de bulles d'air, fissures, délaminages, ...) sont bien détectées ;
- La sensibilité à la détection des défauts de faibles dimensions ;
- Applicable à toutes les situations tant qu'il existe des différences de température à la surface du matériau.

Inconvénients

- Impossible de déterminer la profondeur d'un défaut dans les matériaux
- Les équipements sont coûteux
- Nécessite un opérateur très compétent et expérimenté.

2.4. Autres méthodes de contrôle non destructif

Emission acoustique

L'émission acoustique permet la détection de la création ou de l'évolution de défauts. Cette technique repose sur l'utilisation d'un ou plusieurs capteurs pouvant être installés de façon permanente à l'écoute d'événements pouvant se dérouler.

Les émissions acoustiques proviennent de l'intérieur de l'échantillon d'essai lorsqu'il est soumis à une charge extérieure. Elles sont causées par des perturbations locales telles que la microfissuration, mouvement de dislocation, frottement irrégulier, etc.

En CND, l'émission acoustique est normalement appliquée pour la surveillance de fissures soumises de façon répétée à des charges externes. La croissance des fissures sera accompagnée d'une émission de sons à haute fréquence dans différentes directions. En plaçant plusieurs capteurs autour de la fissure, en surveillant l'heure d'arrivée de ce signal, en observant la fréquence de l'émission et l'amplitude de l'événement, la nature de la microfissure dans le matériau peut être quantifiée.

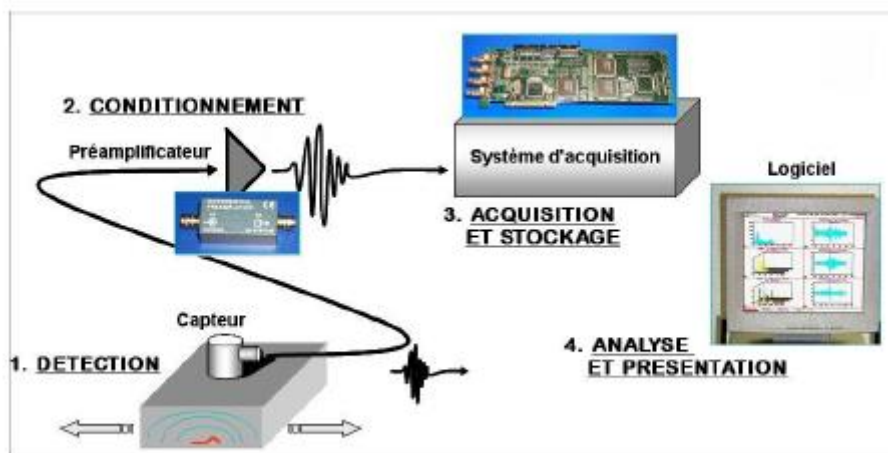


Figure II.8 Equipements pour le contrôle par émission acoustique [20]

Les sources d'émissions acoustiques sont déterminées en calculant la différence de temps nécessaire à l'onde pour arriver aux différents capteurs. La vitesse des ondes dans l'échantillon est déterminée par la méthode de la vitesse d'impulsion. L'avantage le plus notable de cette technique est qu'elle fournit des informations quantitatives sur le comportement des fissures et la vitesse de propagation. Cependant, une telle technique est considérée comme une méthode très sophistiquée qui nécessite un personnel hautement qualifié.

Contrôle d'étanchéité

La méthode d'essai d'étanchéité concerne principalement certains composants techniques ayant pour contenir un gaz dangereux ou mortel, mais son utilisation est délicate. Les fuites dans les composants techniques peuvent conduire à une conséquence désastreuse. S'il s'agit d'un gaz toxique, il peut nuire aux travailleurs de l'usine. S'il s'agit d'un gaz hautement inflammable, il peut provoquer un incendie. Les tests d'étanchéité constituent donc l'une des activités les plus importantes dans l'évaluation de la durée de vie d'une usine. Il existe de nombreuses techniques utilisées pour les tests d'étanchéité. On a trouvé des techniques qui impliquent l'injection d'un traceur radioactif dans le système et sa surveillance à l'aide d'un détecteur très sensible pour la détection des fuites dans les échangeurs de chaleur et la tuyauterie. Autres techniques de détection des fuites comprennent l'épreuve de pression et l'épreuve d'hélium.

2.5. Certification du personnel en CND

Le PCN (Personnel Certification in Non-Destructive Testing) est un système reconnu au niveau international pour la certification des compétences du personnel CND. Il est accrédité comme répondant aux exigences des normes européennes EN 45013, EN 473 et de la norme internationale ISO 9712. L'admission aux examens PCN exige une formation et une expérience conformes aux directives publiées.

Le système de certification du personnel offre trois niveaux de certification spécifiques aux secteurs industriels et aux méthodes CND :

Niveau 1 Une personne certifiée au niveau 1 :

- est qualifié pour effectuer des opérations de CND selon une instruction écrite et sous la supervision du personnel de niveau 2 ou 3.
- a démontré sa compétence pour installer l'équipement, effectuer l'essai, enregistrer et classer les résultats en fonction de critères écrits, et faire rapport sur les résultats.

Niveau 2 Une personne certifiée au niveau 2 :

- prépare des instructions écrites.
- est qualifié pour effectuer et diriger des CND conformément aux procédures établies

- a fait preuve de compétence dans le choix de la méthode et de la technique de test à utiliser, ainsi que dans l'évaluation, la caractérisation et l'interprétation des résultats des tests.

Niveau 3 Une personne certifiée au niveau 3 :

- est qualifié pour diriger toute opération pour laquelle il est certifié.
- a démontré une compétence pour interpréter et évaluer les résultats des tests conformément aux normes, codes et spécifications applicables
- possède le niveau de connaissances requis pour permettre la sélection de méthodes et de techniques et pour aider à l'établissement de critères d'essai lorsque ceux-ci ne sont pas disponibles
- a également la capacité de guider le personnel en dessous du niveau 3
- peut établir et valider des instructions et des procédures en matière de CND.

2.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé la définition et le but du contrôle non destructif (CND), les différents types de défauts détectés en CND, le principe de détection d'un éventuel défaut et les bases physiques qui gouvernent les procédés de contrôle.

En effet, les méthodes de CND ont été développées pour répondre aux différentes problématiques rencontrées. Le choix d'une technique dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux inspectés, des phénomènes utilisés et de la nature de la réponse recherchée.

Chapitre 3

III. Chapitre 3 : Traitement et préparation de surface

3.1. Introduction

Compte tenu des contraintes technico-économiques, et peut-être même d'une volonté esthétique particulière, il est plus souvent d'opérer au niveau de la surface des pièces plutôt qu'en profondeur, cela apporte au produit final les caractéristiques souhaitées à moindre effort.

Au de-là du XVIème Siècle la finition des pièces fabriquées était négligé, car leur fonctionnalité n'était pas prise en compte, d'où l'apparition du traitement de surface pour but d'améliorer et d'augmenter les propriétés et caractéristiques des matériaux.

Le traitement de surface, quel que soit son type chimique, thermique et mécanique transforme et modifie la surface, pour lui donner un nouvel aspect et de nouvelles propriétés telle que la résistance à la corrosion, l'usure, la fatigue et pour préserver leur durée de vie.

3.2. Préparation et conditionnement de surface

C'est la partie la plus importante avant tout traitement de surface, des préparations de l'état surface doivent être faites et selon des techniques bien prises. Les principales opérations de préparation de surface peuvent être classées en deux catégories : les techniques mécaniques et les techniques chimiques. Toutes ces opérations sont suivies par le lavage, le rinçage et le séchage.

3.2.1. Les techniques mécaniques

3.2.1.1. Grenaillage

Le grenaillage est un procédé efficace pour éliminer les contaminants de surface ou nettoyer et poncer une surface lisse avant d'y appliquer un revêtement. La rouille et la peau laminage sont deux contaminants de surface qui doivent être enlevés lors du processus de grenaillage afin d'assurer ensuite une bonne adhésion du revêtement. L'opération s'effectue en cabine entièrement fermée soit manuellement ou automatiquement.[34]

Abrasif utilisé

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

L'avantage : l'effritement est moindre que pour le corindon et moins de poussière.

Les inconvénients : l'abrasif rouille et pollue les pièces. Il est interdit pour l'inox. Les particules coincées dans les pièces peuvent générer des coulures de rouille.

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

Les avantages : cet abrasif noble permet le traitement des pièces réservées au corindon (inox, galva, alu), très peu de consommation et peu de poussières.

Les inconvénients ; son prix 5 fois plus cher que le sable d'acier, et même reproche concernant les coincements mécaniques.

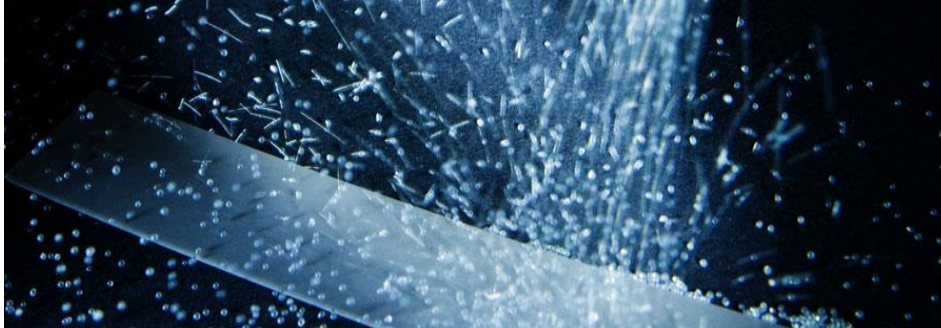


Figure III.1 Traitement de surface par grenailage [34]

3.2.1.2. Sablage

Il s'agit d'un traitement de surface par impact. Cette technique industrielle consiste à projeter à grande vitesse un abrasif sur un matériau en utilisant notamment un pistolet et des buses. L'équipement nécessaire utilise l'air comprimé : les sableuses et les cabines de sablage se connectent donc à des compresseurs. [35]

Choix de l'abrasif

En raison de sa contenance en silice hautement cancérigène, le sable n'est pas la matière projetée lors de l'opération de sablage. De nombreux abrasifs peuvent être utilisés : corindon blanc, corindon mixte.... Le choix de l'abrasif dépend de l'application à réaliser.

- Le plus ancien : le sable de Fontainebleau interdit et abandonné depuis 40 à 50 ans à cause du risque sanitaire important de "silicose"
- Le Rugos, "Silicate d'alumine noir" utilisé pour les chantiers en abrasif perdu ou pour des opérations de sablage ponctuelle. Il a une bonne dureté mais usure rapide.
- Le Corindon : alumine de dureté KNOFF 1600 à 1800. C'est le remplaçant du sable. Il a une bonne résistance à l'effritement.

L'avantage, l'abrasif est utilisable en toutes occasions (verre, aluminium, bois, pierre..) mais l'inconvénient est que son usure génère une poussière importante et des déchets dont l'élimination est difficile.



Figure III.2 Abrasifs de sablage [35]

Les applications possibles

Enlever la couche superficielle d'une pièce (ex : peinture...), provoquer la déformation de sa surface ou encore engendrer des aspérités pour améliorer l'adhérence d'une couche superficielle. Selon le type d'abrasif choisi, le sablage permet de nombreuses applications :

Applications	Résultats / Avantages
Ebarber	Parfait pour éliminer des bavures de vos pièces usinées Pratique pour atteindre des parties peu accessibles avec un ébarbage manuel ou à la machine
Décaper	Précision et rapidité, le décapage des revêtements (peintures, vernis...) est possible. Améliore l'état de surface de la pièce traitée. Application d'un nouveau revêtement possible.
Nettoyer	Pas de changement dimensionnel. Substrat non dégradé.
Ebavurer	Elimination des bavures Substrat non détérioré
Détartre	Supprime le tartre formé sur les pièces occasionnées par divers facteurs (corrosion, rouille, chaleur...) Sans danger, à l'inverse du détartrage chimique. La pièce retrouve un état de surface parfait : la peinture, le revêtement, le plaquage, ..., sont praticables sans difficulté.

3.2.1.3. Microbillage

Le microbillage est une technique de décapage mécanique très répandue pour le traitement de l'aluminium et de l'acier inoxydable. En plus de décaper, le microbillage présente un réel intérêt esthétique et permet de modifier légèrement les propriétés de surface des éléments traités.

Le principe est toujours le même : des particules abrasives sont projetées sous air comprimé. Le frottement créé à la surface de la pièce traitée vient retirer tous les résidus issus du processus industriel, tels que les traces de colles, de vernis, d'huiles ou de rouille.

Le microbillage s'effectue par la projection de microbilles de verre ou de céramique sous une pression relativement faible, entre 1,5 et 6 bars. Les billes font le plus souvent entre 100 et 200 microns d'épaisseur.



Figure III.3 Décapage à l'abrasif bille de verre [36]

Avantages

L'abrasion par microbilles est une solution de finition et de dépollution idéale pour les pièces de tôlerie en aluminium ou en acier inoxydable. A la fois efficace et peu agressif, le microbillage apporte une solution à des problématiques tant techniques que pratiques ou esthétiques.

- **Décaper sans abîmer**

Le microbillage utilise une pression d'air faible et des produits abrasifs relativement doux. Il se prête donc très bien au décapage des surfaces fragiles, mais aussi des objets imposants des contraintes très strictes en matière d'épaisseur, de dimensions ou de rendu de surface. Par ce procédé, on peut retirer toutes les impuretés résultant du processus de fabrication et d'assemblage sans endommager le produit final ni modifier ses propriétés physiques et mécaniques.

Des atouts esthétiques indéniables

Une des principales utilités du microbillage est d'uniformiser l'aspect extérieur des éléments décapés. Ce traitement de surface offre un rendu satiné agréable à l'œil et au toucher. Il est possible de réaliser une surface plus ou moins mate en fonction du type de microbilles utilisées.

Améliorer les propriétés de surface

Un traitement par microbillage permet également de modifier les propriétés de la surface du matériau. La texture donnée aux pièces décapées peut ainsi avoir des propriétés antidérapantes, ou encore améliorer l'accroche de futures peintures.

3.2.1.4. Polissage

Le polissage mécanique est un procédé permettant de retirer, par abrasion, les défauts, rayures ou aspérités de la pièce. Poussé à son plus haut niveau de finition, nous obtenons des états de surface de grande qualité, caractérisés par l'indice de rugosité, l'homogénéité de la brillance et l'éclat. [37]



Figure III.4 Polissage du cristal [37]

En polissage mécanique, nous pouvons obtenir différents niveaux de finitions :

- Le Brossage : Finition permettant d'obtenir des surfaces esthétiques en créant des rayures toujours dans le même sens.
- Le Poli Satiné : Finition permettant de respecter les contraintes mécaniques et d'obtenir de faibles indices de rugosité mais sans donner un aspect éclatant à la pièce, sans avivage.
- Le Poli Miroir : Le plus haut niveau de finition réalisé dans notre atelier. Un éclat hors normes, un esthétisme parfait et des propriétés mécaniques accrues du fait de la faible adhérence des produits sur la surface poli miroir.

3.2.1.5. Tribofinition

La tribofinition également nommée trovalisation, vibroabraisson, tonnelage ou microfinition, intègre les techniques de polissage, ébavurage, brillantage, rayonnage, désoxydation...

La vibroabrasion 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.

Le processus de tribofinition est employé aussi bien pour des petites pièces que des très grandes, à géométrie simple ou très complexe.[38]



Figure III.5 Tribofinition [38]

Les ingrédients nécessaires à ces procédés sont :

- Les médias abrasifs ou de polissage (céramique, porcelaine, plastique, métaux).
- Les additifs liquides, pâtes ou poudres.
- Les équipements (vibrateurs, centrifugeuses...) qui génèrent les mouvements entre les médias et les pièces.
- De l'eau de qualité adaptée au process (en général).

Applications

- Ébavurage : élimine les particules et les rognures (appelées bavures) qui apparaissent lorsque le métal est usiné ou travaillé
- Polissage : permet d'obtenir une finition de surface lisse, brillante, réfléchissante
- Lissage : améliore la finition de surface et uniformise tout défaut ou arête vive
- Superfinition : permet d'obtenir une surface lisse de grande qualité
- Nettoyage : élimine les impuretés, les résidus, la graisse ou les saletés des composants
- Finition pré-placage : permet d'obtenir une finition de surface plane et lisse avant de réaliser un revêtement ultérieur ;

Avantages

- Rentabilité avec peu de main d'œuvre
- Une surface plus lisse qui permet à vos composants de fonctionner plus facilement, rapidement et longtemps
- Finition plus fiable, contrôlable et uniforme.

3.2.1.6. L'usinage

La préparation de surface par enlèvement de métal répond à 3 volontés :

- Créer sur la surface un réseau de résistance aux sollicitations mécaniques qui seront exercées sur le dépôt de rechargement.
- Augmenter la rugosité et simultanément la surface d'accrochage.
- Diminuer les dimensions de la pièce (dans le cas de réparation de pièces usées) afin de laisser une épaisseur suffisante pour le futur dépôt, tout en respectant les cotes limite de rupture.

