

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique
En collaboration avec Talleres Mecánicos Comas et SONATRACH
Mémoire de Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique.

Méthodologie de suivi et de réparation d'une tige de piston d'un compresseur alternatif

Réalisé par : Zakaria KHIER
Présenté et soutenu publiquement le 18/07/2019

Devant le Jury :

Président	M. Arezki SMAILI	Professeur	ENP
Rapporteur/ Promoteur	M. Said RECHAK M. Mohamed BENBRAIKA	Professeur MA-A	ENP ENP
Examineur	M. Yacine BELKACEMI	MC-A	ENP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique
En collaboration avec Talleres Mecánicos Comas et SONATRACH
Mémoire de Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique.

Méthodologie de suivi et de réparation d'une tige de piston d'un compresseur alternatif

Réalisé par : Zakaria KHIER
Présenté et soutenu publiquement le 18/07/2019

Devant le Jury :

Président	M. Arezki SMAILI	Professeur	ENP
Rapporteur/ Promoteur	M. Said RECHAK M. Mohamed BENBRAIKA	Professeur MA-A	ENP ENP
Examineur	M. Yacine BELKACEMI	MC-A	ENP

Dédicace

A mon ami

A mon compagnon

A mon frère

Abdellah Gramloul

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Dieu parce que c'est à Lui que je suis reconnaissant. Il a honoré ma vie d'opportunités qui, je le sais, ne sont pas de ma main ou d'une autre main. Il m'a montré que c'est un fait scientifique que la gratitude est réciproque.

Pour ma famille, c'est ce que j'attends avec impatience. À mon père qui m'a donné les piliers fondamentaux de ma personnalité, qui m'a appris les concepts de l'honneur, le courage, la persévérance, le pouvoir de la détermination et comment rester fidèle à mes principes. Plus précisément comment être un homme.

Pour mes amis que je considère comme ma vraie famille, de vrais frères, mes compagnons dans la vie : Abdellah Gramloul, Anis Kharoum, Nawfel Ait Seddik, Sami Salim Belhouari, Faiz Belkacemi, Adel benganem, le courage que vous me donnez chaque jour pour que je passe la porte est sans pareil. Vous êtes les personnes de ma vie qui m'inspirent le plus.

Pour mon binôme et mon cher ami, Walid Fekkane, grâce à ton soutien, ta patience et ta tolérance j'ai pu continuer dans ma carrière sportive professionnelle et décrocher mon diplôme d'ingénieur

Pour mes enseignants, en général tous ceux qui ont contribué à ma formation depuis ma 1^{er} classe au primaire jusqu'aujourd'hui, en particulier ceux dans mes études supérieures pour que je puisse devenir l'ingénieur que je suis aujourd'hui.

Pour les quatre enseignants qui m'ont inspiré le plus dans mes études, messieurs Mohamed Slimani et Omar Mairadji, grâce à vous que mon esprit mathématique et mon raisonnement sur des phénomènes physiques a vu la lumière, messieurs Rechak Said et Benbraïka Mohamed, grâce à vous que j'ai pu raffiner ma vision en tant qu'ingénieur.

Pour les jurys, messieurs Arezki Smail et Yacine Belkacemi tout d'abord vous n'êtes pas seulement des membres de jury mais des professeurs qui m'inspirent beaucoup par leur savoir-faire, façon de faire et façon d'être. Vous être des modèles que je compte suivre dans le futur.

Je vous remercie

ملخص :

في دراستنا حول تحليل منهجية الصيانة لقضبان الضاغط الترددية المستخدمة في مجمع GP1Z، درسنا الطرق المستخدمة من قبل الفنيين في المجمع للكشف عن العيوب واقترحنا طرق بديلة أخرى. قبل إجراء تحليل تفصيلي لإجراءات الإصلاح على قضيب الضاغط الترددي الذي تقوم به الشركة الإسبانية TM Comas لصالح المجمع، قمنا بإجراء قراءة بيبليوغرافية واسعة حول تقنيات التشخيص والتحضير وإعادة الشحن وكذلك الفحص اللاحق للقضبان من خلال أبرز العمليات، وهي الإسقاط الحراري بالليزر وإسقاط HVOF. من خلال تحليل حالة القضيب، اقترحنا تقنية تم تطويرها مؤخرًا، وهي المكبس العائم الحر الذي يمكن دمجه مع تقنية إعادة التحميل لإعطاء عمر أطول لقضيب المكبس وضاغطه.

الكلمات الدالة : تحليل الاهتزاز - مؤشر الاهتزاز - معالجة الإشارة - اختبار غير مدمر - تفجير طلقة - رش حراري - إعادة تعبئة - الكسوة الليزرية - مكبس عائم مجاني.

Abstract :

In our study on the analysis of the maintenance methodology for reciprocating compressor rods used at the GP1Z complex, we studied the methods used by the technicians of the complex for defect detection and suggested other alternative methods. Before analysing in detail the repair procedure on the reciprocating compressor rod carried out by the Spanish company TM Comas for the benefit of the complex, we made a broad bibliographical reading on the techniques of diagnosis, preparation and recharging as well as the subsequent inspection of the rods by the most prominent processes, namely Laser Cladding and HVOF thermal projection. Through the analysis of the rod case, we have proposed a recently developed technique; the free floating piston which can be combined with the reloading technique to give a longer life to the compressor rod and piston.

Keywords: Vibration analysis- vibration indicator - signal processing - non-destructive testing - shot blasting - thermal spraying - HVOF - refilling - Laser cladding - free floating piston.

Résumé :

Dans notre étude sur l'analyse de la méthodologie de maintenance des tiges de compresseur alternatif utilisées au niveau du complexe GP1Z, nous avons étudié les méthodes utilisées par les techniciens du complexe pour la détection de défauts et avons suggéré d'autres méthodes alternatives. Avant d'analyser de façon poussée la procédure de réparation sur la tige du compresseur alternatif faite par l'entreprise espagnole TM Comas au profit du complexe, nous avons fait une lecture bibliographique large sur les techniques de diagnostic, de préparation et de rechargement ainsi que le contrôle à posteriori des tiges par les procédés les plus en vue à savoir le Laser Cladding et la projection thermique HVOF. A travers l'analyse du cas de la tige, nous avons proposé une technique élaborée récemment, le free floating piston qui peut se conjuguer à la technique de rechargement pour donner une durée de vie plus longue à la tige et au piston du compresseur.

Mots clé : Analyse vibratoire- indicateur vibratoire – traitement de signal - contrôle non destructif – grenailage - projection thermique -HVOF -rechargement- Laser cladding – free floating piston.