Dans certains cas, on pourra effectuer un sablage fin sur les parties usinées afin d'augmenter la rugosité de la surface. [39]

3.2.2. Les techniques chimiques

3.2.2.1. Le dégraissage

Le dégraissage est une étape préparatoire indispensable à une opération de traitement de surface. Le procédé consiste à enlever les traces de graisse d'un autre élément. Pour éliminer les graisses, il est possible de :

- Les dissoudre en utilisant un solvant
- Les transformer en savons solubles dans l'eau, en utilisant des produits comme de la soude, de la potasse ou des silicates de sodium
- Les décoller et les empêcher de se redéposer, en utilisant des tensioactifs et ainsi former une émulsion [40]

3.2.3. Les techniques thermochimiques

La cémentation

La cémentation est un traitement thermochimique de diffusion ayant pour but l'enrichissement en carbone d'une zone superficielle de la pièce à traiter. On obtient cet enrichissement par mise en contact avec un milieu carburant pulvérulent (en forme de poudre), pâteux, liquide ou gazeux.

L'opération de diffusion est suivie d'une trempe afin d'obtenir de la martensite en surface améliorant ainsi la dureté (700 à 900 HV), mais aussi la tenue en fatigue en raison des contraintes de compression dans la zone traitée.

Techniques de cémentations

Les agents de carburation peuvent être solides, liquide ou gazeux.

- Cémentation solide (cémentation en caisse) : L'agent de saturation dans cette opération est un ciment solide, le plus souvent le charbon de bois. Les pièces sont placées dans des caisses soudées en acier, ou plus rarement, en fonte. La température de cémentation varie de 900 à 940 °C. Après cémentation, les caisses ne sont ouvertes qu'après leur refroidissement à l'air jusqu'à 400 ou 500°C.
- Cémentation liquide (cémentation en bains de sels) : Les pièces sont plongées dans un bain de sel fondu à base de cyanure de baryum et de sodium vers 980°C. Cette technique relativement simple de mise en œuvre permet un chauffage homogène et une action chimique régulière.
- Cémentation gazeuse : C'est est la plus employée. Elle se fait industriellement à partir d'atmosphères obtenues par installation et décomposition à chaud (combustion) d'hydrocarbures, atmosphère qui sont caractérisées par leur potentiel carbone

3.2.3.2. La carbonituration

La carbonituration est un traitement thermo-chimique similaire à celui de la cémentation. Le produit ferreux est porté à l'état austénitique afin de réaliser un enrichissement superficiel en carbone et en azote. Généralement cette opération est suivie immédiatement d'un durcissement par trempe. On opère sur des aciers au carbone ou des aciers de cémentation.

L'azote a deux effets :

- Il accélère l'enrichissement en carbone.
- Il modifie les propriétés de la couche enrichie ; il augmente la stabilité de l'austénite et abaisse la vitesse critique de refroidissement pour la formation de la martensite.

3.3. Types de traitements de surfaces

Selon le type de matériau et les propriétés souhaités, il existe plusieurs types de traitements de surface. On résume dans cet organigramme celles qui sont les plus utilisés.

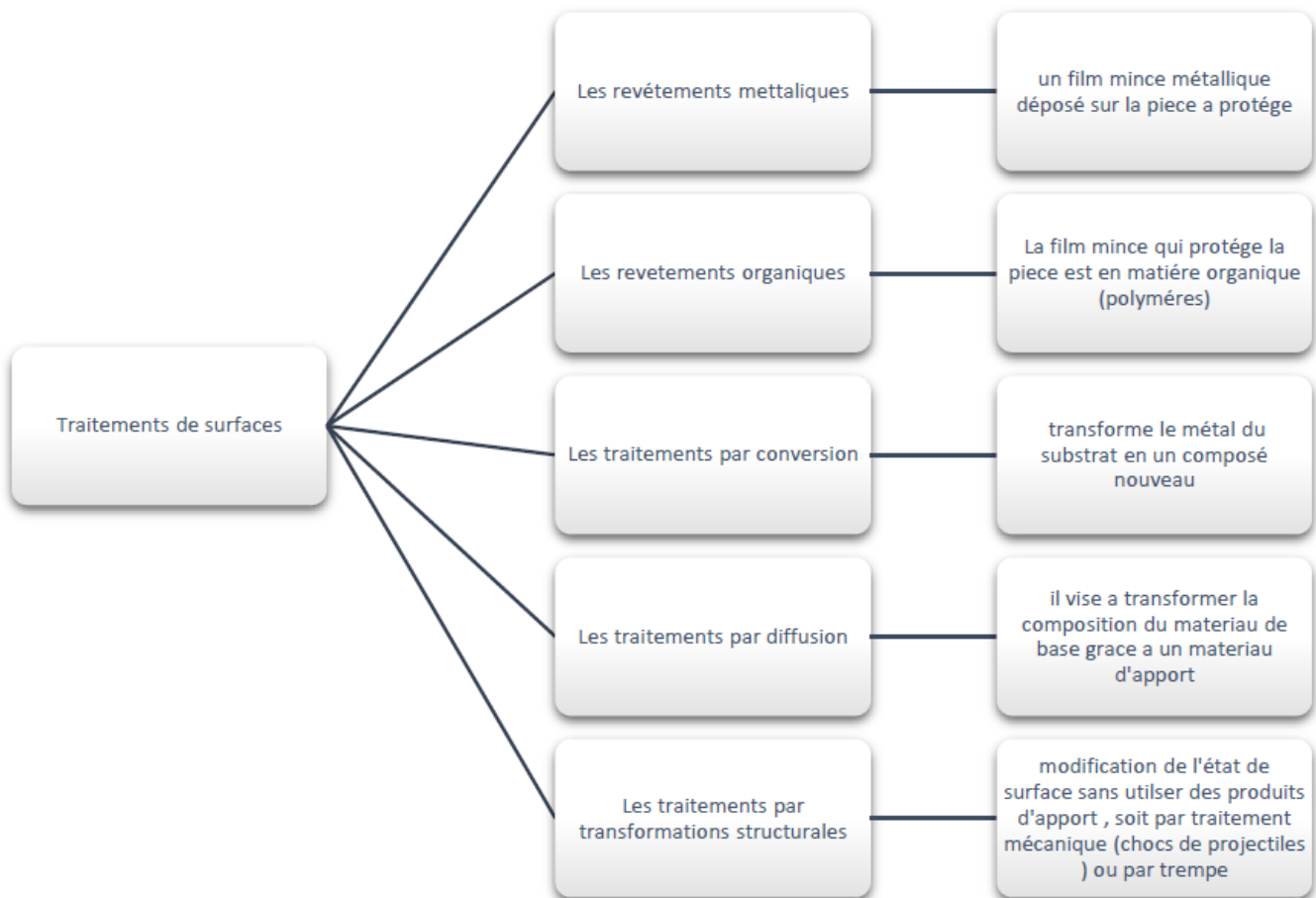


Figure III.6 Organigramme récapitulatif des types de traitements de surface [22,33]

3.4. Revêtements métalliques

Parmi les moyens de protection des métaux contre la corrosion et l'usure, la modification de l'état de surface par élaboration d'un revêtement métallique protecteur a souvent été et reste encore une solution retenue pour de nombreuses applications. Le choix du métal protecteur dépend de ses propriétés physicochimiques et essentiellement de sa tenue à la corrosion. L'adhérence, l'uniformité, l'épaisseur et suivant le cas de la porosité sont les caractéristiques les plus importantes d'un revêtement métallique. [24,25]

3.4.1. Notion de revêtements métalliques :

La notion de traitement de surface par revêtement métallique est une technique de plus en plus utilisée, elle consiste à augmenter les propriétés à la surface d'un métal par dépôt d'un film métallique très mince, cette couche mince constitue une barrière entre les facteurs agressifs extérieurs et le substrat, peut être utilisée afin d'assurer la protection contre la corrosion, d'augmenter la dureté, ou

d'améliorer des propriétés physiques particulières ou, en fin dans un cadre décoratif, elle permet aussi d'éviter l'emploi de matériaux massifs souvent coûteux. [37,38]

Actuellement l'industrie présente différentes techniques et procédés de dépôt de revêtement :

- Dépôt par voie humide
- Dépôt par voie sèche
- Dépôt par voie thermique
- Dépôt par projection thermique

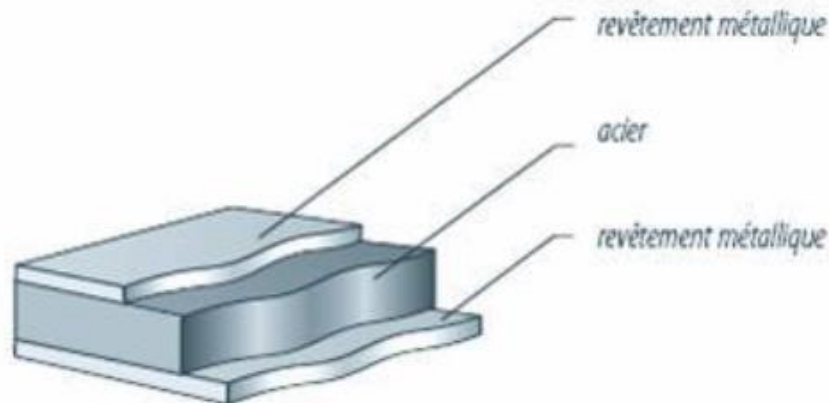


Figure III.7 Représentation en coupe d'acier revêtu

Les méthodes de revêtements adaptées à notre sujet sont celles par voie humide et par projection thermique, en effet la section suivante va aborder uniquement le chromage et quelques types de dépôt par projection thermique.

3.4.2 Le chromage

Le chromage est un procédé de revêtement par électrolyse permettant de déposer du chrome métallique sur les surfaces à traiter pour leur conférer les propriétés de ce métal. Ce traitement bien connu est effectué pour deux applications importantes : le chromage dur et le chromage décoratif, pour lesquelles, la couche déposée ne diffère essentiellement que par son épaisseur. [26]

Matériaux susceptibles d'être chromés

Le procédé de chromage peut être réalisé sur un certain nombre de métaux et leurs alliages, tels que le zinc électrolytique ou galvanisé, l'aluminium, l'argent, le cadmium, le magnésium et le cuivre.

Préparation du métal de base

La surface de la pièce à chromer doit être exempte de graisses pour permettre une bonne adhérence et une homogénéité de la couche de conversion. Pour cette raison, on réalise généralement ce traitement directement après le rinçage de l'étape de zingage, ou après le traitement de dégazage (pour désorber l'hydrogène piégé dans le revêtement ou le substrat lors des précédentes étapes du procédé).

3.4.2.1. Le chromage dur

Le chromage dur se distingue par le fait que son épaisseur est plus importante (de quelques micromètres à quelques dixièmes de millimètres). Ce revêtement procure au matériau sur lequel il est effectué un bon coefficient de frottement et lui assure de bonnes propriétés de résistance à l'usure et à la corrosion. Il est très visible par exemple sur les vérins des appareillages mécaniques (appareils de levage ou engins de travaux publics...). Ce type de traitement est le revêtement privilégié dans le domaine de la mécanique pour les pièces en rotation ou en translation qui ont à résister à l'usure et à avoir de bonnes qualités de frottement, et pour les domaines où l'adhérence pourrait être un handicap (plasturgie, cylindres de laminoir...). [26]

Composition, conditions opératoires et matériels

Dans ce procédé, la pièce à traiter (cathode) est immergée dans une solution électrolytique de Chrome hexavalent en milieu acide. L'anode qui permet la circulation du courant, est généralement en plomb ou en alliage de plomb afin d'améliorer sa résistance à la corrosion et lui permettre d'avoir une tenue mécanique suffisante dans le temps. La bonne répartition spatiale des anodes dans le bain de traitement permet d'obtenir une densité de courant homogène sur l'ensemble de la pièce et ainsi de reproduire des dépôts avec une épaisseur constante.

L'ensemble du matériel utilisé en contact avec l'électrolyte (cuve, agitation, chauffage, refroidissement) doit être très résistant aux acides mais aussi aux espèces oxydantes présentes en solution. De plus, l'ensemble de la cuve doit être parfaitement isolé électriquement afin d'éviter d'éventuelles modifications de la répartition du courant sur les pièces à traiter. [27]

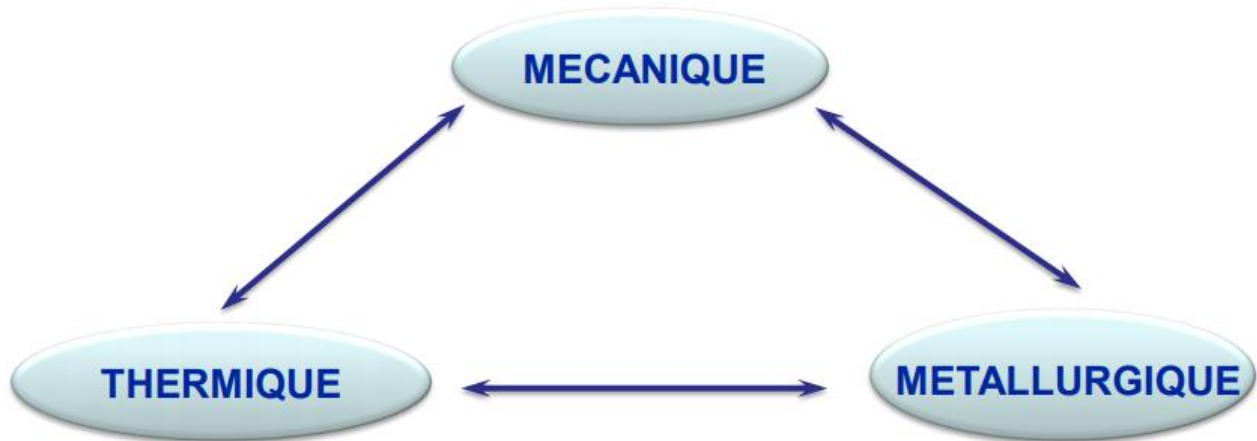
Quelques propriétés physico-chimiques des dépôts

Les propriétés physico-chimiques des dépôts vont essentiellement dépendre des paramètres de chromage, et notamment de la densité de courant, de la température, de la nature de l'électrode et de l'ajout éventuel d'additifs.

- **Contraintes résiduelles**

Les contraintes résiduelles sont des contraintes situées à l'intérieur des matériaux, même sans forces extérieures et avec des températures constantes et uniformes. Ces contraintes comportent des variations dans la stabilité du système en modifiant à la fois dimension, résistance à la fatigue et à la rupture. Les contraintes résiduelles, qui se développent normalement dans le composant pendant les processus de fabrication et d'usinage, peuvent se combiner avec les charges d'exercice, en accélérant la vitesse d'augmentation des défauts et en portant à la rupture prématurée et souvent catastrophique de la partie.

Les causes qui mènent à la manifestation des contraintes résiduelles sont généralement divisées en trois macro-catégories :



Dans tous les cas les contraintes résiduelles peuvent être de traction ou de compression ; celles de compression sont en certains cas bénéfiques et sont ajoutées intentionnellement dans les composants mécaniques avant d'appliquer les charges d'exercice. Le cas le plus commun est le traitement de grenailage de précontrainte. [41]

Dans la pratique, les évènements les plus communs qui comportent des contraintes résiduelles sont :

- Opérations d'usinage
- Opérations de soudage
- Traitements mécaniques de surface : Grenailage, galetage, martelage
- Dépôts et revêtements : Nickelage, chromage, ...
- Traitements thermochimiques : Nitruration, carbonitruration, cémentation
- Nettoyage par grenailage (« sablage »)

Types de contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles peuvent être classées en fonction de l'échelle de grandeur auxquelles elles sont significatives et selon les techniques de mesure utilisées pour les étudier. Un système de standardisation a donc été établi pour diviser les contraintes résiduelles en trois types appelés contraintes résiduelles de types I, II et III.

Les contraintes résiduelles de Type I, également appelées macros contraintes résiduelles, sont distribuées de façon continue sur une largeur de plusieurs grains et représentent le niveau moyen de contrainte. Un changement dans l'équilibre de ce type de contraintes va toujours engendrer une variation macroscopique des dimensions.

Les contraintes résiduelles de Type II, aussi appelées micros contraintes résiduelles, sont uniformes pour une variation inférieure ou égale à la grosseur du grain du matériau. Il y a une présence

significative des contraintes de type II lorsque la microstructure du matériau contient plusieurs phases ou lorsque des transformations de phases se produisent. Un changement dans l'équilibre de ce type de contraintes peut également engendrer un changement de dimensions (macroscopique) et ce, à cause de l'addition des déformations microscopiques.

Les contraintes résiduelles de Type III sont à l'échelle sous microscopique ou atomique. Les dislocations, les vides ainsi que les atomes impurs sont à l'origine de ce type de contraintes. Un changement dans l'équilibre de ce type n'engendre pas un changement macroscopique de dimensions. [28]

- **Fissures**

Les dépôts de chrome sont généralement fissurés diminuant la tenue mécanique (résistance à la traction, limite de fatigue). Cependant en milieu lubrifié, la résistance à l'usure est améliorée ; les fissures servent de réserve de lubrifiant. Néanmoins, dans le cas où les fissures sont traversantes, la résistance à la corrosion est fortement diminuée.