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction Générale.....	11
Chapitre 1:Suivi de la tige de piston	14
1.1) Introduction	14
1.2) Principaux défauts d'une machine tournante et leurs manifestations	14
1.2.1) Balourd	14
1.2.2) Manifestation	14
1.2.3) Origine des différents types de balourds [1].....	15
1.2.2) Concentricité [1]	16
1.2.2.1) Manifestation	17
1.2.3) Défauts de serrage [2].....	18
1.3) Méthode de suivi et détection de défaut au niveau du complexe GP1Z.....	19
1.3.1) Valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square).....	20
1.3.2) Indicateur de crête.....	20
1.3.3) Kurtosis.....	20
1.4) Contrôle métrologique	25
1.5) Proposition.....	27
1.5.1) Les ondelettes	27
1.5.2) Séparation aveugle de source [6].....	28
1.5.3) Inefficacité des indicateurs vibratoire globale (RMS, Kurtosis)	29
1.5.4) L'efficacité du traitement de signal par la méthode de Séparation aveugle de sources : ..	31
1.6) Conclusion.....	33
Chapitre 2 : Le contrôle non destructif.....	35
2.1) Introduction	35
2.2) Les types de contrôle.....	35
2.2.1) Le contrôle en cours de fabrication	35
2.2.2) Le contrôle de réception	36
2.2.3) Le contrôle en service	36
2.3) Les méthodes de contrôle non destructif.....	37
2.3.1) Définitions	37
2.3.2) Contrôle par examen visuel (VT)	37
2.3.3) Contrôle par ressuage (PT)	38

2.3.4) Contrôle radiologique (RT)	38
2.3.5) Contrôle par ultrasons (UT).....	39
2.3.6) Émission acoustique (AT)	39
2.3.7) Thermographie (TT)	39
2.3.8) Magnétoscopie (MT)	40
2.3.9) Contrôle d'étanchéité (LT).....	40
2.3.10) Contrôle d'étanchéité ITM TODA-15.....	40
2.3.10) Courants de Foucault (ET).....	41
2.3.11) Méthodes couplées	41
2.3.12) Acoustique non linéaire	41
2.4) Procédure de CND	41
2.5) Principe de la détection d'un défaut	41
2.6) Contrôle par ultrasons (UT)	43
2.6.1) Nature des ondes ultrasonore [9].....	44
2.6.2) Principe de contrôle par ultrasons [8].....	46
Chapitre 3 : Préparation et Revêtement de la tige	48
A- Préparation	48
3.1) Localisation des défauts	48
3.2) Elimination de la couche de chromage	48
3.3) Préparation des surfaces à revêtir	48
3.3.1) Dégraissage.....	48
3.3.2) Grenailage [12]	48
B- Revêtement.....	49
3.4) Rechargement.....	49
3.4.1) Définition.....	49
3.4.2) Rechargement laser (Laser cladding)	49
3.4.3) Applicabilité de revêtement laser	52
3.4.4) Revêtement au laser et méthodes conventionnelles.....	53
3.4.5) Méthodes de revêtement au laser.....	54
3.4.6- Propriétés des couches de revêtement	56
3.5) Projection thermique	58
3.5.1) Introduction	58
3.5.2) La projection à la flamme supersonique HVOF : Principe et fonctionnement.....	58
3.5.3) Les différents types d' H.V.O.F.....	59

3.5.4) Influence des principaux paramètres en projection thermique HVOF	61
3.5.5) Méthodes de caractérisation des poudres	66
a) Distribution granulométrique	67
b) Densité apparente.....	67
c) Coulabilité	67
d) Morphologie	67
3.6) Cas d'application.....	68
3.6.1) Revêtement par HVOF	68
3.6.1.4) Choix de la poudre.....	71
3.6.1.5) Les paramètres de projection.....	74
3.6.2) Rechargement par laser cladding.....	76
3.6.2.1) Choix de la méthode	76
3.6.2.2) Substrat	77
3.6.2.3) Choix de la poudre.....	77
3.6.2.4) Les paramètres d'injection.....	78
3.7) Rectification de la cote :.....	79
3.8) Contrôle non destructif par ultrason après la réparation	80
3.9) Proposition: free floating piston	80
3.9.1) Processus de l'endommagement	80
3.9.1.1) Introduction	80
3.9.1.2) Notion d'écaillage.....	81
3.9.1.3) Endommagement en fatigue d'un composant.....	82
a- Fatigue et endurance	82
3.9.2) La cause de la panne.....	84
Le principe de la proposition « free floating piston ».....	86
Conclusion générale	89
Bibliographie et sitographie :	90

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : les derniers relevés vibratoires avant la détection de la panne	25
Tableau 1.2 : contrôle métrologique de la tige avant la réparation	26
Tableau 1.3 : les mesures des différents points de chaque tige de piston du compresseur	27
Tableau 3.1 Propriétés des couches plaquées	56
Tableau 3.2 : comparaison des différents paramètres de deux types de HVOF	60
Tableau 3.3 : Composition chimique (%massique)	69
Tableau 3.4 : les propriétés mécaniques d'une éprouvette en SCM440	69
Tableau 3.5 : comparaison entre HVOF et chromage dure	71
Tableau 3.6 : sélection des matériaux	72
Tableau 3.7 : critères d'acceptabilité	72
Tableau 3.8: composition chimique	73
Tableau 3.9: propriété thermochimiques du carbure de tungstène	73
Tableau 3.10: les propriétés mécaniques de WC-Cr-Co	74
Tableau 3.11 : les paramètres et conditions de projection	76
Tableau: 3.12 Composition chimique (% massique) de 410L	77
Tableau 3.13 : propriété mécanique de la poudre 410L	78
Tableau 3.14 : condition de processus pour des différentes poudres	79
Tableau 3.15 : les paramètres et conditions de projection de laser cladding	79
Tableau 3.16 : illustration des garnitures d'étanchéité et leurs propriétés liées à l'étude	85
Tableau 3.17 : propriétés mécaniques de la tige de piston liée à l'étude	85