Au cours du dépôt, des bulles d'hydrogène se forment à la surface de la cathode. Lorsque le dépôt atteint 1 à 3 μm , un dégagement d'hydrogène est observé simultanément avec l'apparition de la fissuration. La forte densité de courant au niveau des arrêtes engendre une croissance préférentielle qui referme ainsi les fissures. Le chrome continue à se déposer jusqu'à ce qu'une nouvelle série de fissuration apparaisse. [27]

Il existe deux types de fissuration : *la fissuration intrinsèque à la déposition du chrome* causée par des contraintes résiduelles emmagasinées dans le dépôt et dont l'origine est encore sujette à controverse et *la fissuration provoquée par des défauts du substrat*. [29]

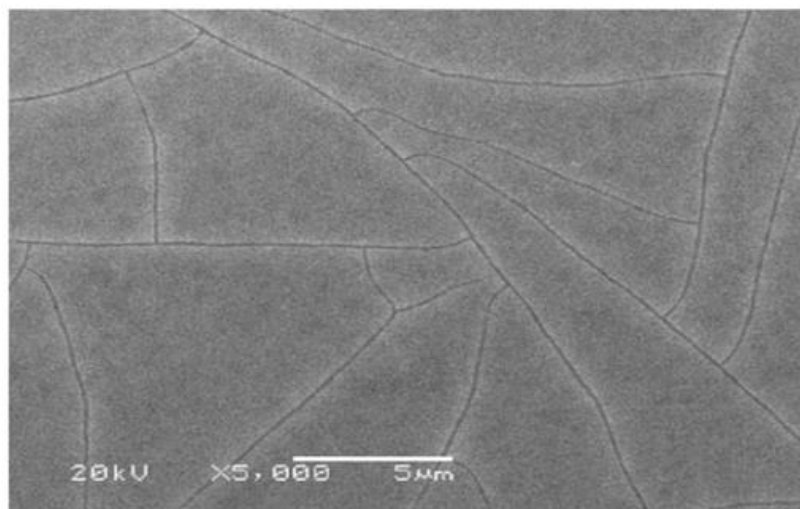


Figure III.8 Observation en surface d'une couche de chromatisation jaune après séchage.

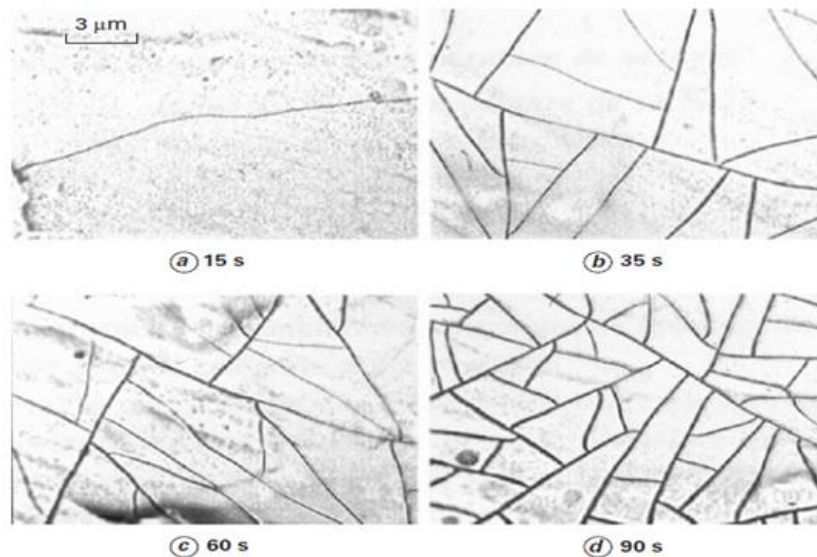


Figure III.9 Evolution des fissures d'une couche de chromatation noire sur zinc-fer en fonction du temps d'immersion

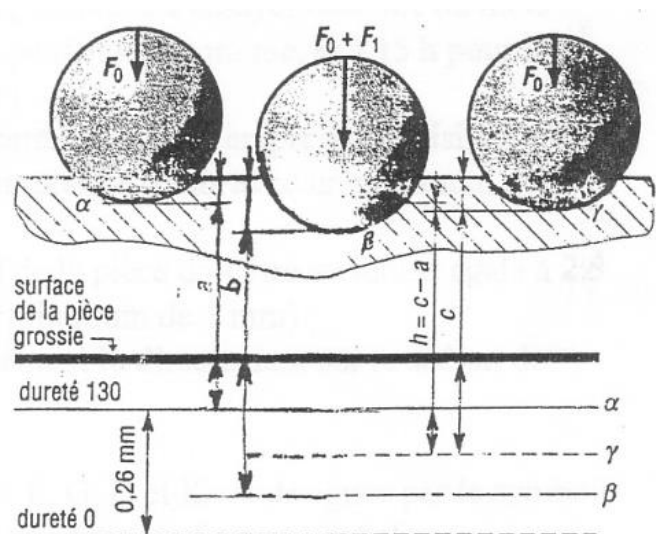
- **Dureté**

La dureté d'un matériau définit la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un poinçon, par exemple une bille en acier trempé (dureté Brinell) ou une pyramide en diamant (dureté Vickers). S'il y résiste bien, il est dit dur, sinon il est dit mou. La dureté se mesure sur différentes échelles selon le type de matériau considéré.

À la différence des minéraux dont la dureté est caractérisée par rayage (échelle de Mohs), on utilise généralement des essais de rebondissement ou de pénétration pour caractériser la dureté des métaux, des matières plastiques et des élastomères. Ces essais ont l'avantage d'être plus simples à réaliser et de donner des résultats reproductibles. [42]

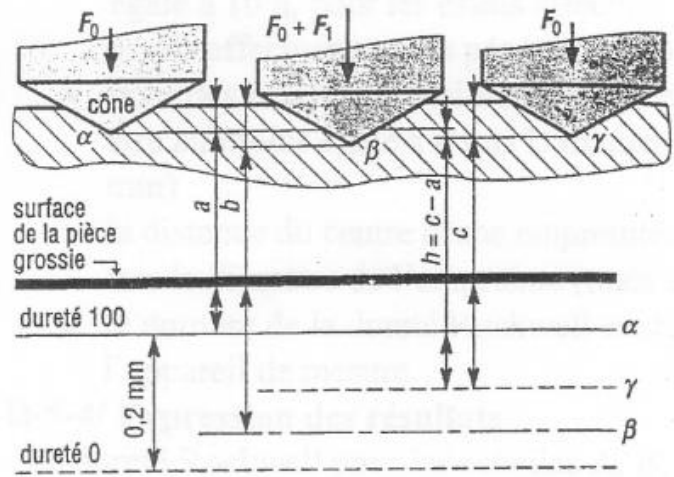
Essai Brinell

Il consiste à imprimer dans la pièce à essayer une bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre D sous une charge F , et à mesurer le diamètre d de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge.



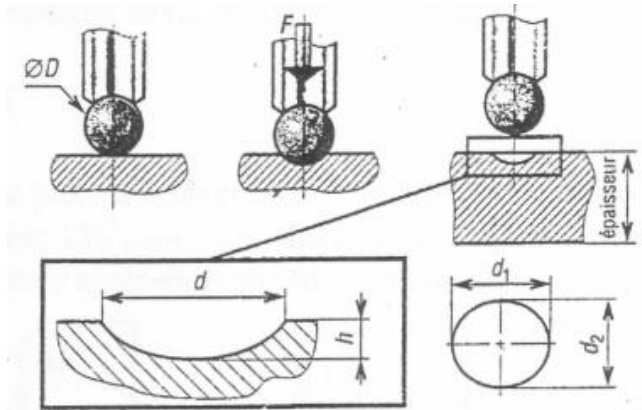
Essai Vickers

Il consiste à imprimer dans la pièce à essayer un pénétrateur en forme de pyramide droite, à base carrée, d'angle au sommet 136° , sous une charge F , et à mesurer la diagonale « d » de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge.



Essai Rockwell

Il consiste à imprimer, en deux temps, dans la couche superficielle de la pièce à essayer, un pénétrateur normalisé (cône ou bille) et à mesurer l'accroissement rémanent « h » de la profondeur de pénétration.



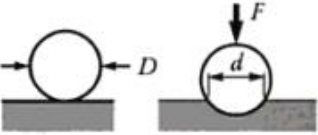

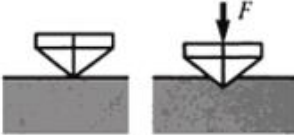


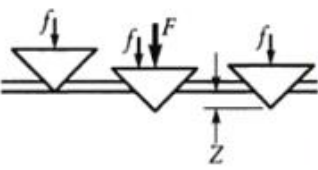
Méthode d'essai	Géométrie du pénétrateur	Charge F	Principe de l'essai	Paramètre mesuré	Dureté
Brinell	Bille d'acier dur ou de carbure (10 mm de diam.)	500 ou 3000 kgf		Diamètre de l'empreinte (d)	$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pyramide de diamant à base carrée; angle entre les faces opposées: 136° 	5 à 100 kgf (microdureté: 5 à 1000 gf)		Diagonale de l'empreinte (d) 	$HV = \frac{1,854 F}{d^2}$
Rockwell C	Cône de diamant d'angle au sommet de 120° 	Précharge f de 10 kgf; $F = 150$ kgf		Profondeur de l'empreinte (Z)	$HRC = f(Z)$
Rockwell B	Bille d'acier dur (1,59 mm de diam.)	Précharge f de 10 kgf; $F = 100$ kgf	Même principe que Rockwell C	Profondeur de l'empreinte (Z)	$HRB = f(Z)$

Figure III.10 Tableau résumant les différentes méthodes d'essai [42]

Comparaison entre les méthodes par pénétration

Type d'essai	Préparation de la pièce	Utilisation principale	Commentaire
Brinell	La surface de la pièce ne nécessite pas une préparation extrêmement soignée (tournage ou meulage)	En atelier	La méthode ayant la mise en œuvre la plus facile des trois méthodes.
Rockwell	Bonne préparation de surface (au papier de verre OO par exemple). La présence de rayures donne des valeurs sous estimées.	En atelier	L'essai est simple et rapide et convient bien pour des duretés plus élevées (>400 Brinell). Elle est plutôt utilisée pour les petites pièces. La dureté Rockwell présente l'inconvénient d'avoir une dispersion relativement importante.

Vickers	État de surface très soigné (on obtient de petites empreintes, la présence d'irrégularité gêne la lecture).	En laboratoire	C'est un essai assez polyvalent qui convient aux matériaux tendres ou très durs. Il est utilisé généralement pour des pièces de petites dimensions. La lecture des longueurs de diagonale est généralement lente.
----------------	---	----------------	--

Tableau III.1 Tableau résumant les différents types d'essai

La dureté est l'une des caractéristiques d'intérêt des dépôts de chrome. Cette propriété lui a valu le nom de « chromage dur », et est étroitement liée à la température de l'électrolyte. En effet, Cymboliste montre déjà en 1937 qu'en augmentant la température de 37°C à 50°C du bain de chromage, la dureté augmente de 650 HV à 950 HV pour une densité de courant de 40A/dm². De même que pour la température de l'électrolyte, la densité de courant a une influence très importante. Par exemple, à 37°C, la dureté progresse de 650 HV à 1000HV en abaissant la densité de courant de 40 A/dm² à 15 A/dm². Par ailleurs, la dureté diminue en augmentant la densité de courant. [27]

Quels que soient les paramètres de chromage, l'évolution de la dureté vis-à-vis du traitement thermique est similaire. Entre la température ambiante et 400°C, la dureté diminue très faiblement (moins de 50 HV de diminution). Entre 400°C et 700°C, la dureté diminue fortement, elle passe de 830 HV à 330 HV pour un bain standard à une densité de courant de 20 A/dm². Ensuite, la dureté atteint un palier aux environs de 240 HV, quels que soient les paramètres de chromage. [30]

Rôle de la couche

La couche de chromatation réalisée sur matériau revêtu peut avoir un triple objectif :

- Améliorer la résistance à la corrosion du matériau en retardant notamment le phénomène de rouille.
- Donner à la pièce un aspect esthétique sans autre traitement supplémentaire ;
- Assurer l'adhérence d'un revêtement organique en conditionnant la surface pour qu'elle soit apte à recevoir une finition organique.

Liaison avec finitions organiques

La liaison entre une couche de chromatation et une peinture, une laque ou toute autre finition organique est excellente en raison de sa structure fissurée et de sa rugosité de surface.

L'application des finitions organiques doit être réalisée assez rapidement après le traitement de chromatation pour une adhérence optimale.

Avantages et inconvénients

La facilité de réalisation des dépôts, le faible coût d'application, comparé aux autres procédés concurrents, ainsi que le fait qu'il n'y ait pratiquement pas de modification des propriétés du substrat (il est nécessaire toutefois de prévenir la fragilisation du substrat par l'hydrogène) font que le chromage s'avère un traitement de choix dans de nombreuses applications.

Toutefois, le mauvais rendement cathodique (compris entre 10 et 25 % suivant la nature du catalyseur) ainsi que le médiocre pouvoir de pénétration et couvrant rendent délicate sa mise en œuvre sur des pièces de formes complexes.

L'utilisation pour les dépôts de chrome, de composés de chrome hexavalent, produit réputé toxique, peut rendre ce procédé polluant si les mesures de prévention ne sont pas utilisées correctement. [26]

3.4.2.2. Le chromage décoratif

Le chromage décoratif s'effectue sur des surfaces généralement revêtues au préalable d'une couche de nickel (ou éventuellement de couches de cuivre et de nickel) et il a pour but essentiel de donner au revêtement les caractéristiques de brillance du chrome. La résistance au ternissement de ce métal, associée à sa dureté, font que cette couche décorative de l'ordre du micromètre permet de donner un aspect brillant qui peut être entretenu pendant de longues années. Les chromes brillants des automobiles d'antan (toujours visibles à l'heure actuelle) et des motos de maintenant en sont un témoignage. [26]

Domaine de brillance et conduite des bains

Les courbes présentées dans la figure 3.11 donnent les conditions d'exploitation pour l'obtention de chrome brillant pour deux compositions différentes de bain de chromage.

Dans la mise au point et le contrôle des bains de chromage décoratif (mais cela peut aussi apporter de précieux renseignements dans le cas du chromage dur), l'utilisation des résultats obtenus dans une cellule de Hull sera très utile. Le principe de cet instrument de contrôle permet de relier directement à la densité de courant, l'aspect du dépôt obtenu sur une cathode dont la nature est fonction de l'étude entreprise, toutes choses étant égales par ailleurs.

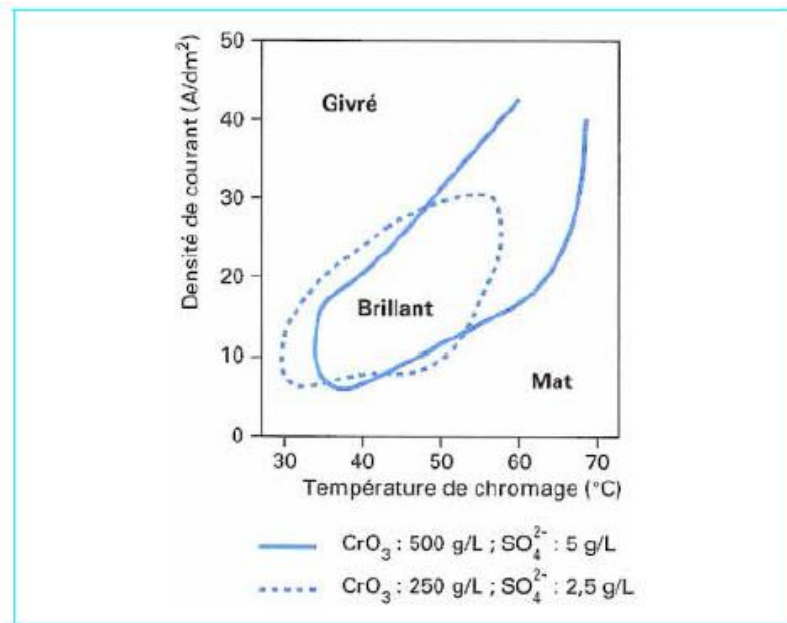


Figure III.11 Évolution de l'aspect avec les paramètres de chromage. [26]

3.4.2.3 Applications

Les applications du chrome décoratif se rencontrent dans de nombreuses industries, et plus particulièrement :

- L'industrie automobile et équipements ;
- Les instruments d'optique, de précision et médicaux ;
- Les mobiliers métalliques ;
- Les articles de sport et les appareillages domestiques.

3.4.3. Dépôt par projection thermique

La projection à chaud ou la métallisation est une excellente solution anticorrosion. Elle se fait par un pistolet ou un chalumeau où le métal protecteur est fondu en fine goulettes et projeté à grandes vitesses sur le matériau à recouvrir.

Les dépôts sont formés à partir de couches successives de gouttelettes écrasées en lamelles et ils peuvent être très épais (plusieurs millimètres) et très adhérents. Ce procédé de revêtement est utilisé pour lutter contre le frottement et pour le rechargement de pièces usées ainsi que pour la réalisation de barrière thermique ou pour améliorer la résistance à l'oxydation à haute température. [31]

3.4.3.1. Projection plasma

La projection plasma permet d'obtenir un revêtement de haute qualité en combinant une source de chaleur à température élevée et hautement énergétique avec un milieu de projection relativement inerte (généralement de l'argon) et des particules à vitesse élevée.