Liste des figures

Figure 1.1 : Ecart d'usinage (excentricité et parallélisme)	14
Figure 1.2 : Spectres fréquentiels du défaut de balourd	15
Figure 1.3: Evolution brutale de la vibration du balourd	16
Figure 1.4 : Défaut de concentricité	16
Figure 1.5 : Spectre du défaut de concentricité	18
Figure 1.6 : Défaut d'usure d'accouplement	19
Figure 1.7 : Position de mesure vibratoire au niveau du compresseur	21
Figure 1.8 : les valeurs vibratoires horizontales du compresseur de la 3eme phase de la tige de piston du 1 ^{er} étage A	22
Figure 1.9 : les valeurs vibratoires verticales du compresseur de la 3eme phase de la tige de piston du 1 ^{er} étage A	22
Figure 1.10 : les valeurs vibratoires Axiales du compresseur de la 3eme phase de la tige de piston du 1 ^{er} étage A	23
Figure 1.11 : les valeurs vibratoires horizontales du compresseur de la 3eme phase de la tige de piston du 3 ^{ème} étage	23
Figure 1.12 : les valeurs vibratoires verticales du compresseur de la 3eme phase de la tige de piston du 3 ^{ème} étage	24
Figure 1.13: les valeurs vibratoires axiales du compresseur de la 3eme phase de la tige de piston du 3 ^{ème} étage	24
Figure 1.14 : contrôle de déflexion de la tige de piston	26
Figure 1.15 : transformé en continue d'une fonction f(t)	28
Figure 1.16 : Histogramme des indicateurs statistiques calculés pour le cas sans défaut et le cas avec défaut de barre rotorique cassée	30
Figure 1.17 : emplacement des capteurs sur le rotor	31
Figure 1.18 : Le spectre de puissance du signal de vibration mixte à chacun des capteurs de l'arbre	32
Figure 1.19 : Le spectre de puissance du signal de vibration après séparation	32
Figure 2.1 : type d'application	37
Figure 2.2 : Principe général du CND	42
Figure 2.3: Principe du contrôle non destructif (méthode de flux)	43
Figure 2.4: Types d'ondes et modes de propagation des ultrasons dans un solide	45
Figure 3.1 : les abrasifs ronds et angulaire utilisé dans le grenailage	49
Figure. 4.1 : La pièce effectue un mouvement relatif par rapport au faisceau laser. La zone exposée par le faisceau laser est traitée. Les zones plus grandes peuvent être traitées en appliquant plusieurs pistes adjacentes.	50
Figure 4.2 Les traitements de surface au laser se distinguent par la température de surface (phase solide / bain de fusion) et par l'addition de matériau.	51

Figure 3.4 : Alliages, dispersions et gaines au laser. La partie droite de l'image indique la répartition des éléments ajoutés, mesurée de haut en bas au centre de la piste.	52
Figure 3.5 : Revêtement laser à deux étages (pré placé) et à un étage (in-situ)	54
Figure 3.6 : Coupe d'une seule couche de revêtement avec définition de la géométrie du revêtement: hauteur de revêtement (h_c), profondeur de revêtement (d_c), hauteur totale de revêtement (t_c) et largeur de revêtement (w_c).	57
Fig. 3.7 Porosité entre les couches.	58
Figure 3.8: Pistolet HVOF à carburant gaz	59
Figure 3.9 : Pistolet HVOF à carburant liquide	59
Figure 3.10 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.	62
Figure 3.11: Effet de la taille des particules (18 μm et 46 μm) sur l'évaluation de la température d'une particule en fonction de la distance de projection d'une poudre d'alumine obtenue avec la projection au plasma.	64
Figure 3.12 : Schéma de distance de projection dans les procédés de projection thermique. Tirée de	65
Figure 3.13 Morphologies des particules de poudre.	68
Figure 3.14: éprouvette model Jis Z 2201-5	69
Figure 3.15: un diagramme de processus du second ordre liant la température à la vitesse généralisée pour le revêtement HVOF du carbure de tungstène (WC-Co-Cr-Ni)	75
Figure 3.16 : Micrographie de la poudre de 410L	78
Figure 3.17 : Loi de dégradation	80
Figure 3.18 : Ecaillage d'une surface	81
Figure 3.19 : Initiation des fissures : (a) par une aspérité, (b) par une particule étrangère, (c) par un défaut de surface, (d) par une impureté en sous couche	82
Figure 3.20 : Papillon et fissure amorcée autour d'une inclusion	84
Figure 3.21: positionnement des garnitures d'étanchéité au niveau de la tige de piston	84
Figure 3.22 : le principe du free floating piston	87
Figure 3.23 : clapet anti-retour	88
Figure 3.24 : buses d'écoulement	88

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 à 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.

L'objectif principal de ce travail est d'exploiter les procédures de suivi par le complexe GP1Z et la réparation utilisée par TM Comas afin de mieux comprendre la technique pour éventuellement l'utiliser dans d'autres situations identiques à celle effectuée au profit du complexe. Pour mener ce travail, nous avons organisé notre mémoire comme suit :

Le chapitre un où on évoque la détection de la panne. Dans ce chapitre on parle sur les principaux défauts d'une machine tournante, leurs manifestations et l'origine de ces défauts, par la suite on approfondit la méthodologie de la maintenance préventive au niveau du complexe GP1Z qui consiste en un suivi par l'analyse vibratoire et un contrôle systématique, nous clôturons cette partie par une proposition.

Le chapitre deux concerne le contrôle non destructif. Dans ce chapitre, nous traitons des techniques de contrôle non destructif où on parle sur les généralités de ce type de contrôle et d'une façon approfondie sur le contrôle par ultrason utilisé dans notre cas.

Le troisième chapitre concerne la préparation de la tige, la localisation des défauts puis la préparation de la surface. Dans ce dernier chapitre, on entame le revêtement où on détaille les deux techniques de rechargement utilisées à savoir le Laser Cladding et la projection thermique par HVOF, ensuite on analyse notre cas d'application où on exploite les données en ajoutant la partie rectification de la côte. Nous clôturons ce chapitre par notre propre proposition le « free floating piston » en introduisant pour sa compréhension quelques notions d'écaillage, du processus de l'endommagement identifiant et mécanisme de dégradation pour identifier les causes de la panne.

Nous terminons notre travail par une conclusion et des recommandations

Chapitre 1

Chapitre 1:Suivi de la tige de piston

1.1) Introduction

Dans ce modeste travail le but est de déceler le défaut naissant ainsi que son état critique afin d'optimiser les bons temps de fonctionnement et de la production du complexe GP1Z. D'après l'historique du bureau de maintenance et suivi du compresseur de la phase trois au niveau du complexe, une maintenance systématique est choisie avec un suivi préventif par le biais des indicateurs vibratoires globaux (RMS, Kurtosis, ... etc). Dans cette étude nous projetons de vérifier et valider la procédure de maintenance de la tige de piston et d'en faire par la suite une proposition complémentaire à la méthode de maintenance suivie jusqu'à présent. Pour ce faire, on présentera dans ce qui suit les outils nécessaires pour une bonne maintenance préventive.