Ce procédé permet de réaliser des dépôts de plusieurs dixièmes d'épaisseur avec un taux de porosité inférieur à 5% en projetant des poudres de granulométrie de $5\mu\text{m}$ à $75\mu\text{m}$. La vitesse de particules peut atteindre 300m/s , la résistance d'arrachement du revêtement jusqu'à 50MPa .

En raison de sa température extrêmement élevée, la projection plasma est particulièrement destinée à être projetée sur des matériaux ayant un point de fusion élevé, comme les céramiques. [43]

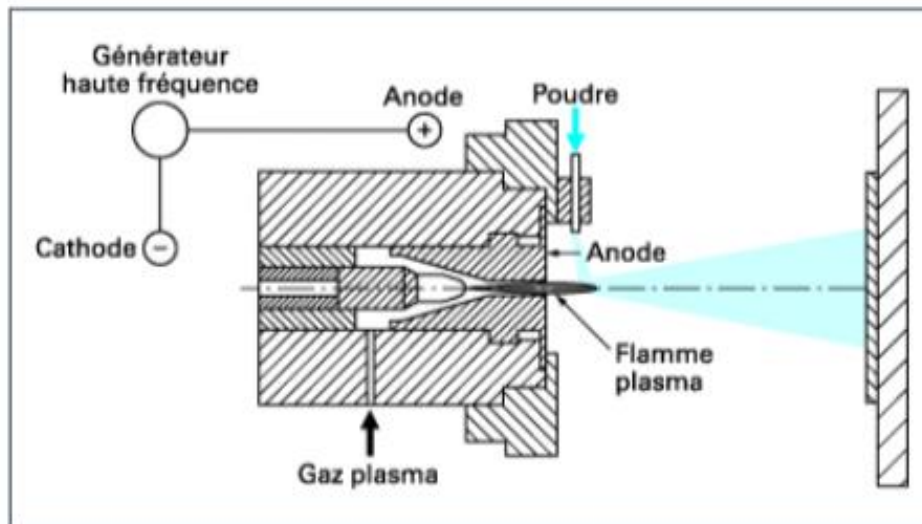


Figure III.12 Projection plasma

Avantages

Cette technologie peut être utilisée pour :

- La reconstruction / Réparation.
- La résistance à la corrosion.
- La résistance à l'usure.
- La résistance à l'oxydation.
- La résistance aux températures élevées.

3.4.3.2. Projection HVOF (High Velocity Oxygen Fuel)

Ce procédé constitue une amélioration de la projection au chalumeau (flamme) par l'utilisation du principe des moteurs fusée, ce qui génère une flamme caractérisée par une vitesse d'éjection de gaz très importante. Le matériau d'apport est en général sous forme de poudre et le procédé est principalement destiné à la projection supersonique de carbures, de métaux ou d'alliages spécifiques. La vitesse élevée des particules, le réchauffement uniforme et le bref temps de passage dans la flamme génèrent la formation d'un revêtement d'une grande adhérence et d'une grande densité.

Pour certaines applications, la Projection HVOF est un substitut au Chromage Dur. [40]

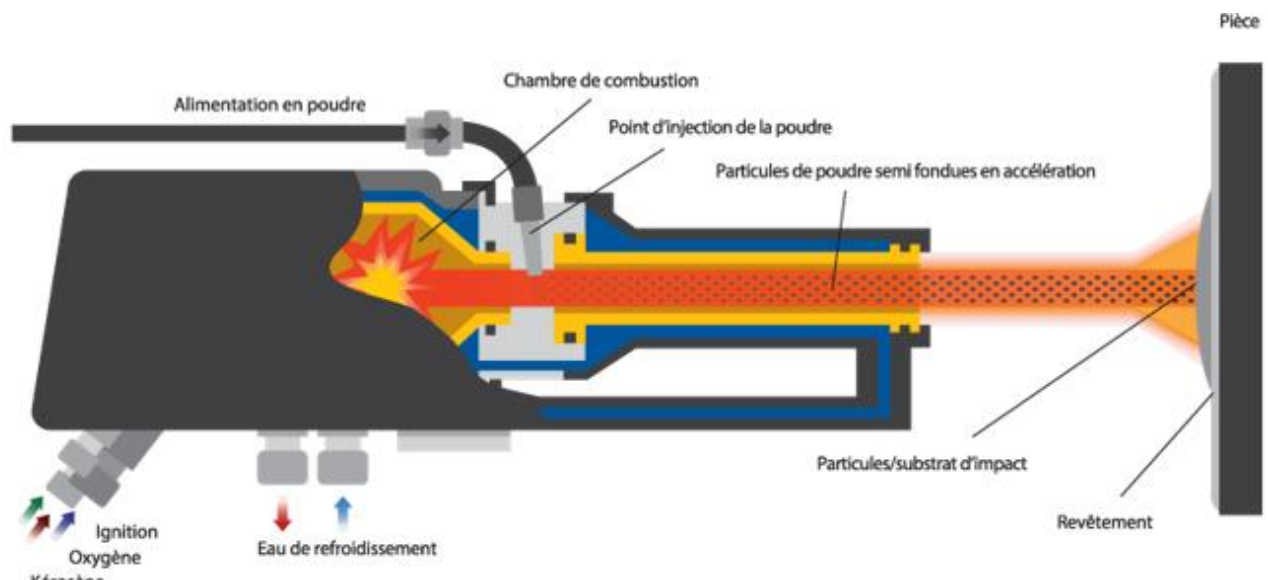


Figure III.13 Projection thermique HVOF

Les différents types d'HVOF

Les procédés HVOF se répartissent en deux familles :

- Ceux dits « *moyenne pression* », qui fonctionnent avec un mélange oxygène/carburant **gazeux** (propane, propylène, etc.).

Ces appareils opèrent à des pressions de combustion comprises entre **2 et 4 MPa**.

- Ceux dits « *haute pression* », qui fonctionnent avec un mélange oxygène/carburant **liquide** (kérosène, white spirit, etc.).

Ces appareils développent des pressions de combustion de l'ordre de **8 MPa**.

L'augmentation de la pression de combustion, provoque une légère augmentation de la température des particules, mais surtout une forte élévation de la vitesse d'impact, comprise entre **700 et 900m/sec**. Il en résulte des revêtements beaucoup plus denses. Un procédé comparable nommé **HVAF**, utilise quant à lui un mélange de combustion kérosène/air comprimé, d'un coût d'exploitation très faible.

Choix du type

Le choix sera guidé par la qualité du revêtement à obtenir, en tenant compte du fait que l'utilisation d'un liquide comme carburant, à la place d'un gaz, réduit le coût d'exploitation et les risques de dangerosité liés à l'utilisation des gaz à haute pression. Le tout en gardant à l'esprit que plus la vitesse de projection est grande, plus le revêtement sera dense avec une meilleure cohésion des particules entre elles. [39]

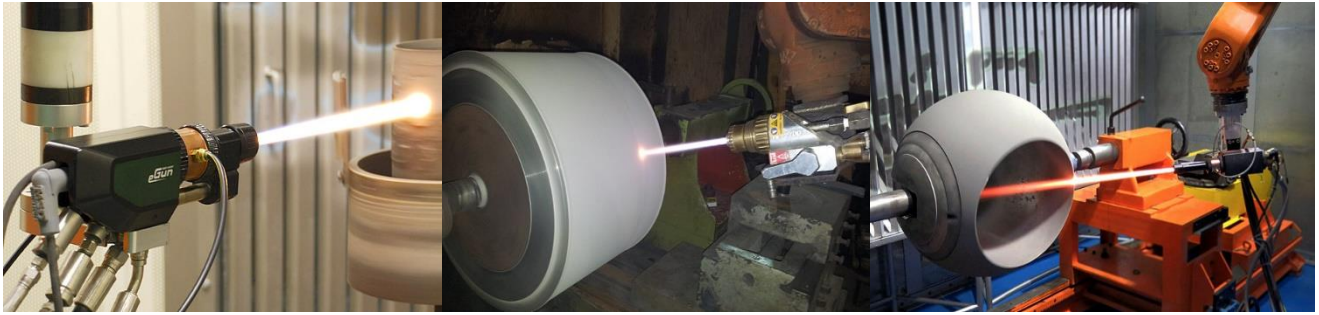


Figure III.14 Quelques projections par système H.V.O.F [39]

Utilisation

- Anti corrosion atmosphérique
- Résistance à l'usure
- Réparation
- Résistance à l'oxydation / sulfuration
- Résistance aux températures élevées
- Augmentation de la dureté superficielle

Avantages

- Protection assurée par un revêtement épais et dense
- Extrême compacité (moins de 2% de porosité)

Paramètres

- Source de chaleur : fuel (liquide) et oxygène
- Matériaux : poudre métallique et carbures métalliques
- Température de la flamme : 2800°C (approx.)
- Vitesse des particules : 400 – 800 m/s
- Vitesse de dépôt : 70 – 200 g/min

Les solutions HVOF – Le remplacement du chrome

Au cours des dernières années, le chromage a été remis en question puisque ce processus de traitement de surface émet une substance considérée comme cancérigène. Transportée dans l'air et l'eau potable, cette substance est hautement dangereuse.

Afin de surmonter ce problème, les organismes de régulation ont mis en place des normes plus strictes en matière de qualité de l'air dans le cadre du processus de chromage. APS n'a pas attendu la création de cette réglementation pour développer des solutions plus respectueuses des hommes et de l'environnement. En effet, depuis 1975, l'entreprise dispose de solutions répondant aux exigences actuelles de la directive européenne REACH.

Les revêtements HVOF se sont révélés largement supérieurs au chromage en termes de résistance à l'usure (jusqu'à 5 fois plus efficaces) et offrent une protection égale ou supérieure contre la corrosion.

Depuis que la projection thermique dispose d'au moins 400 matériaux différents (alliages, métaux purs, cermets, céramiques), le matériau utilisé est choisi pour ses propriétés spécifiques en fonction de l'application. À l'inverse, les propriétés du chromage n'offrent qu'une variété limitée d'applications.

De plus, la projection thermique fonctionne bien sur une très large gamme de conditions de service et d'environnements de travail. Les revêtements par projection thermique sont produits dans les cas d'environnements chauds, corrosifs acides et une foule d'autres où le chromage ne serait pas considéré.

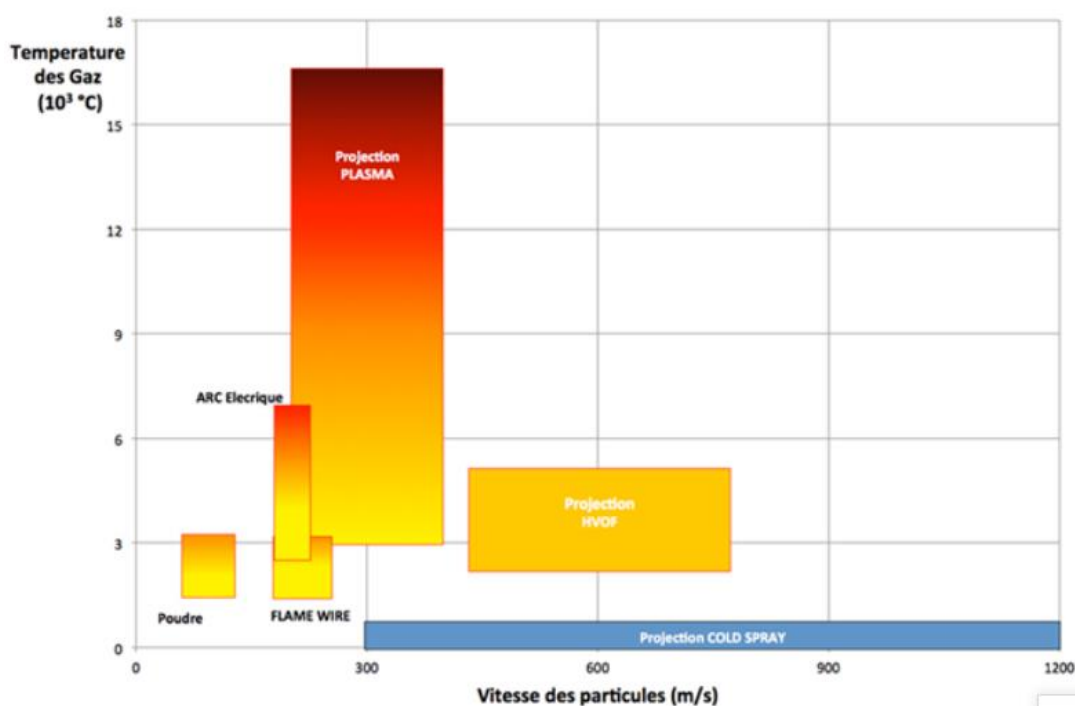


Figure III.15 Différentes techniques de Projection thermique

3.4.3.3. Projection HVAF (High Velocity Air Fuel)

La technique de la projection thermique par HVAF, est un procédé qui consiste à chauffer et projeté 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.

Ce procédé de projection à chaud utilise de l'air comme comburant. Le dispositif de projection thermique consiste en un pistolet HVAF 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. [44]

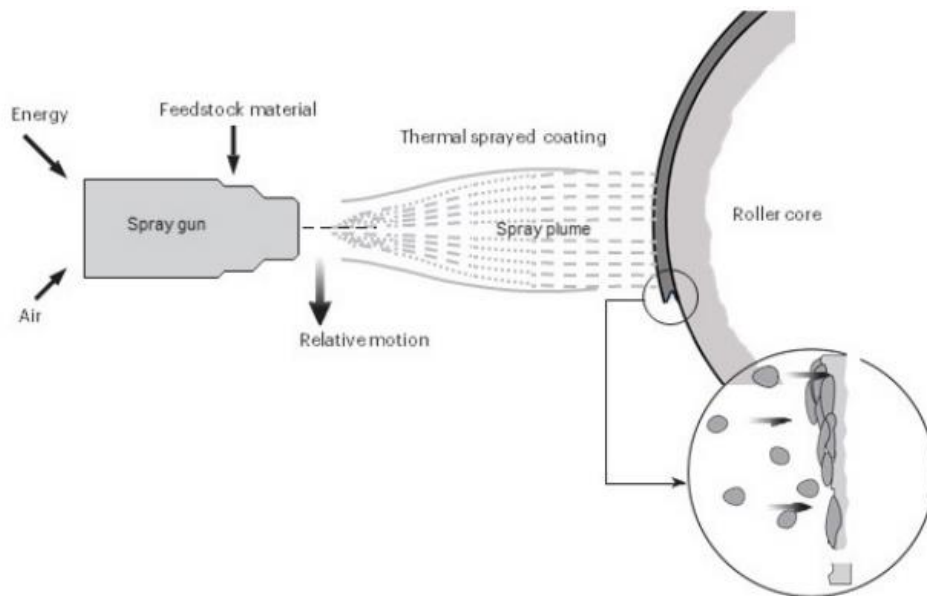


Figure III.16 Projection thermique HVOF

La limite théorique de la vitesse du jet HVOF est de 1400 m/s pour les plages de pression qui pourraient être fournies par des compresseurs d'air ordinaires de 125 psi. La vitesse des particules peut atteindre 1100-1200 m/s et dépend de la taille et de la conception du pistolet de coupe et de pulvérisation de poudre (distance d'accélération et profil de la buse).

HVOF et HVOF

Selon la littérature disponible, les revêtements par pulvérisation de HVOF ont donné des revêtements de qualité supérieure par rapport aux revêtements HVOF. Les revêtements HVOF présentent de nombreux avantages par rapport aux revêtements HVOF, comme l'indiquent certains chercheurs : flamme à basse température, fort effet de pincement des particules de projection (contraintes résiduelles de compression élevées), refroidissement par air (pas de refroidissement par eau nécessaire), taux de pulvérisation 3 à 4 fois plus élevé (gain de temps et d'argent), dureté et ductilité élevées, alimentation axiale en poudre (moins de décarburation).

Avantages

Les revêtements HVOF sont très denses, tenaces et présentent des contraintes résiduelles en compression. Cela permet d'appliquer de fortes épaisseurs.

Comparé au chrome dur, les avantages des revêtements sont :

- Résistance à l'abrasion 10 fois supérieure
- Pas de fragilisation par l'hydrogène
- Plus haute dureté (maximum 900 HV pour le chrome dur)
- Meilleure résistance à la corrosion
- Possibilité d'appliquer de fortes épaisseurs

- Possibilité de rugosités élevées
- Pas d'utilisation de Cr6+ (produit cancérigène banni par REACH)

3.4.4 Rechargement par laser (laser cladding)

Le soudage par rechargement par laser, également appelé laser cladding, se réalise soit à l'aide d'un fil d'apport, soit par apport de poudre. Le faisceau laser génère sur la surface de la pièce un bain dans lequel est amenée la matière de revêtement (fil ou poudre) fondue par le laser. La durée d'action est brève et n'engendre qu'un faible retrait, et le refroidissement est rapide. Le résultat est une couche qui est liée métallurgiquement au substrat. Cette couche est plus résistante que les revêtements réalisés par projection thermique et plus inoffensive en termes de santé que le chromage dur.