1.2) Principaux défauts d'une machine tournante et leurs manifestations

1.2.1) Balourd

Quel que soit le soin apporté à la construction des machines, il n'est pas possible de faire coïncider l'axe de rotation avec le centre de gravité de chaque tranche élémentaire du rotor, ce qui caractérise le balourd. Il en résulte que l'arbre en rotation est soumis à des efforts centrifuges qui le déforment. Le balourd est un déséquilibre massique qui provient généralement du défaut d'usinage, d'assemblage et de l'échauffement dissymétrique du rotor lors du fonctionnement (figure 1.1). Les origines des balourds sont multiples [1]

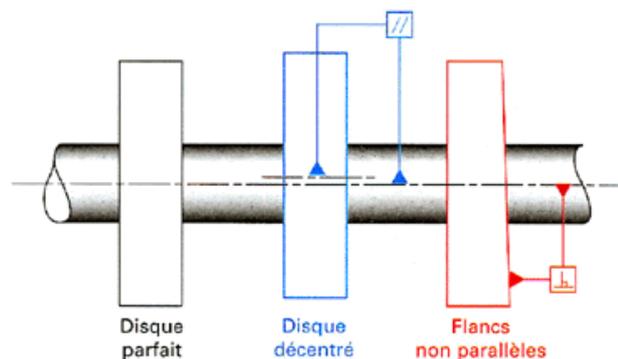


Figure 1.1 : Ecarts d'usinage (excentricité et parallélisme)[1]

1.2.2) Manifestation

- L'augmentation du niveau global choisi en basses fréquences, soit D_{cc} [10-1000Hz], soit V_{eff} [10-1000 Hz].
- La nette augmentation de l'amplitude de la fréquence fondamentale (fréquence de rotation, f_r). [1]

$$f_r = \frac{N}{60} \quad (1.1)$$

Avec :

N vitesse de rotation (tr/min).

D_{cc} : Valeur efficace du déplacement crête-crête

V_{eff} : Valeur efficace de la vitesse

Exemple : Mise en évidence d'un défaut de balourd (figure 1.2) [1]

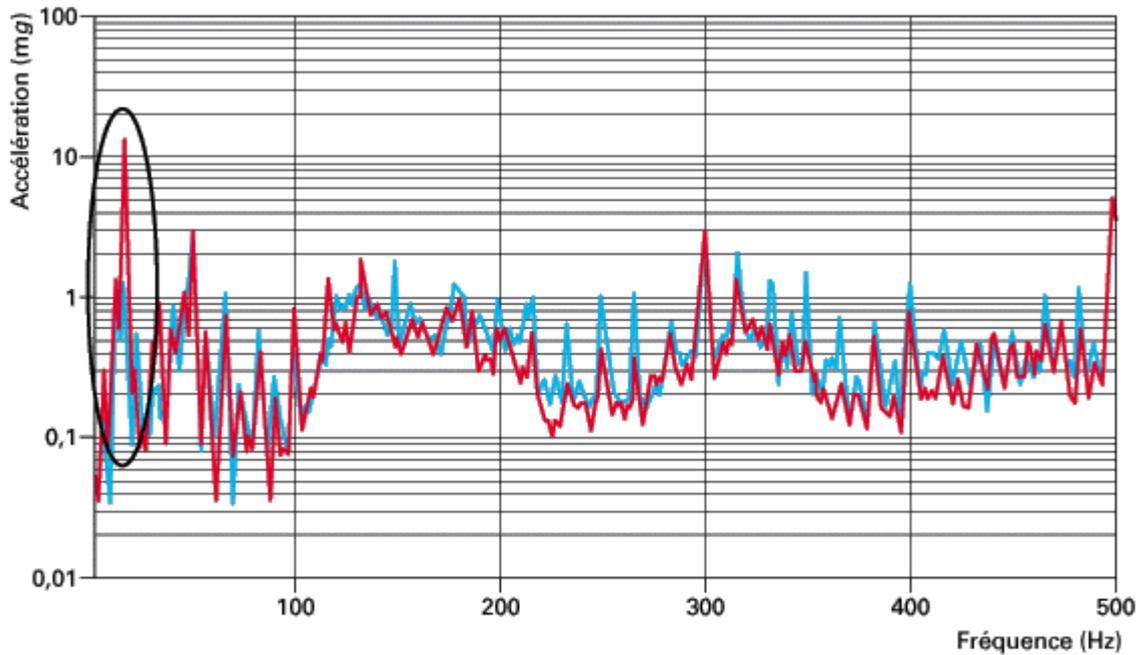


Figure 1.2 : Spectres fréquentiels du défaut de balourd.[1]

- Le spectre bleu (machine en bon état de fonctionnement) : amplitude de la fréquence fondamentale 1.323 mg pour 16.25 Hz,

- Le spectre rouge (machine en fonctionnement dégradé : défaut d'équilibrage) : amplitude de la fréquence fondamentale 14.199 mg pour 16.25 Hz.

Ce défaut n'est pas directionnel, on recueille la même image dans toutes les directions radiales (verticale, horizontale ou oblique).

1.2.3) Origine des différents types de balourds [1]

- **Balourd d'origine mécanique** : lorsqu'il y a une masse de matière qui se détache du rotor ou vient se déposer sur ce dernier (perte d'ailette ou rupture d'une aube, érosion ou dépôt de matière, fluage du rotor), on observe généralement une évolution instantanée des vibrations (figure 1.3).

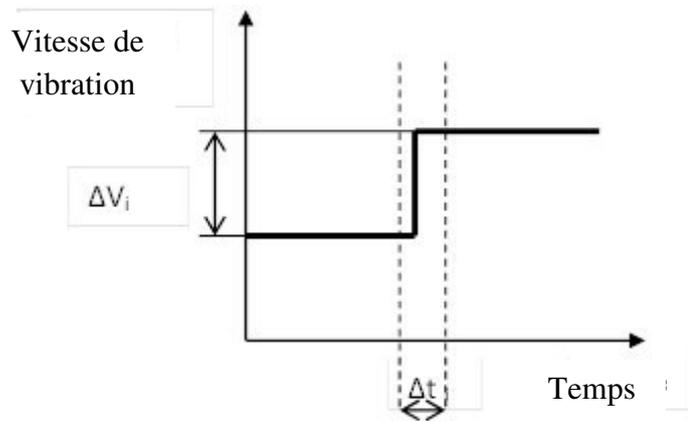


Figure 1.3: Evolution brutale de la vibration du balourd [1]

Avec :

ΔV_i : différence de vitesses de vibration

Δt : intervalle de temps de fonctionnement

- **Balourd d'origine thermique** : lorsque les rotors ne sont pas homogènes ou la température n'est pas répartie de façon uniforme, les rotors se déforment sous l'effet de contraintes thermiques :
 - Déformation des rotors de turbines,
 - Déformation des rotors d'alternateurs ou de moteurs électriques.
- **Balourd évolutif** : est dû aux frottements de l'arbre avec un des paliers de la machine et provoquant un échauffement dissymétrique.

1.2.2) Concentricité [1]

L'arbre moteur et l'arbre récepteur d'une machine ne sont pas parfaitement alignés (figure 1.4).

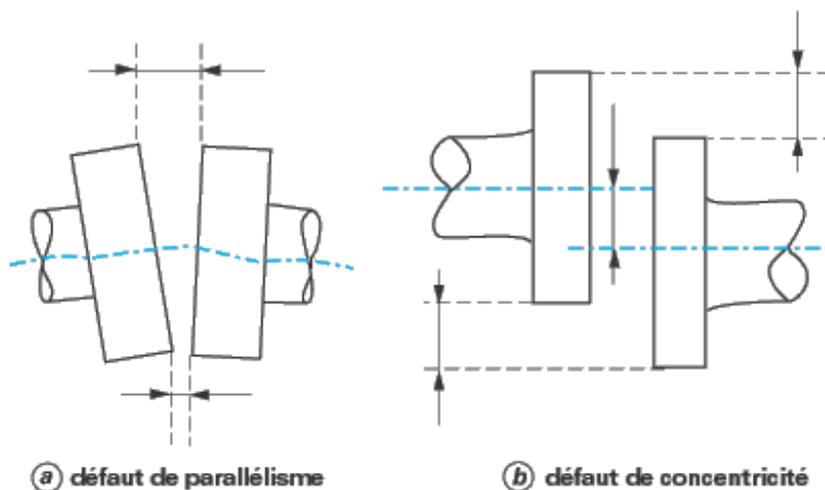


Figure 1.4 : Défaut de concentricité [1]

1.2.2.1) Manifestation

Ce défaut se manifeste au cours de :

- L'augmentation du niveau global choisi en basses fréquences Soit D_{cc} [10-1000Hz], soit V_{eff} [10-1000 Hz].

-L'augmentation des proches harmoniques de fr. Le plus souvent l'harmonique de rang 2 tend à s'élever au-delà de la fréquence fondamentale. Parfois le phénomène se transmet aux 3^{ème} et 4^{ème} harmonique. [1]

Avec :

D_{cc} : Valeur efficace du déplacement crête-crête

V_{eff} : Valeur efficace de la vitesse

Exemple : Mise en évidence d'un défaut de concentricité [1]

On ne recueille pas le même signal sur les différentes directions radiales. Ce défaut est plutôt visible sur une direction axiale (figure 1.5). Il peut être d'origine:

- Mécanique : desserrage des pieds de fixation de la machine et desserrage des éléments de transmission du mouvement de rotation,
- Thermique : croissance thermique des pieds de fixation de la machine en fonctionnement.

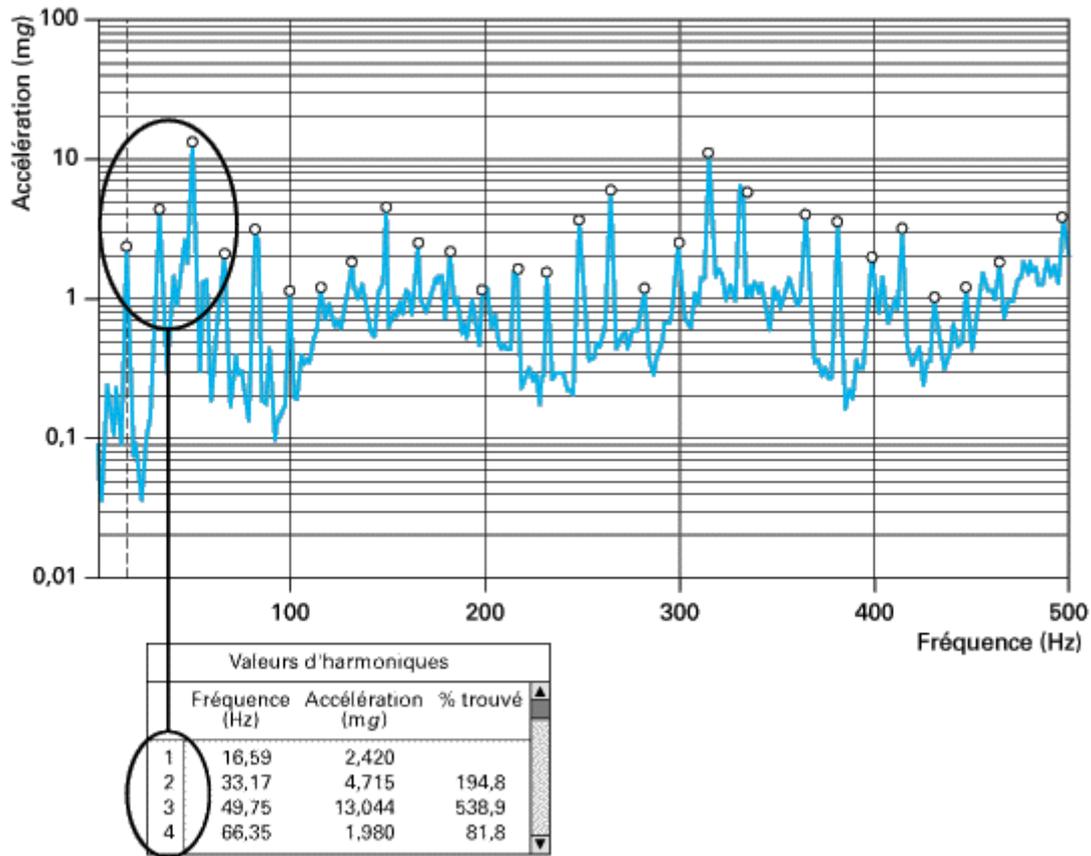


Figure 1.5 : Spectre du défaut de concentricité [1]

1.2.3) Défauts de serrage [2]

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 pic à des fréquences multiples de la fréquence de rotation. Il est également parfois possible de retrouver des pics à l'harmonique 1/2 ($1/2 \times$ la fréquence de rotation de l'arbre) et ses multiples. Les causes d'un jeu sont principalement l'usure ou un mauvais montage. Comme exemples de jeu, on peut entre autre citer : accouplement dont le caoutchouc est usé, paliers montés avec un jeu excessif, ou boulons cassés (plus de jonction mécanique). Une roue à aubes dont les aubes touchent la carcasse nous donne un défaut semblable au jeu, amplifié. La figure 1.6 montre un exemple spectre sur une machine dont le joint de l'accouplement est usé. La fréquence de rotation est de 24,25 Hz.