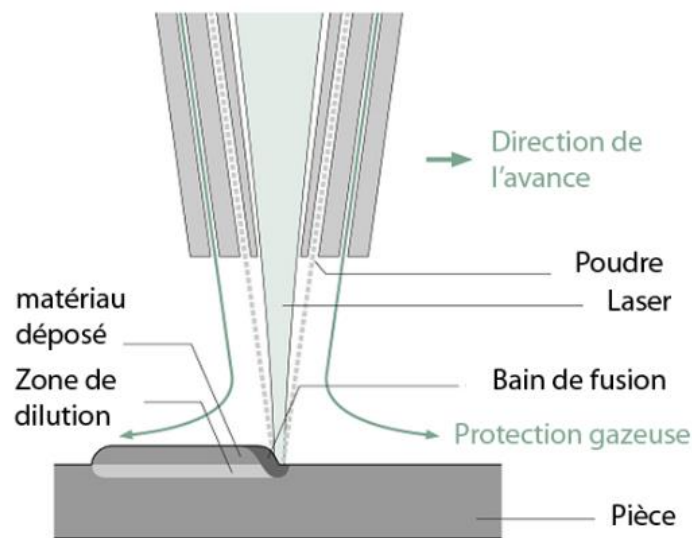


Figure III.17 Procédé de rechargement par laser

La variété d'alliages pouvant être utilisée permet l'obtention de pièces finies ayant des propriétés très variées. Par exemple, il peut s'agir de poudres métalliques additionnées de carbure de tungstène ou de zircons qui, une fois liées au métal de base, donnent une excellente résistance à l'usure ainsi que des propriétés abrasives fort utiles pour des outils. Le revêtement ainsi créé peut avoir une épaisseur variant de 0,2 à 5,0 millimètres. On peut donc obtenir des pièces comportant une fine couche dotée de caractéristiques propres aux matériaux les plus coûteux, tout en utilisant un matériel de base économique.

S'il est possible d'utiliser d'autres techniques pour recharger ou plaquer des pièces (arc MIG, plasma...), seul le laser permet une telle précision, une microstructure métallique aussi fine (garante de bonnes caractéristiques mécaniques) ainsi que d'aussi faibles déformations.

Le secteur de l'aéronautique utilise largement ce procédé. On y a recours pour déposer une mince couche ultra-résistante en surface des ailettes des turbines, et on s'en sert à nouveau pour ramener ces

mêmes ailettes à leurs dimensions d'origine une fois que l'usure les a rendues impropres à l'utilisation.

Avantages

Le rechargement laser permet de réparer ou de recharger des pièces.

Les principaux avantages sont :

- Durée et profondeur d'action réduites du laser
- Liaison métallurgique de la matière de revêtement et du substrat
- Couches plus résistantes que les couches appliquées par projection thermique
- Qualité de surface élevée et faible retrait, quasiment aucune opération de retouche requise
- Temps d'usinage de courte durée, efficacité énergétique élevée
- Possibilité de recharger des pièces en 5 axes sur des pièces de grandes dimensions
- Une faible zone affectée thermiquement

3.5. Comparaison du chromage dur avec la projection thermique

Le remplacement du chromage dur par la projection thermique (HVOF, HVOF, projection plasma) n'est pas une nouveauté pour l'industrie, mais cette dernière a pris de l'ampleur ces dernières années en raison du renforcement des normes environnementales fédérales et étatiques relatives à l'exposition au chrome hexavalent.

Outre les préoccupations environnementales liées au chromage dur, les avantages économiques et les performances sont également à l'origine du passage aux revêtements par projection thermique.

Les fabricants continuent à rechercher de nouvelles technologies telles que la projection thermique pour améliorer la durée de vie et les performances des composants face à la hausse des prix du carburant, à la multiplication des réglementations gouvernementales strictes et à la nécessité d'améliorer en permanence le coût total d'exploitation de leurs machines. Pour un coût initial légèrement plus élevé, les revêtements par projection thermique offrent une durée de vie plus longue, une meilleure protection contre la corrosion et une meilleure résistance à la fatigue par rapport aux plaques de chrome dur.

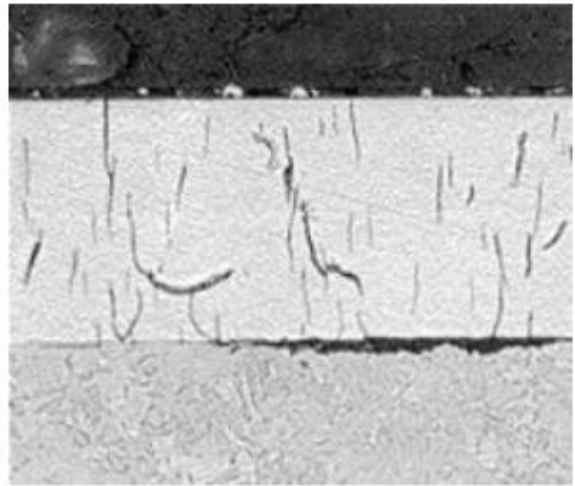
Économie

Si le chromage peut sembler être une option moins coûteuse en raison de son coût initial plus faible, le retour sur investissement et les calculs démontrent que le coût global est plus faible lors de l'utilisation des revêtements par projection thermique. Les revêtements par projection thermique ont prouvé qu'ils étaient plus résistants à l'usure et à la corrosion que le chrome dur. Les données de terrain et de laboratoire confirment que les revêtements de carbure de tungstène, de carbure de chrome et d'oxyde de chrome peuvent durer de 3 à 5 fois plus longtemps que le chromage dur. Les économies sont

réalisées non seulement lorsque la pièce dure plus longtemps - et donc n'a pas besoin d'être remplacé ou recouvert, mais aussi de réduire ou d'éliminer les temps d'arrêt des machines.

Comment les revêtements par projection thermique se comparent-ils physiquement au chromage dur ?

Cela se fait en examinant leurs propriétés. Les revêtements par projection thermique sont beaucoup plus denses que le chromage. De plus, le chromage présente des microfissures dans la couche de placage, ce qui permet aux agents corrosifs à fort ou faible PH pour pénétrer dans le placage et attaquer le substrat. On peut voir des microfissures sur la figure adjacente. Si le substrat est ferreux, cela entraîne une corrosion par fissuration et finalement l'échec du placage par écaillage et délamination.



La porosité des revêtements HVOF est inférieure à 1 % et est non interconnectés. Les revêtements par projection thermique fournissent une barrière anticorrosion beaucoup plus solide que la plaque de chrome dur.

La personnalisation de la conception du revêtement, par exemple en utilisant une couche de liaison, l'augmentation de l'épaisseur du revêtement ou la modification de la composition du matériau de revêtement (ajout de chrome ou de nickel dans le mélange de poudre), ou l'utilisation d'un produit d'étanchéité post-revêtement peuvent tous accroître encore la barrière de résistance contre la corrosion.

Attribut	Plaque de chrome dur	Revêtements par projection thermique
Durée de vie	Modérée	Excellente
Barrière anticorrosion	Faible	Excellente
Résistance à la fatigue	Faible	Excellente
Résistance à l'endommagement	Faible	Bonne
Résistance à l'usure	Bonne	Bonne
Cout	Faible	Modéré
Respect de l'environnement	Faible	Excellent

Tableau III.2 Tableau de comparaison entre le chrome dur et le revêtement par projection thermique

Les revêtements par projection thermique ont également une bonne ductilité et possèdent d'excellentes propriétés de résistance à la fatigue. Les essais de pliage décrits dans la norme ASTM D522 précisent que les revêtements doivent résister à la fissuration ou à l'écaillage lorsqu'ils sont pliés sur un mandrin. La résistance à la fatigue des revêtements par projection thermique est beaucoup plus élevée que celle du chromage. Comme les revêtements HVOF confèrent une charge de compression au substrat, ils augmentent en fait la durée de vie des composants contre la rupture par fatigue en résistant à l'amorçage de fissures. Le chromage introduit la traction à la surface du substrat qui déclenche la formation de fissures et peut entraîner une défaillance prématurée. [32]

Le chromage a ses avantages. Un des avantages du chromage est qu'il s'agit d'un procédé par immersion. Il est donc généralement plus facile et plus efficace d'encapsuler entièrement un composant par un procédé de trempage que par un procédé en visibilité directe tel que la projection thermique. Comme la projection thermique est un procédé en ligne de mire, toutes les surfaces doivent être visibles pour la tête de projection pendant l'application du revêtement. Pour les composants à géométrie complexe, plusieurs réglages sont nécessaires.

Inversement, pour les composants comportant plusieurs zones à revêtir et des zones adjacentes où le revêtement n'est pas autorisé, la projection thermique est peut-être la solution la plus économique. Le masquage des zones où le placage n'est pas autorisé ou nécessaire est beaucoup plus difficile et coûteux avec le chromage. Le masquage par projection thermique est aussi simple ; on place un bouclier devant le pistolet de projection pour recouvrir une zone où le revêtement n'est pas souhaité. Il est généralement plus facile à automatiser pour le masquage par projection thermique que pour le chromage. Le masquage pour le chromage est une opération manuelle à forte intensité de main-d'œuvre.

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons pu mettre en valeur l'importance qu'a le traitement de surface dans toutes les industries, cette dernière a pour but d'améliorer et d'augmenter certaines propriétés voulu dans une pièce. De nos jours, de nouvelles fonctions sont ajoutées aux surfaces des objets, et de nouveaux procédés sont mis au point pour assurer des fonctions déjà existantes, en réponse à des enjeux économiques ou environnementaux

Nous avons au cours de ce chapitre caractérisé les différents types de traitement de surface en se focalisant sur le chromage dur et les dépôts par projection thermique : leurs principes, utilisations ainsi que leurs caractéristiques. Enfin, grâce à la comparaison effectuée, nous pouvons constater que le dépôt par projection thermique est bien meilleur dans certaines applications

Chapitre 4

IV. Chapitre 4 : Simulation et résultat

4.1 Introduction

Cette étude entre dans le cadre d'une réparation des tiges de piston d'un compresseur alternatif appartenant au complexe SONATRACH GP1Z (production du propane et butane à partir du GPL).

La réparation réalisée par la société Espagnole T M COMAS consiste au remplacement du chromage dur usé sur la surface de translation des tiges par une application d'une couche de carbure de tungstène base cobalt par projection HVOF.

Les différents moyens et techniques utilisés dans cette étude sont décrits dans ce chapitre.

Notre étude sera basée sur la comparaison de deux pièces ; la première revêtue avec du chromage dur et la deuxième par une couche de carbure de tungstène et cela en simulant les différents essais (traction, compression etc.) en utilisant deux logiciels (SolidWorks & Ansys)

4.2 Matériaux

Le matériau utilisé est un acier de construction au carbone, de qualité Ck45, laminé à chaud, selon DIN 17200/1013/1014/1017, ou forgé selon DIN7527/6, en barre de 6 mètres, permettant une trempe. Il convient à la fabrication de pièces mécaniques, de semelles de matrices de chemises de roulements, etc.

Les compositions chimiques et les propriétés mécaniques sont listées dans le tableau suivant :

Elément	C	Mn	Si	S	P	Fe
Composition %	0.42/0.50	0.5/0.8	≤0.35	≤0.035	≤0.035	Balance
Propriétés mécaniques	Dureté HB	175-210				
	Rm (N/mm ²)	560-620				
	Re (N/mm ²)	275-340				
	Allongement%	14-16				
	Striction %	40				

Tableau IV.1 Composition chimique et propriétés mécanique de la pièce

4.3 Revêtement des éprouvettes

La première pièce sera revêtue avec une couche de chrome dure dont l'épaisseur est de 0.1mm dont les caractéristiques techniques sont :

	A	B	C	D	E
1	Propriété	Valeur	Unité	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	<input checked="" type="checkbox"/> Elasticité isotrope			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Dériver de	Modu...			
4	Module de Young	2,35E+11	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Coefficient de Poisson	0,31		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Module de compressibilité	2,0614E+11	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Module de cisaillement	8,9695E+10	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	<input checked="" type="checkbox"/> Limite d'élasticité en traction	5E+08	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	<input checked="" type="checkbox"/> Limite à la rupture en traction	7E+08	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

	A	B	C	D	E
1	Propriété	Valeur	Unité	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	<input checked="" type="checkbox"/> Elasticité isotrope			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Dériver de	Modu...			
4	Module de Young	5,5E+11	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Coefficient de Poisson	0,22		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Module de compressibilité	3,2738E+11	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Module de cisaillement	2,2541E+11	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	<input checked="" type="checkbox"/> Limite d'élasticité en traction	6,8E+08	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	<input checked="" type="checkbox"/> Limite à la rupture en traction	9,9E+08	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figure IV.2 Propriétés du chromage dur et de carbure de tungstène base cobalt

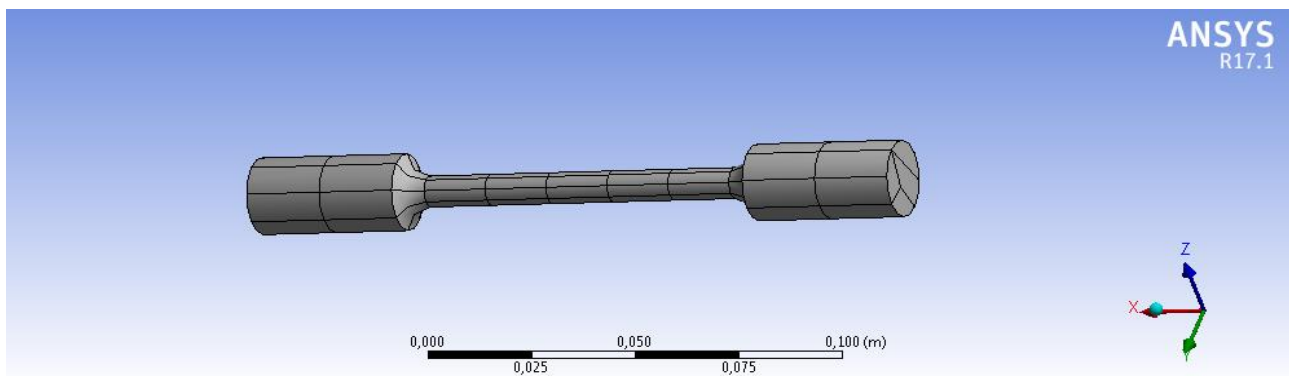


Figure IV.3 L'éprouvette avec maillage.

Remarque :

Notre étude ne demande pas de faire un maillage fin.

4.4 Simulation des différents tests

4.4.1 Essai de traction

Cet essai ou expérience consiste à placer une petite barre du matériau à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction qui tire sur la barre jusqu'à sa rupture.

On simule cet essai sur le logiciel Ansys, et on s'intéresse sur la contrainte équivalente (Von-Mises) et la contrainte principale équivalente.

- 1ere éprouvette (chromage dur) :

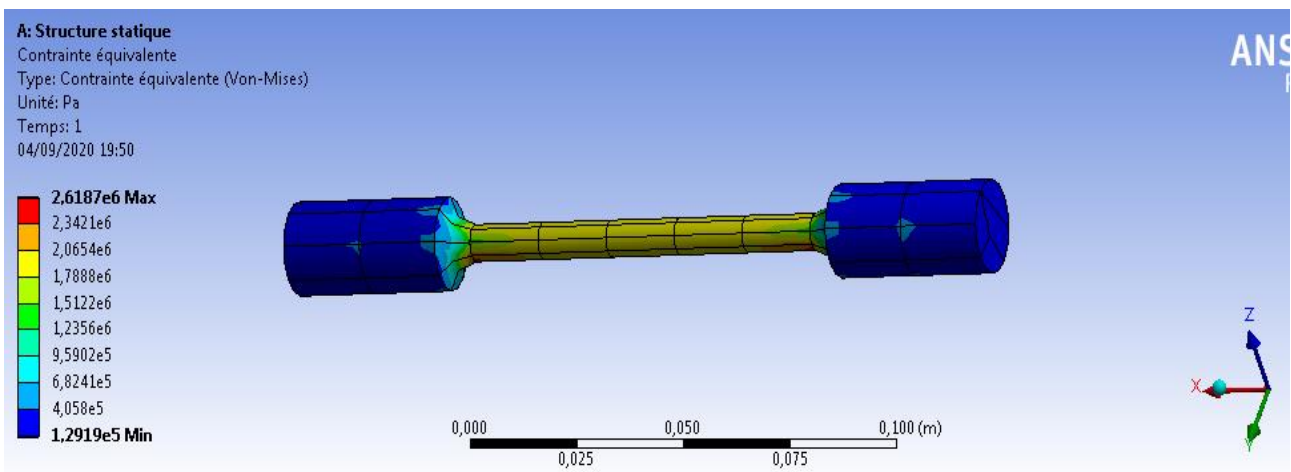


Figure IV.4 Figure représentant la contrainte de Von-Mises pour le chromage dur (en traction)