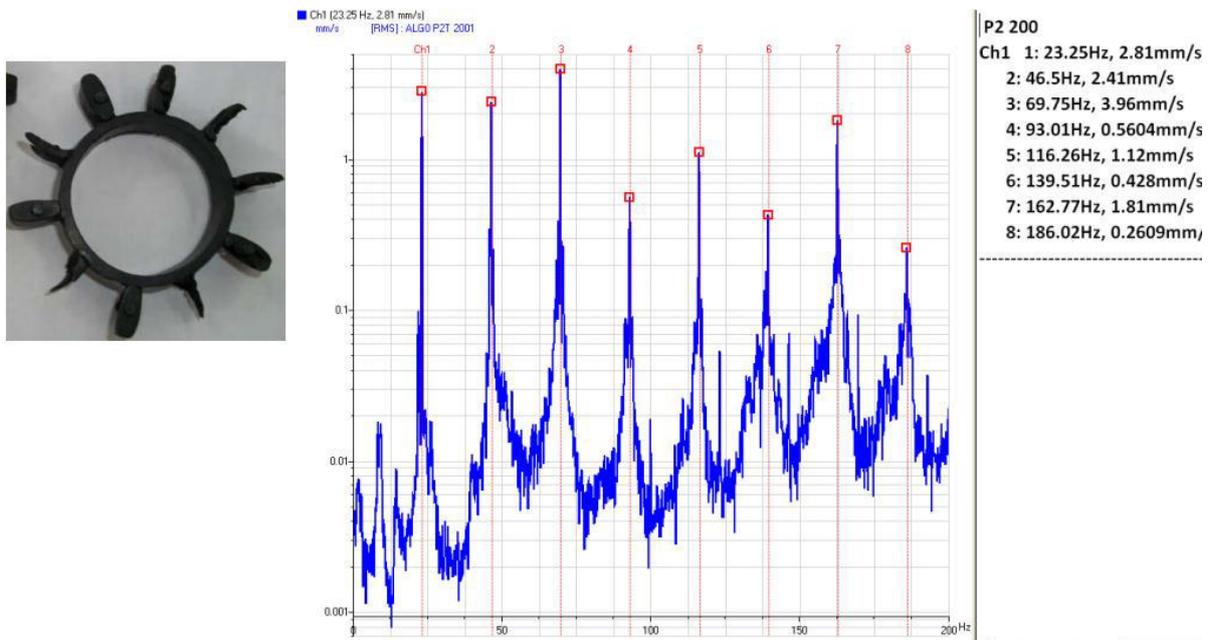


Figure 1.6 : Défaut d'usure d'accouplement [2]

En pratique, une bonne conception produira de faibles niveaux vibratoires dans une machine tournante. Cependant, la machine vieillissant, les fondations travaillent, les pièces se déforment et s'usent, et de légers changements dans ses propriétés dynamiques apparaissent. Les arbres se désalignent, les paliers s'usent, les rotors se déséquilibrent, les jeux augmentent. Tous ces facteurs se traduisent par une augmentation de l'énergie vibratoire qui excite les résonances et ajoute une charge dynamique considérable aux paliers.

Les vibrations recueillies lors des campagnes de mesures sont porteuses d'informations qui caractérisent l'état de fonctionnement de certains composants mécaniques constituant la machine analysée. C'est grâce à l'analyse de ces vibrations qu'il est possible de détecter les composants défectueux et éventuellement de les localiser. Lorsqu'un certain seuil (correspondant à un niveau de vibration limite) fixé est atteint, il est possible d'estimer la durée de vie résiduelle du composant dans les conditions de fonctionnement données à partir de la connaissance des lois d'endommagement [1].

1.3) Méthode de suivi et détection de défaut au niveau du complexe GP1Z

Le compresseur est suivi par des capteurs vibratoires pour détecter les anomalies qui se présentent pendant toute la durée de son fonctionnement (mesure online) au niveau du carter, et une mesure périodique off line effectuée par un appareil de mesure VT 80 (vibro-test Brüel & Kjaer Vibro), les valeurs sont ensuite enregistrées dans un logiciel par les inspecteurs afin de suivre le comportement de la machine. Les indicateurs vibratoires exploités par l'appareil de mesure au niveau global : RMS, Kurtosis, Valeur crête. Le traitement se fait par la méthode Transformation de

Fourier rapide **FFT (fast Fourier transform)**. Dans les paragraphes suivants on va exposer les modèles mathématiques des indicateurs vibratoires.

1.3.1 Valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square)

C'est un indicateur scalaire (large bande) très utilisé bien qu'il soit peu significatif et s'écrit :

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [x(n)]^2} \quad (1.2)$$

Où $x(n)$ est le signal temporel mesuré, N_e représente le nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

Globalement, la valeur efficace ne détecte pas tous les défauts et donne une alarme tardive, ce qui représente un inconvénient majeur dans la maintenance prédictive. [1]

1.3.2 Indicateur de crête

Contrairement à la valeur efficace de l'amplitude d'un signal, les indicateurs spécifiques comme le facteur de crête ou le Kurtosis sont mieux adaptés pour représenter un signal induit par des forces impulsionnelles tels que le phénomène d'écaillages. Ces indicateurs sont issus des valeurs crêtes [1] du signal temporel mesuré. Le facteur crête, défini comme étant le rapport entre la valeur crête et la valeur efficace.

$$FC = \frac{\sup|x(n)|}{\sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [x(n)]^2}} \quad (1.3)$$

Le facteur crête a l'avantage de détecter les défauts avant la valeur efficace. Ceci provient du fait que pour un roulement sans défaut, le rapport reste sensiblement constant et augmente lorsqu'une dégradation apparaît alors que la valeur crête croît pendant que la valeur efficace reste à peu près constante [1]

1.3.3 Kurtosis

C'est un indicateur permettant de caractériser la nature impulsive d'un signal et la détection précoce d'un défaut. Dans le cas d'un écaillage, la distribution des amplitudes contenues dans le signal recueilli est gaussienne ce qui entraîne une valeur de Kurtosis proche de 3. Lorsqu'un défaut est détecté, sa valeur devient supérieure à 3 [1].

L'analyse des défauts de roulement par le Kurtosis peut également être réalisée dans différentes bandes de fréquences liées aux résonances de la structure.

$$Kurtosis = \frac{M_4}{M_2^2} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2 \right]^2} \quad (1.4)$$

Où :

M_4 et M_2 sont les moments statistiques d'ordre 4 et d'ordre 2,

$x(n)$ est le signal temporel,

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

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

Le Kurtosis doit être utilisé avec précaution car il est très sensible aux chocs [1], ce qui oblige à l'employer dans un environnement peu complexe afin de ne pas commettre d'erreurs de diagnostic.

Dans le complexe GP1Z, les compresseurs alternatifs à piston sont munis d'appareils de surveillance online du fabricant Bently Nevada (BN 3500) relié par DCS, l'analyse vibratoire offline se fait en utilisant un appareil vibratoire VT 80, cette dernière est mesurée en globale ($\mu\text{m/pp}$).

Les différentes mesures prises au cours de fonctionnement sont représentées par le schéma ci-dessous

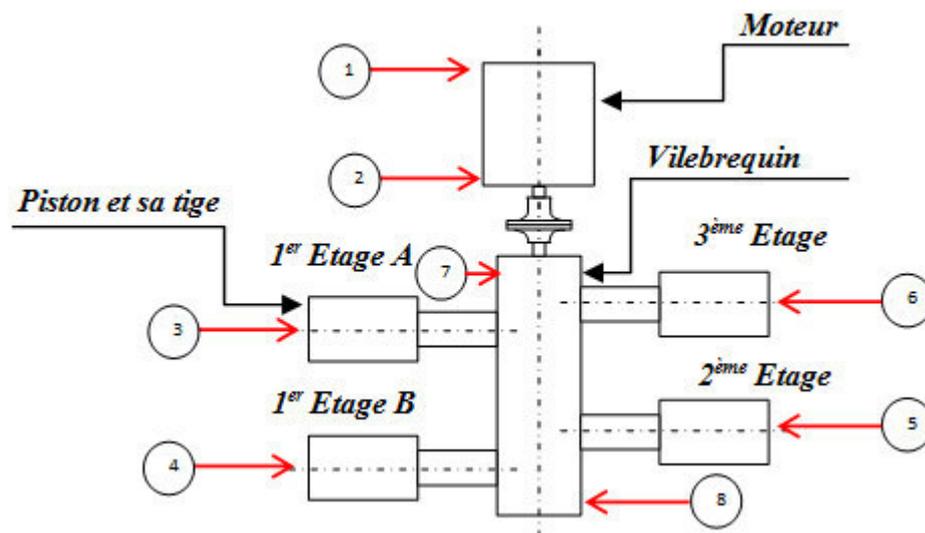


Figure 1.7 : Position de mesure vibratoire au niveau du compresseur [3]

En particulier au niveau du cylindre (piston et tige de piston), les capteurs sont placés de façon à capter trois valeurs selon la verticale, l'horizontale et l'axiale.

Dans les figures suivantes on va montrer les relevés vibratoires de la tige de piston du 1^{er} étage A et du 3^{ème} étage du compresseur de la troisième phase sur les trois niveaux :

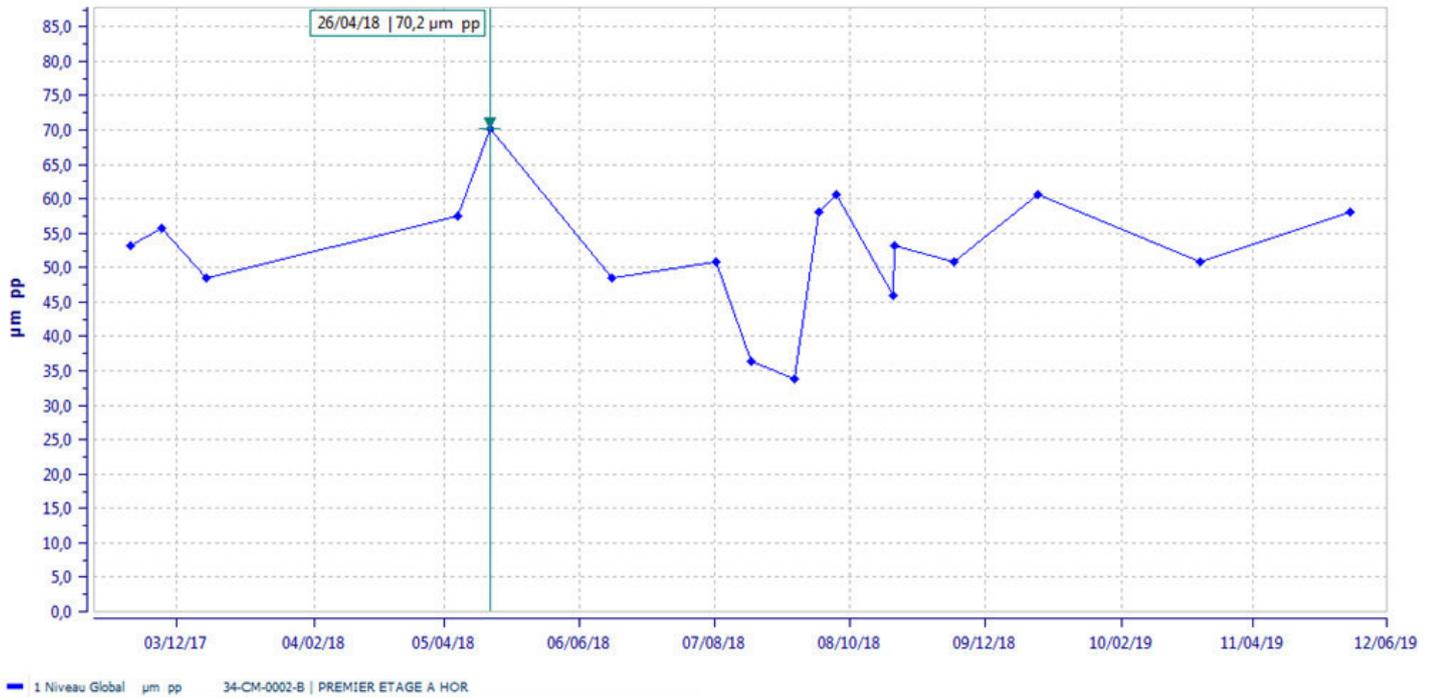


Figure 1.8 : les valeurs vibratoires horizontales du compresseur de la 3eme phase de la tige de piston du 1^{er} étage A [3]