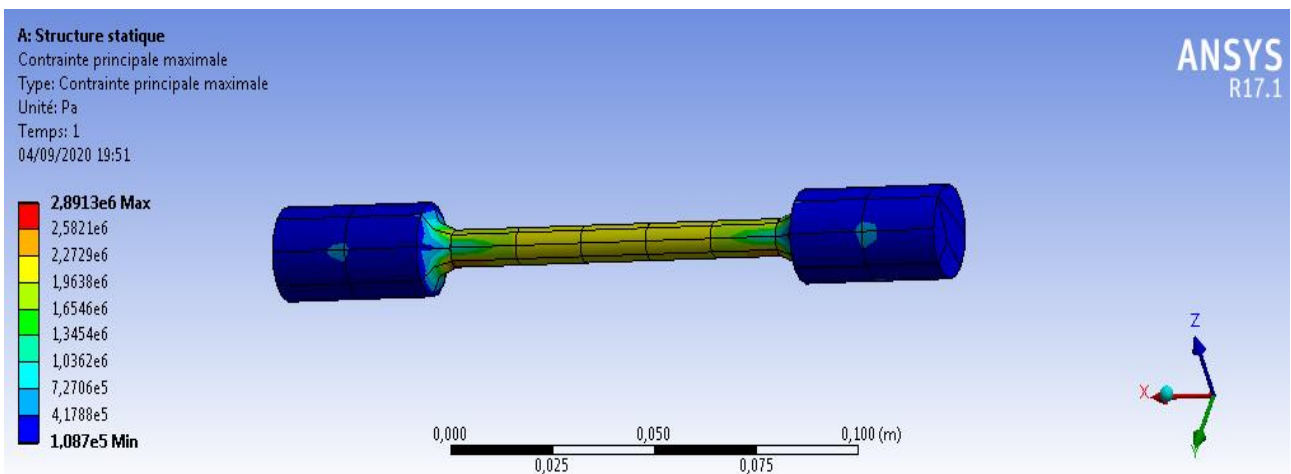


Figure IV.5 Figure représentant la contrainte principale maximale pour le chromage dur (en traction)

- 2eme éprouvette (carbure de tungstène base cobalt) :

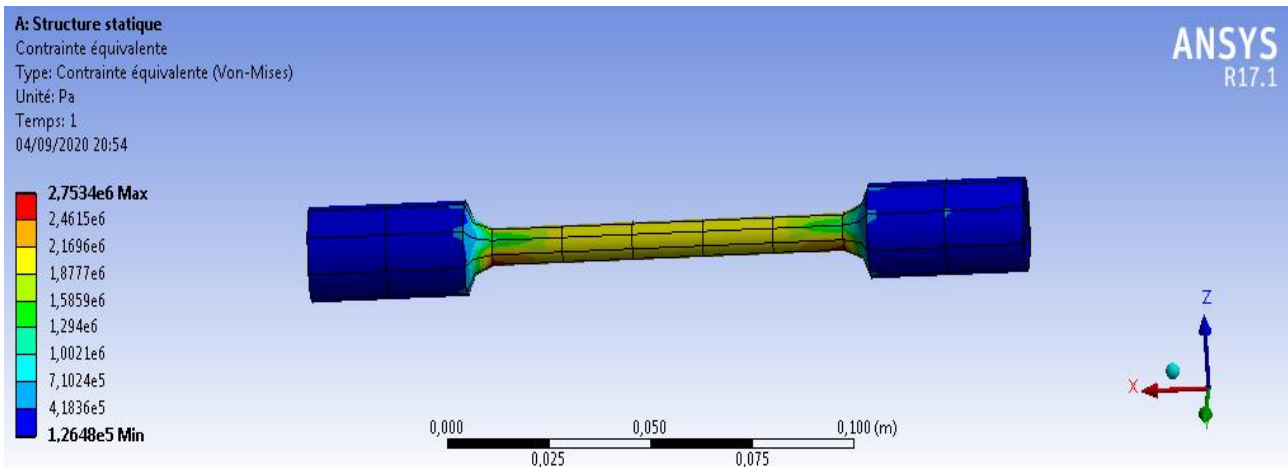


Figure IV.6 Figure représentant la contrainte de Von-Mises pour WC-Co (en traction)

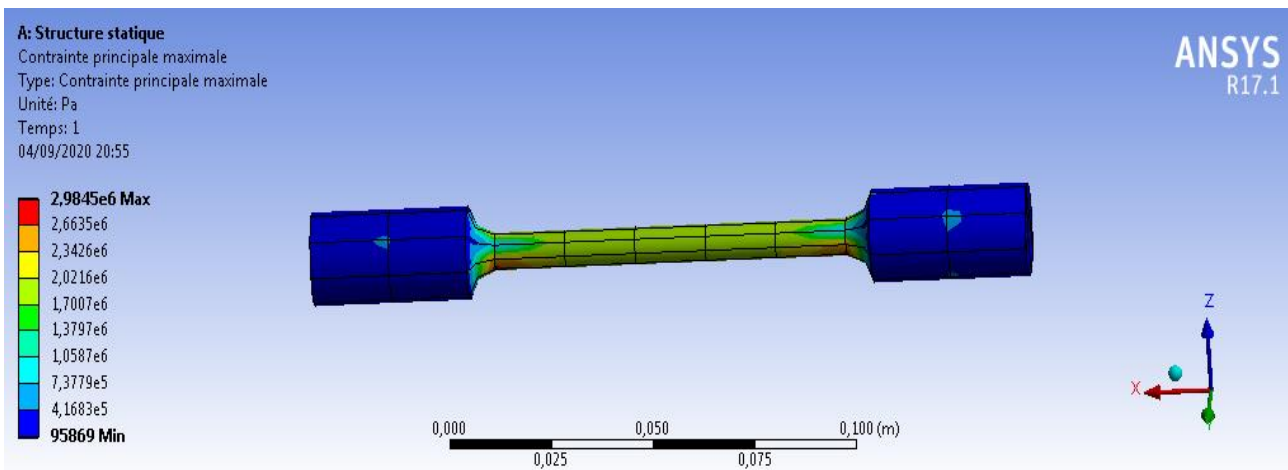


Figure IV.7 Figure représentant la contrainte principale maximale pour WC-Co (en traction)

Discussion

- La valeur de la contrainte nous a permis de savoir qu'en appliquant une force de 100N, on reste toujours dans le domaine élastique pour les deux éprouvettes.

$$\sigma_{Von-Mises} < \sigma_{élastique}$$

- La contrainte principale maximale pour WC-Co est presque égale à celle du chromage dur, donc en traction le chromage dur est un peu meilleur que le carbure de tungstène base cobalt.

4.4.2 Essai de compression

Un essai de compression mesure la résistance à la compression d'un matériau sur une machine d'essais mécaniques suivant un protocole normalisé. Les essais de compression se font souvent sur le même appareil que l'essai de traction mais en appliquant la charge en compression au lieu de l'appliquer en traction.

- 1ere éprouvette (chromage dur) :

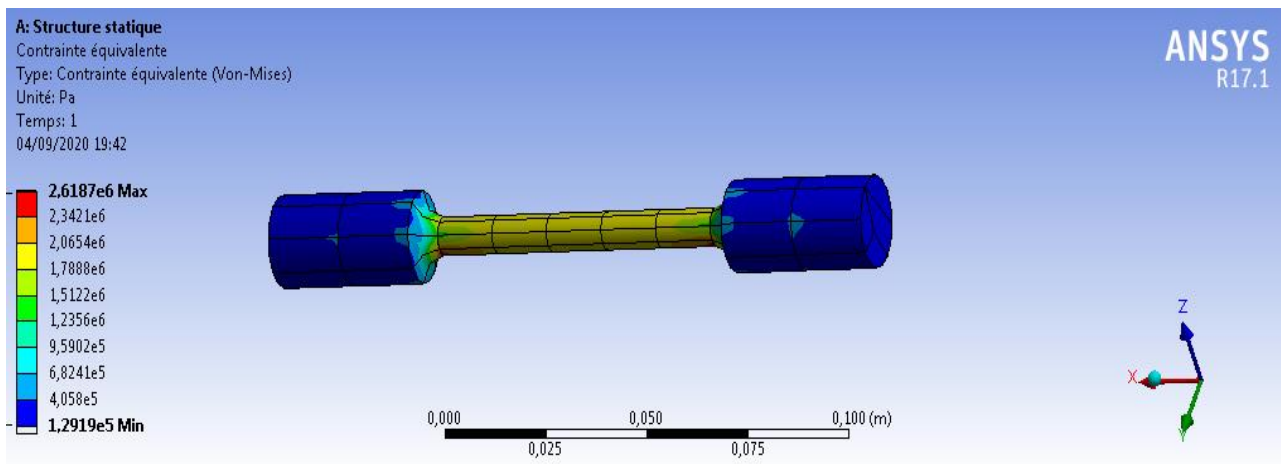


Figure IV.8 Figure représentant la contrainte de Von-Mises pour le chromage dur

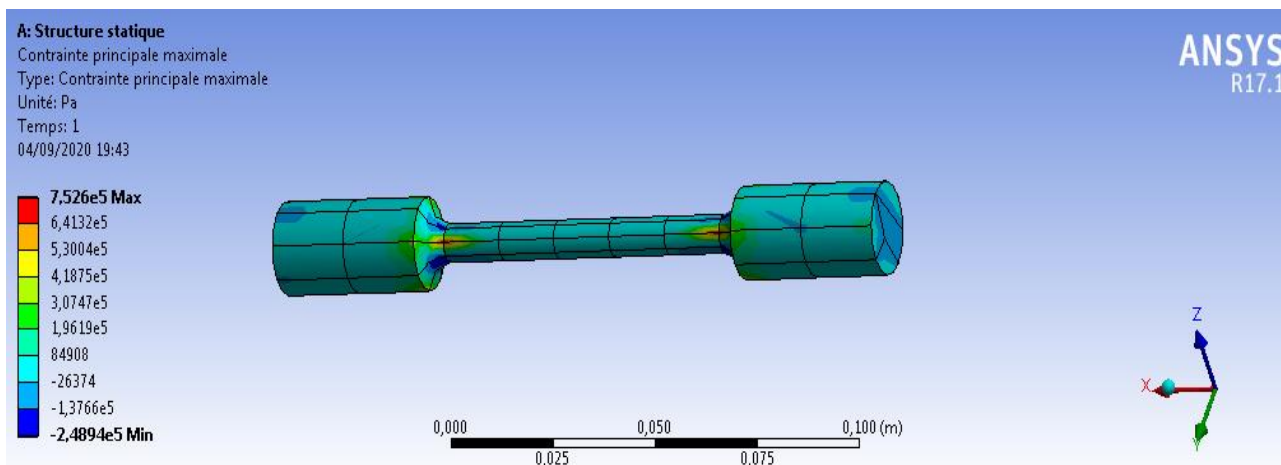


Figure IV.9 Figure représentant la contrainte principale maximale pour le chromage dur

- 2eme éprouvette (carbure de tungstène base cobalt) :

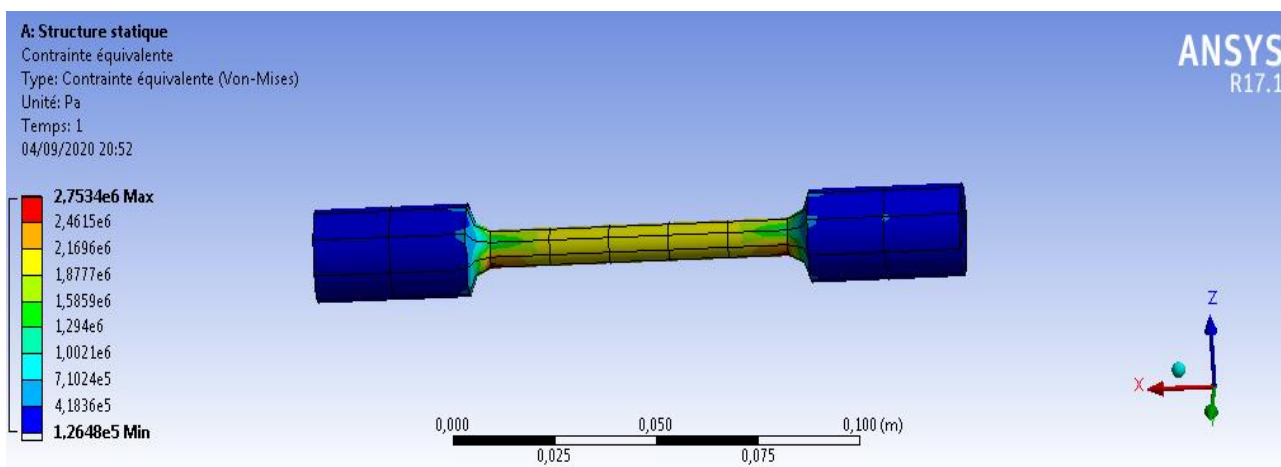


Figure IV.10 Figure représentant la contrainte de Von-Mises pour WC-Co

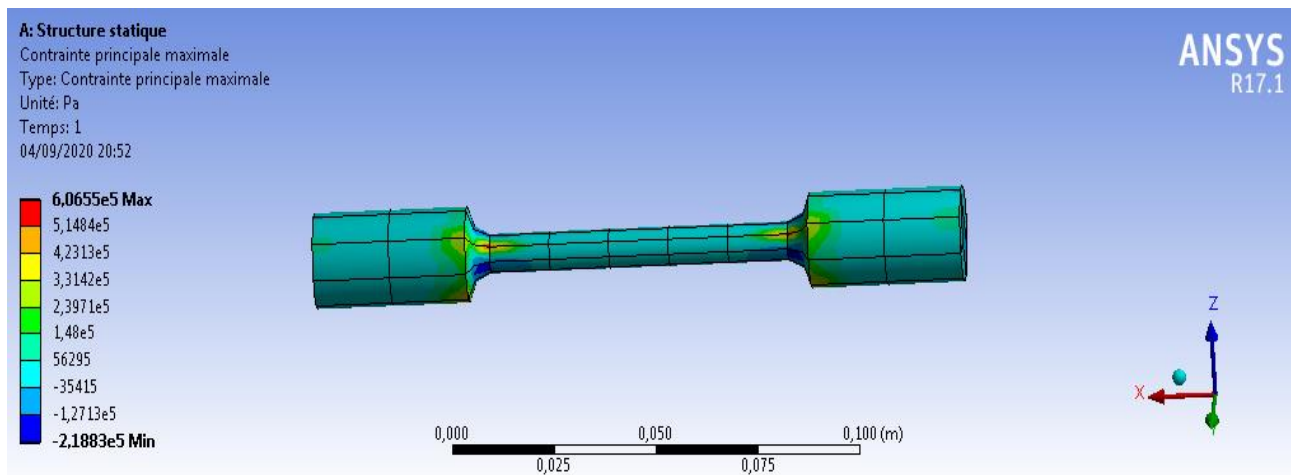


Figure IV.11 Figure représentant la contrainte principale maximale pour WC-Co

Discussion

- La valeur de la contrainte de Von-Mises nous a permis de savoir qu'en appliquant une force de compression de 100N, on reste toujours dans le domaine élastique pour les deux éprouvettes.

$$\sigma_{Von-Mises} < \sigma_{élastique}$$

- La contrainte principale maximale pour WC-Co est inférieure à celle du chromage dur, donc on constate qu'en compression le carbure de tungstène à base cobalt est plus résistant par rapport au chromage dur.

4.4.3 Flexion 3 points

L'essai de flexion 3 points permet également de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Une barrette du matériau à tester est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de la barrette une force croissante jusqu'à la rupture.

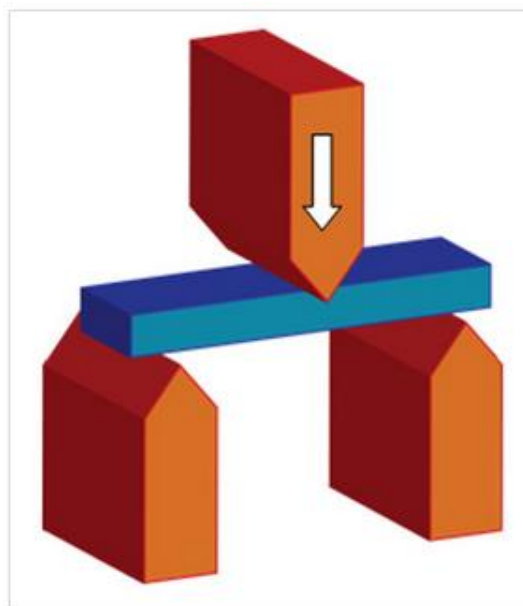


Figure IV.12 Test de flexion 3 points

Le modèle de l'éprouvette recommandée (normalisée) pour le test de flexion 3 points est présenté sur la figure suivante :

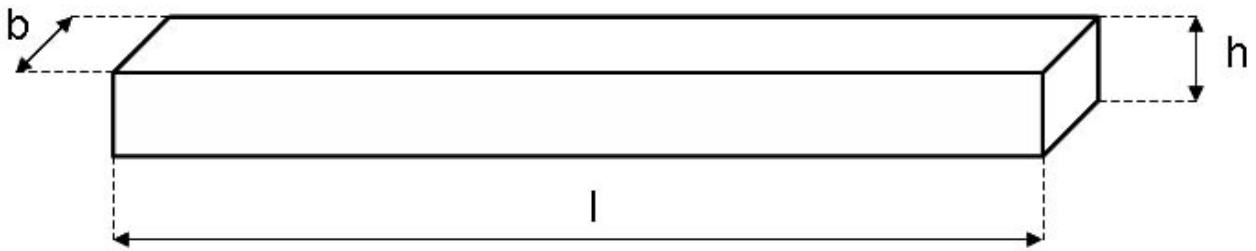


Figure IV.13 Dimensions de l'éprouvette pour essais de flexion selon les normes.

l = Longueur de l'éprouvette

b = Largeur de l'éprouvette

h = épaisseur de l'éprouvette

Norme	l (mm)	b (mm)	h (mm)
ASTM D790	> 80	10 ± 0,5	4±0,2
ISO 178	> 80	10 ± 0,5	4±0,2
DIN 53452	> 80	10 ± 0,5	4±0,2
NF T 51-001	> 80	10 ± 0,5	4±0,2

Figure IV.14 Dimensions de l'éprouvette pour essais de flexion selon les normes.

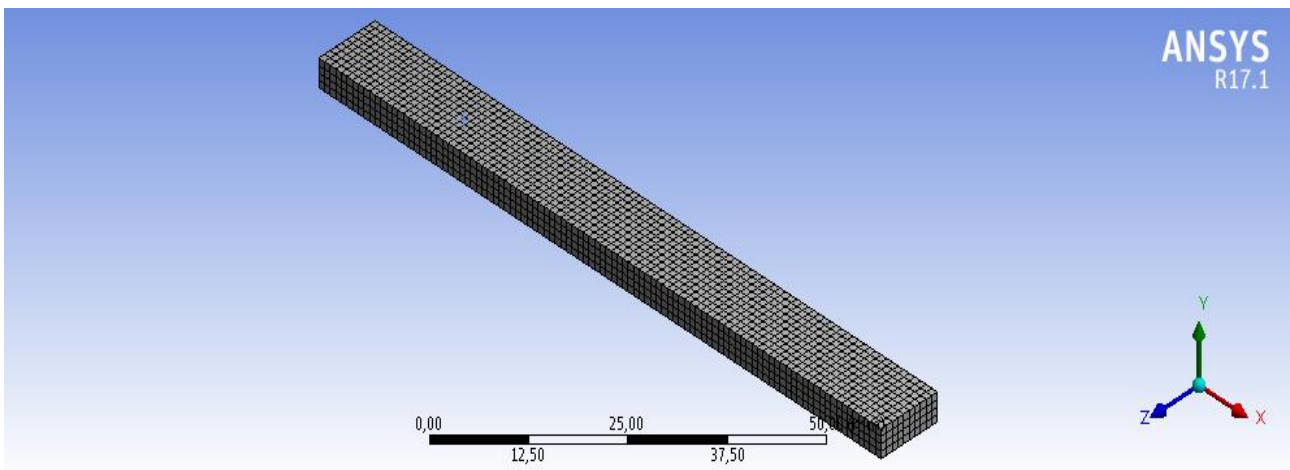


Figure IV.15 L'éprouvette utilisée pour la flexion 3 points avec maillage.

- 1ere éprouvette (chromage dur) :

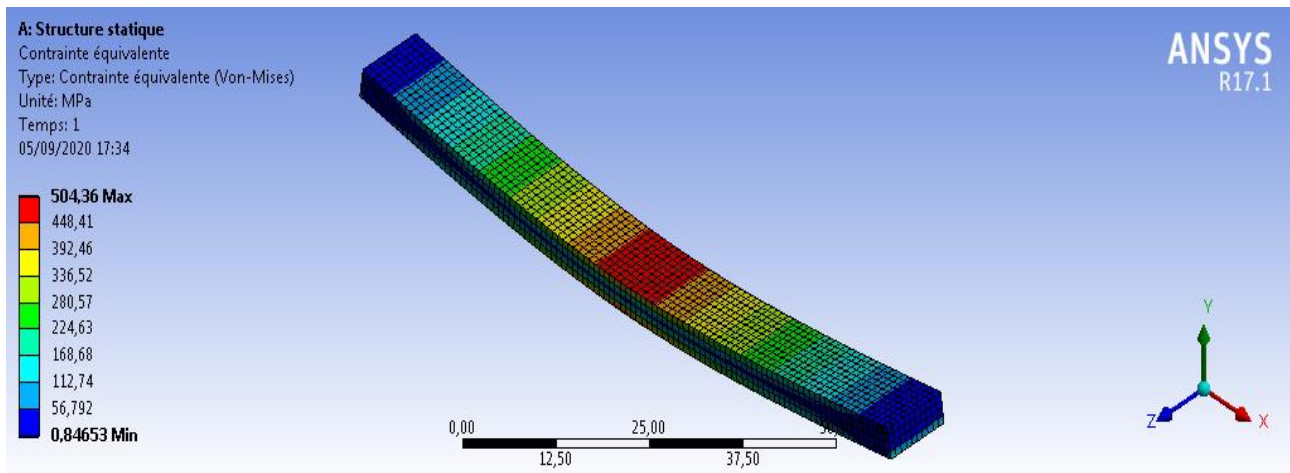


Figure IV.16 Figure représentant la contrainte de Von-Mises pour le chromage dur

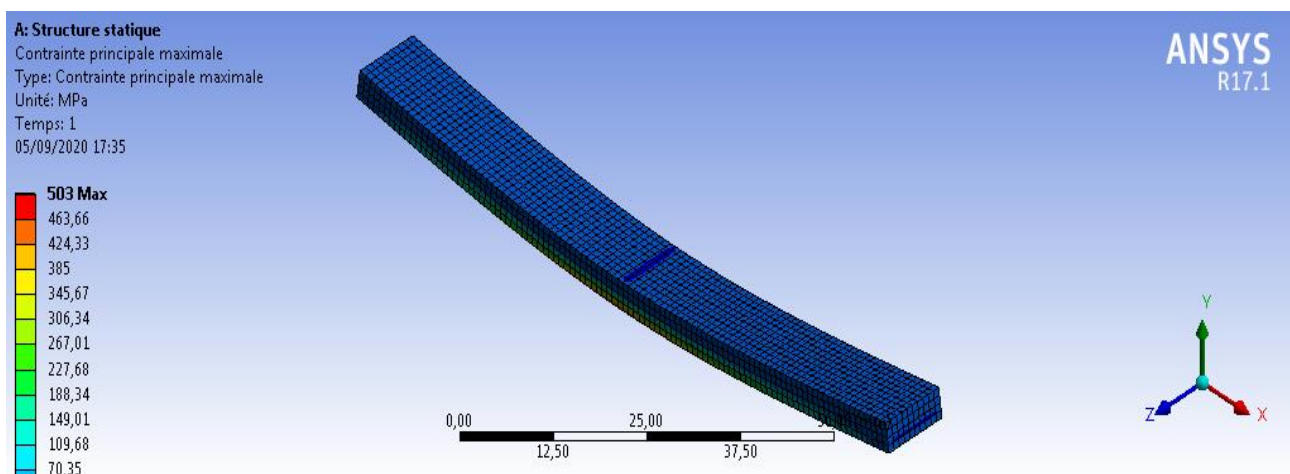


Figure IV.17 Figure représentant la contrainte principale maximale pour le chromage dur

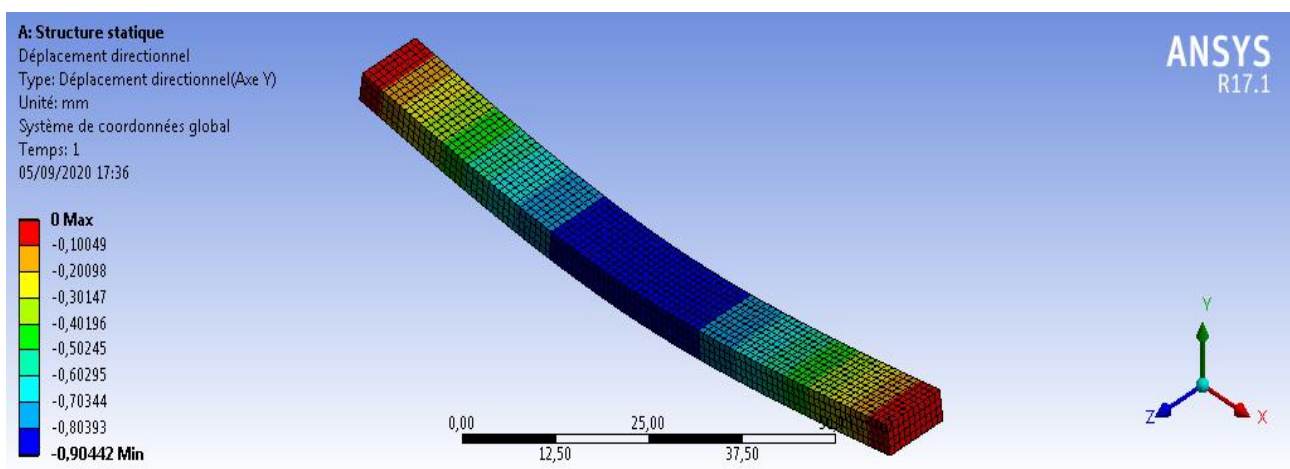


Figure IV.18 Figure représentant le déplacement directionnel suivant l'axe y pour le chromage dur

- 2eme éprouvette (carbure de tungstène base cobalt) :

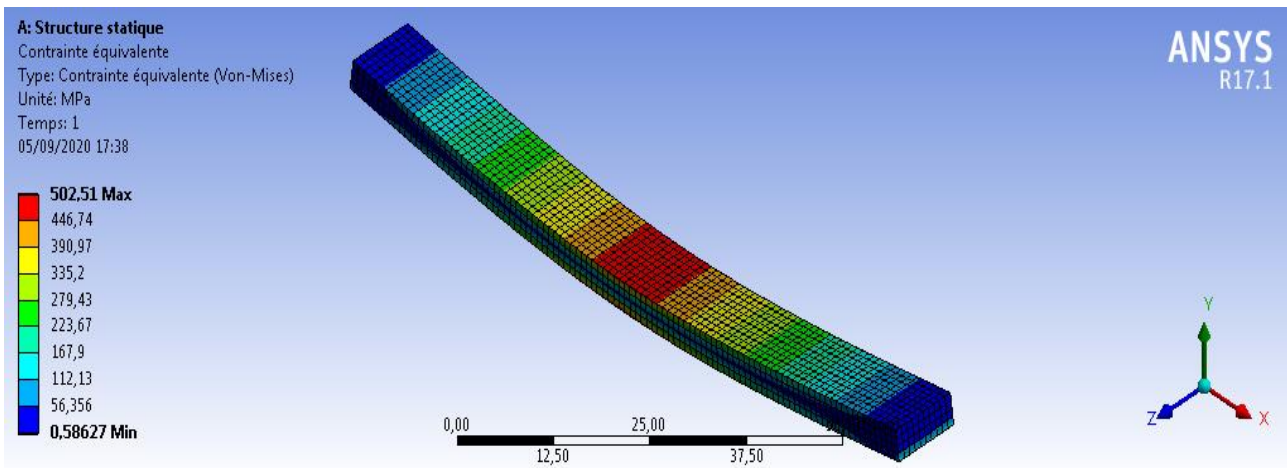


Figure IV.19 Figure représentant la contrainte de Von-Mises pour le WC-Co

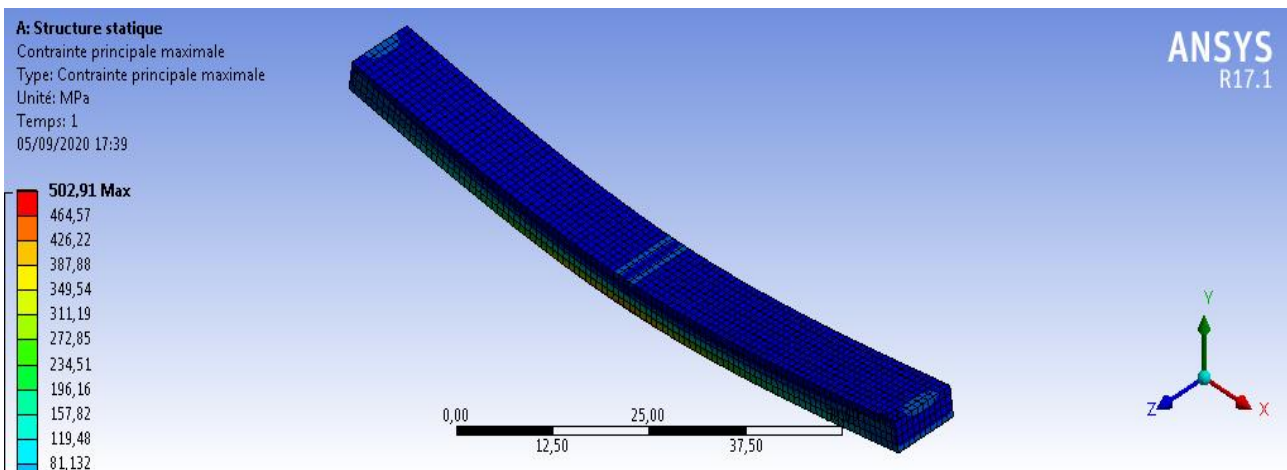


Figure IV.20 Figure représentant la contrainte principale maximale pour le WC-Co

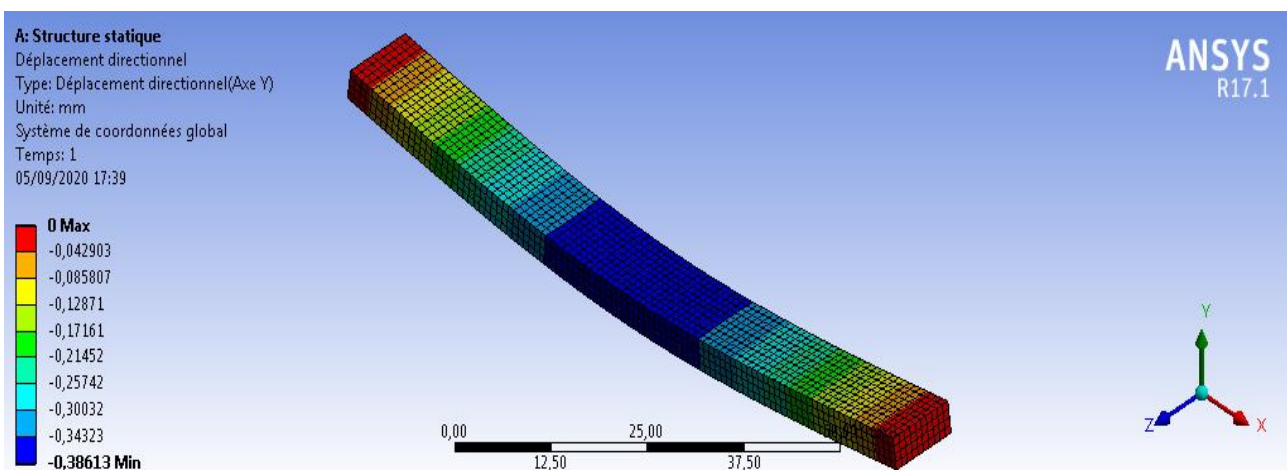


Figure IV.21 Figure représentant le déplacement directionnel suivant l'axe y pour le WC-Co

Discussion

- La valeur de la contrainte de Von-Mises nous a permis de savoir qu'en appliquant une force de compression de 540N, on reste toujours dans le domaine élastique pour la deuxième éprouvette (WC-Co) par contre on est dans le domaine plastique pour l'éprouvette en chromage dur.

$$\sigma_{\text{Von-Mises (WC-Co)}} < \sigma_{\text{élastique (WC-Co)}}$$

$$\sigma_{\text{Von-Mises (chromage dur)}} > \sigma_{\text{élastique (chromage dur)}}$$

- La limite à la rupture est atteinte pour une force de 750 N pour le chromage dur et pour 1060 N pour le WC-Co. (Résultat obtenu avec le logiciel Ansys)

$$F_r (\text{chromage dur}) = \frac{2 \sigma_r (\text{chromage dur}) b h^2}{3L}$$

$$F_r (\text{chromage dur}) = \frac{2 \times 700 \times 10^6 \times 0.01 \times 0.004^2}{3 \times 0.1}$$

$$F_r (\text{chromage dur}) = 747 \text{ N}$$

$$F_r (\text{WC-Co}) = \frac{2 \sigma_r (\text{WC-Co}) b h^2}{3L}$$

$$F_r (\text{WC-Co}) = \frac{2 \times 990 \times 10^6 \times 0.01 \times 0.004^2}{3 \times 0.1}$$

$$F_r (\text{WC-Co}) = 1056 \text{ N}$$

Les résultats obtenus en utilisant le logiciel Ansys sont très proches de la théorie.

- A l'application d'une force de 540 N, le déplacement maximal directionnel suivant l'axe y pour l'éprouvette en :

- Chromage dur est : 0.9 mm
- Carbure de tungstène base cobalt est : 0.38mm

Ces résultats confirment notre supposition, que le WC-Co est plus résistant par rapport au chromage dur.

4.5 Influence des principaux paramètres en projection thermique HVOF

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

Ils consistent en les paramètres de la torche, le débit de matières premières, la distance de projection, l'angle de projection et la température du substrat.

4.5.1 Paramètres de la torche

La torche est l'endroit où se mélangent les gaz avec la poudre alimentée et la combustion se produit. Le principal composant de la torche est la buse. Cette dernière se détériore après chaque utilisation et un arrangement est nécessaire après 16 heures de projection. Un surdimensionnement de la buse peut produire de chutes de pression des gaz ce qui causerait une réduction dans la vitesse des particules affectant la qualité des revêtements. La buse ainsi que les autres composants de la torche (la chambre de combustion et la tête de combustion) doivent être remplacés par des composants nouveaux après 60 heures d'utilisation.

4.5.2 Débit de matières premières (Feedstock Spray Rate)

Le débit de matières premières (poudre), dans les différents procédés de projection thermique HVOF, établit le taux de déposition d'un revêtement lors du balayage avec le fusil sur les parois du substrat. Si quelques changements du débit de matières premières se présentent pendant la projection, l'épaisseur du revêtement sera inégale et les propriétés du revêtement peuvent varier considérablement. Le débit de matières premières doit être équilibré en concordance avec la source d'énergie d'entrée (flamme) afin de stabiliser la vitesse et température des particules sortantes du fusil. Un débit trop faible entraînera des vitesses des particules trop basses ce qui réduirait la densité des revêtements ainsi que les contraintes résiduelles résultantes. À l'inverse, un débit trop important entraînera des températures des particules trop élevées ce qui induira de défauts microstructuraux dans les revêtements.

4.5.3 Propriétés inhérentes aux particules pendant la projection thermique HVOF

Les principales propriétés associées aux particules pendant la projection HVOF sont leur température (fusion) et leur vitesse (accélération) avant l'impact sur le substrat. La vitesse et la température des particules déterminent les propriétés résultantes des revêtements et dans de nombreux cas, permettent une meilleure compréhension du procédé.

Ces deux propriétés sont expliquées dans les paragraphes suivants.

- **Vitesse de particules**

La vitesse d'une particule, projetée à l'aide d'un procédé de projection thermique, dépend principalement de la taille de la particule, de sa densité et la distance de projection, comme le montre la figure suivante pour des poudres d'alumine.

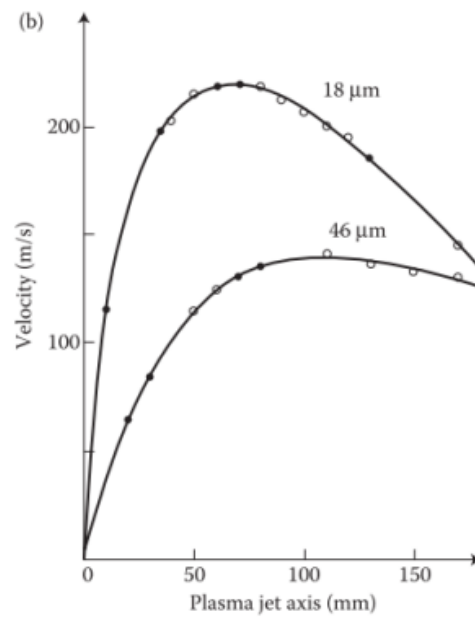


Figure IV.22 Effet de la taille de particule (18 μm et 46 μm) sur l'évaluation de la vitesse d'une particule en fonction de la distance de projection d'une poudre d'alumine obtenue avec la projection au plasma. [33]

Les particules plus petites (18 μm) vont plus vite que les plus grosses particules (46 μm). La vitesse maximale est atteinte entre 40 et 70 mm pour les petites particules. Au-delà, elles tendent à diminuer à cause de la friction avec l'air. Il n'y a quasiment de max/min pour les particules de 46 μm et la vitesse se stabilise autour de 100 mm.

- Température de particules

Comme dans le cas de la vitesse, la taille des particules et la distance de projection ont un impact sur la température des particules pendant la projection thermique pour des poudres d'alumine.

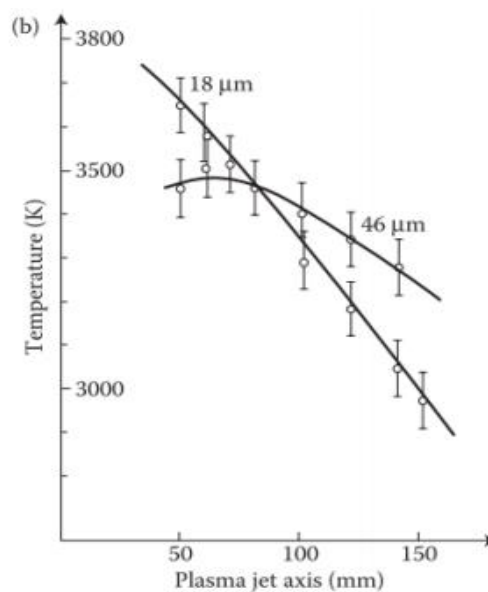


Figure IV.23 Effet de la taille des particules sur l'évaluation de la température d'une particule [33]

Selon la figure suivante, les particules qui sont plus petites ($18 \mu\text{m}$) deviennent plus chaudes que les plus grosses particules ($46 \mu\text{m}$) pour les courtes distances de projection entre (50 et 80 mm).

4.5.4 Distance de projection

La distance de projection est définie comme la distance existant entre la sortie de la buse et la surface du substrat à traiter. Généralement, pour les procédés HVOF elle se trouve dans une plage de 150 à 300mm. La distance de projection affecte les conditions de vitesse et température des particules dans le trajet vers la surface du substrat. Une distance de projection trop importante génère un effet de cône dans les particules, ce qui conduit à la décélération et refroidissement des particules lors de l'impact. De plus, un effet de rebond des particules sur les substrats est généré provoquant une possible inclusion des particules non fondues dans les revêtements. En même temps, cela résulte d'un faible taux de déposition pour les revêtements. Par contre, une distance trop courte peut conduire à un surchauffage des substrats réduisant le temps de vol de particules altérant les propriétés mécaniques du substrat.

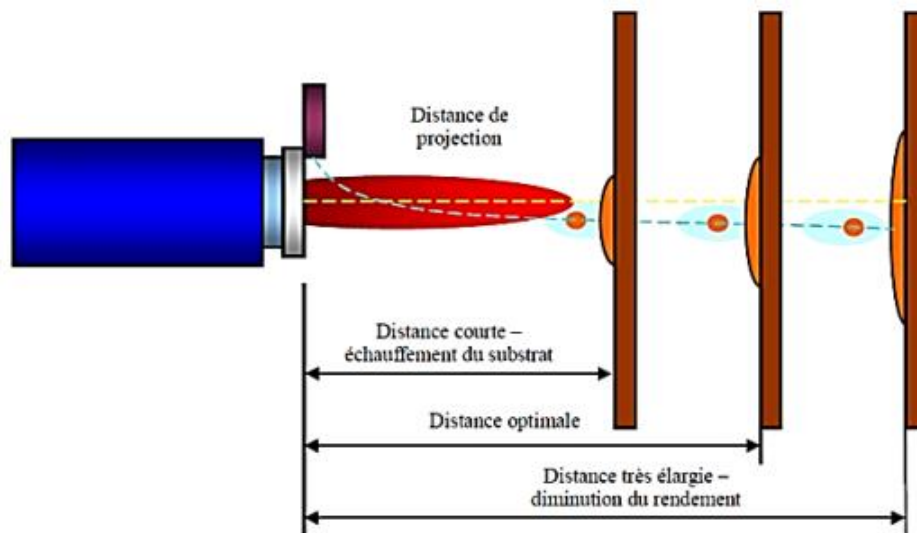


Figure IV.24 Schéma de distance de projection dans les procédés de projection thermique [33]

4.5.5 Angle de projection

L'angle de projection est défini comme l'angle existant entre la direction du jet supersonique et la surface du substrat couverte par les particules. Quel que soit l'angle choisi, il doit être maintenu constant pendant toute l'opération de projection. Typiquement, les angles de projection utilisés dans les procédés thermiques HVOF sont de $90^\circ \pm 20^\circ$. Lorsque l'angle de projection diminue, un bas rendement de la déposition se génère, alors que la porosité des revêtements augmente, ce qui résulte d'une microstructure peu uniforme ayant de pauvres propriétés mécaniques.

4.5.6 Température du Substrat

L'interaction particules/substrat est différente lorsque le substrat est chaud et lorsqu'il est à température ambiante. Il a été montré que, sur des substrats à haute température (environ 300- 400 °C), les particules projetées ont tendance à former des disques bien formés et distribués.

Tandis que, sur des substrats à température ambiante, les particules ont tendance à casser dans de nombreuses gouttelettes conduisant à la formation de floccs déformés.

4.6 Conclusion

Après la simulation des différents essais, on a pu affirmer qu'un revêtement en carbure de tungstène base cobalt est bien meilleur qu'au revêtement en chromage dur, et cela en compression et en flexion surtout. Par contre en traction, le chromage dur a un léger avantage par rapport au premier.

On a terminé ce chapitre en citant les principaux paramètres en projection thermique HVOF, et comment de tels détails peuvent avoir une influence sur le revêtement obtenu.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le chromage dur est un procédé électrolytique bien établi utilisé dans de nombreuses applications industrielles (pétrochimie, pâte à papier, industrie aérospatiale et machines) pour produire des revêtements résistants à l'usure. Un de ses principaux défauts est la contamination de l'environnement causée par le comportement toxique de l'électrolyte et du chrome hexavalent. Cela entraîne des coûts importants d'élimination des déchets. Les revêtements en chromage dur ont des contraintes résiduelles de traction élevées qui provoquent des fissures de surface. Ces revêtements ont également une faible ductilité. L'évolution de l'hydrogène pendant le placage peut entraîner une fragilisation du matériau du substrat.

De sérieux facteurs de réduction de la fatigue sont utilisés qui entraînent une pénalité de poids importante. Parmi les autres inconvénients du chromage dur, on peut citer les faibles taux de dépôt, la protection limitée du substrat contre la corrosion et le coût élevé du post-traitement du revêtement.

Les revêtements projetés au plasma représentent quelques alternatives au chromage dur mais ils permettent de réaliser une percée mondiale. Les revêtements HVOF avec une densité et une adhérence accrue et une oxydation et une porosité réduites semblent être un candidat sérieux pour le remplacement de chromage dur.

Un avantage important du HVOF est aussi qu'il permet un choix correct des revêtements pour différentes applications industrielles qui pourraient concurrencer avec succès. En comparant les paramètres typiques du procédé et de l'application des revêtements en chromage et ceux obtenus par pulvérisation HVOF. Le procédé HVOF a démontré les avantages suivants :

- Meilleure résistance à la corrosion et meilleure adhérence,
- Un contrôle adéquat des processus,
- Applicabilité à une gamme plus large de substrats,
- Efficacité accrue en cas de réparation locale et obtention de nouvelles pièces de revêtement locales
- Une plus grande variété de matériaux de revêtement qui répondent aux exigences des différentes applications industrielles,
- Vitesse de dépôt plus élevée pour les pièces industrielles de taille moyenne,
- Possibilité d'obtenir une plus grande épaisseur de revêtement, nécessaire pour certaines applications de réparation ;
- Moins d'étapes de traitement et un débit plus rapide,

- Aucune limitation de la taille des pièces
- Un impact environnemental important grâce à une diminution des déchets annuels, une réduction considérable des déchets dangereux et une diminution significative des coûts de prévention de la pollution.

Références bibliographiques

- [1] Cour de formation sur le compresseur, centrifuge, nuovo pognone, SONATRACH.
- [2] Aurélien Marsan. Analyse et contrôle des écoulements en compresseur centrifuge avec diffuseur aspiré. Ecole Centrale de Lyon, 2013.
- [3] BENREZZAK Samir, Étude de la performance d'un Compresseur centrifuge multi-étages K101 A de la station d'Oued Noumer, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2012
- [4] BEKHTI Mohammed et BELLAHBIB Abdallah, Etude technologique et énergétique d'un compresseur centrifuge BCL 606-3/A dans la station Booster-Nord de Hassi-Rmel –SONATRACH Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2018
- [5] Gregory K. McMillan - Centrifugal and Axial Compressor Control - Instructor's Guide-ISA (1983)
- [6] RANDALL R., « L'analyse cepstrale et le diagnostic des défauts dans les réducteurs/multiplicateurs », note d'applications Brüel & Kjaer, BO 306-11. Traduction par B. Bennevault et C. Pachaud.
- [7] Nabti Mohamed Tahar « Etude de l'évolution des indicateurs spectraux et cepstraux dans la détection des défauts mécaniques » thème de magister université FARHAT Abas Sétif, 2011.
- [8] KADDOURI Ibrahim, SERAH Youcef, Détection des défauts d'une machine tournantes par l'analyse FFT, Université Mohamed BOUDIAF - M'SILA, 2019.
- [9] HACHEMI Mohammed, Application de l'ODS à l'analyse des problèmes de vibration des machines tournantes, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2012
- [10] Landolsi Foued. Cours de techniques de surveillance « Etude des principaux défauts ».
- [11] KHELFI Ilyes, « Diagnostiques des machines tournantes par les techniques d'intelligences artificielles » Université BADJ Mokhtar, Annaba 2014
- [12] TEDJINI Mohsein « Sélection d'un outil du traitement du signal pour le diagnostic d'une machine tournante. », Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk-Ahras, 2015.
- [13] A. Djebala. Application de la transformée par ondelettes à l'étude et l'analyse vibratoire des systèmes mécaniques. Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba,2008.
- [14] J. DUMONT-FILLON, "Contrôle non destructif (CND)", technique de l'ingénieur R1400, 1996
- [15] ACI COMMITTEE 228, "Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete Structures".
- [16] M. Perdrix, Principe du contrôle non destructif par courants de Foucault. CAST, INSA de Lyon (Institut National des Sciences Appliquées) Volume 32, Issue 5, September 1994,
- [17] A. Lamber, J. Rivenez et G. Waché, « Les contrôles non destructifs, Généralités ». Centre technique des industries mécaniques, Senlis, 1994.

- [18] (Balkema_ Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Earth Sciences) Gerhard Busse, Danny Van Hemelrijck, Igor Solodov, Athanasios Anastasopoulos - Emerging technologies in non-destructive test.
- [19] Harry D. Moore - Materials and Processes for NDT (NonDestructive Testing) Technology - American Society for Nondestructive Testing (1984)
- [20] Ala Eddine Lakhdari, " Etude et modélisation de capteurs en CND par courants de Foucault ", Mémoire de Magister, Spécialité électrotechnique, Option Electricité industrielle, Université Mohamed Khider – Biskra, 2011.
- [21] Medani, Akrou, 'Etude du contrôle non destructif par courant de Foucault en utilisant la méthode des éléments finis ' Spécialité : Machine Electrique, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, 2017
- [22] ROBERT LEVEQUE – traitements et revêtements de surface des métaux – Dunod édition, paris 2007.
- [23] JACQUES DERUELLE –traitements des métaux - préparation de surface – techniques de l'ingénieur édition ,1998
- [24] DAVID A. STEPHENSON, JOHN S. AGAPIOU - Metal Cutting Theory and Practice, CRC press 3rd Edition, 2016
- [25] MICHEL RUIIMI - traitements de surface des matériaux par voie humide, edp sciences édition, 2013.
- [26] Younes EL KACIMI Procédés de traitement de surface et revêtements industriels : États des lieux et perspectives de développements
- [27] Dimitri DEL PIANTA, 'Détermination des paramètres physicochimiques régissant l'électrodéposition d'une couche de chrome métallique à partir d'une solution à base de chrome trivalent, Université de Pau et des pays de L'Adour, 2017
- [28] LALONDE, Jean-François, 'Contribution aux techniques de mesure des contraintes résiduelles des pièces brutes et usinées par diffraction aux neutrons', MONTREAL, 2009
- [29] El-Sharif, M.; McDougall, J.; Chisholm, C.U. Electrodeposition of Thick Chromium Coatings from an Environmentally Acceptable Chromium (III)-Glycine Complex. Transactions of the Institute of Metal Finishing, 1999
- [30] Korshunov, V.N.; Safonov, V.A.; Vykhodtseva, L.N. Structural Features of the Electrode/Solution Interface at the Reduction of $Cr^{3+}(Aq)$ Cations on Liquid Mercury and Solid Indium Electrodes in Acidic Media. Russian Journal of Electrochemistry, 2008.

[31] BUSCARLET, E. POLTI, J. et RAMEAU, J.J. - Les revêtements par immersion dans les métaux fondus et les bains de sels fondus. Traitement de surface et protection contre la corrosion. Editions de Physique, 1989

[32] Material Science and Engineering, Fatigue and deformation of HVOF sprayed WC–Co coatings and hard chrome plating. A. Ibrahim, CC Berndt.

[33] Alfonso QUINTERO MALPICA, caractérisation des revêtements par projection thermique à haute vitesse obtenus à partir de différentes poudres de WC-10Co-4Cr pour des applications en aéronautique, Mémoire : mécanique : école de technologie supérieure université du Québec, 2016

Sitographie

- [34] www.tmn-industrie.fr
- [35] www.otelo.fr
- [36] www.epsilon-tolerie.fr
- [37] www.stm24.fr
- [38] <https://www.wheelabratorgroup.com>
- [39] <http://www.surfatec.org/>
- [40] <http://www.aps-coatings.com>
- [41] <https://sint-technology.com/fr/contraintes-residuelles/>
- [42] <https://conceptec.net/fr/techniques-de-base/materiaux/25-essais-et-controles/13-essai-de-durete>
- [43] <https://www.bodycote.com/fr/services/hip/>
- [44] <https://www.hannecard.com>