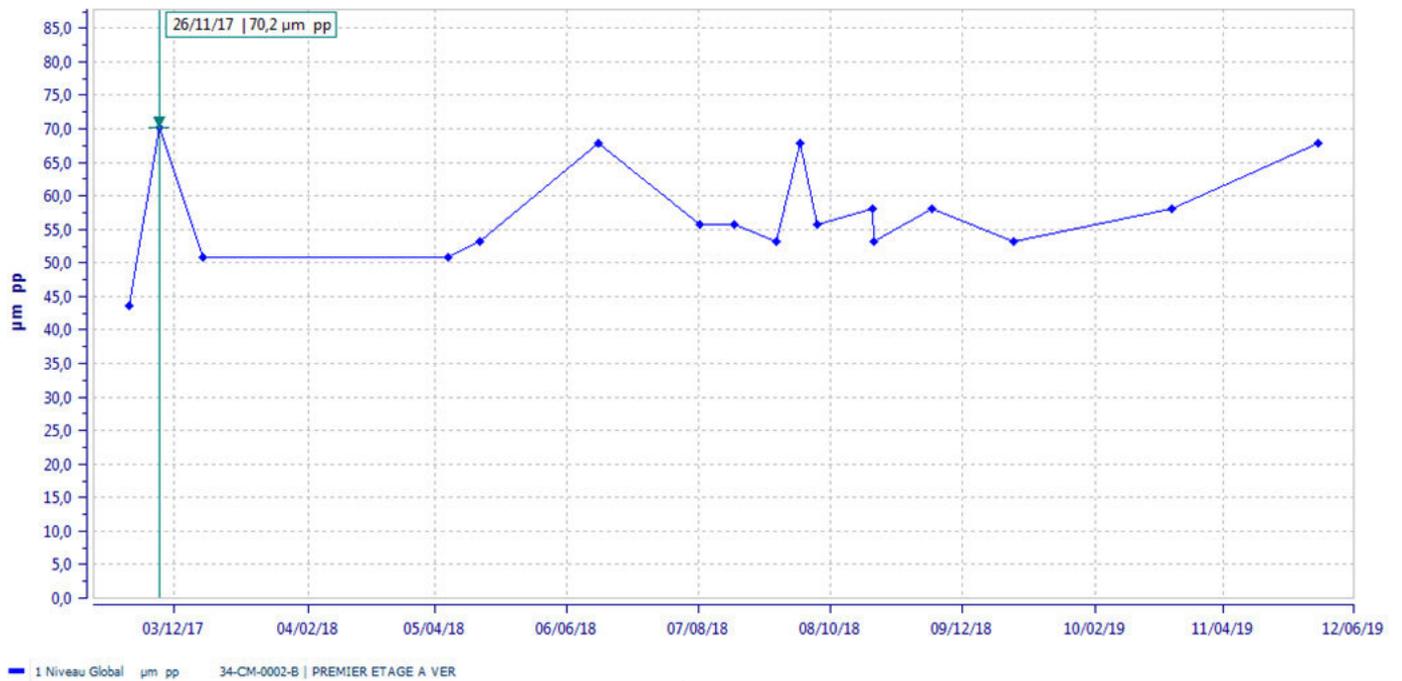


Figure 1.9 : les valeurs vibratoires verticales du compresseur de la 3eme phase de la tige de piston du 1^{er} étage A [3]

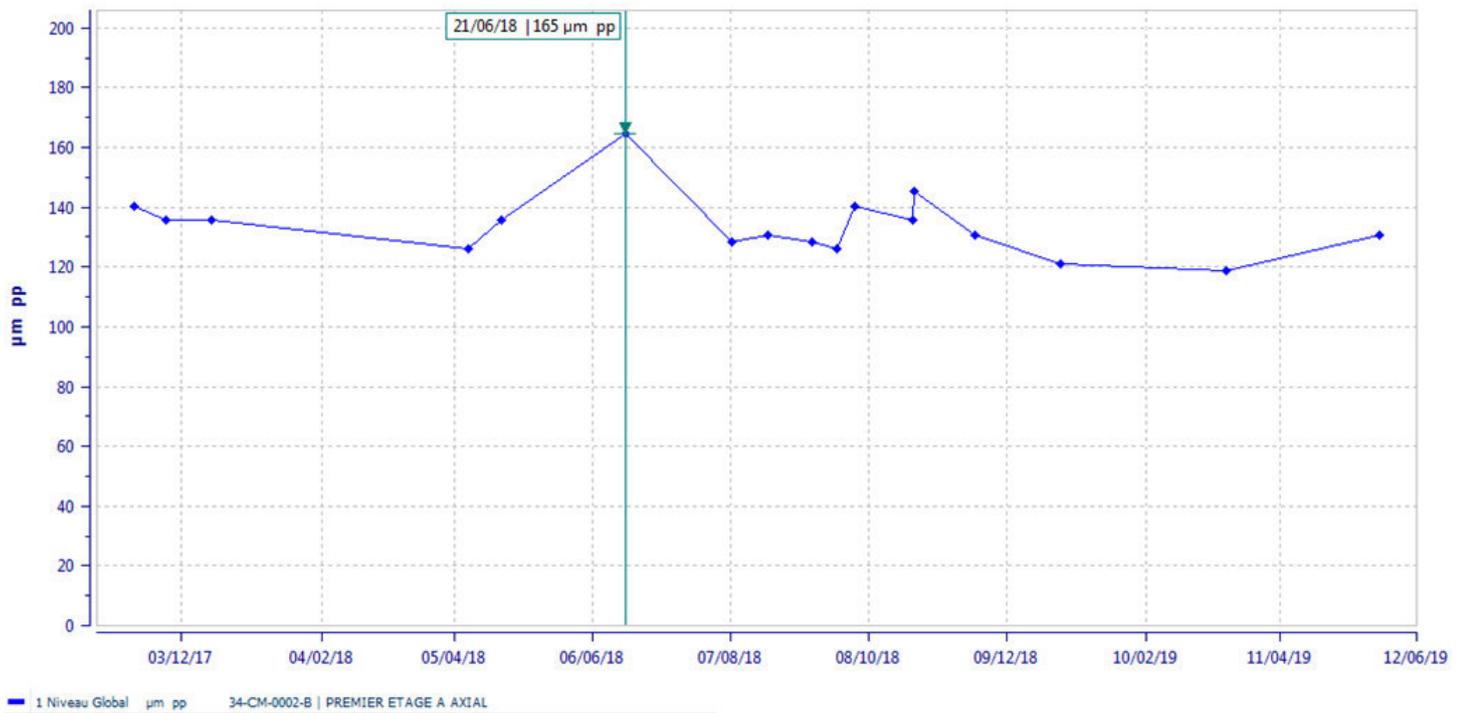


Figure 1.10 : les valeurs vibratoires Axiales du compresseur de la 3eme phase de la tige de piston du 1^{er} étage A [3]

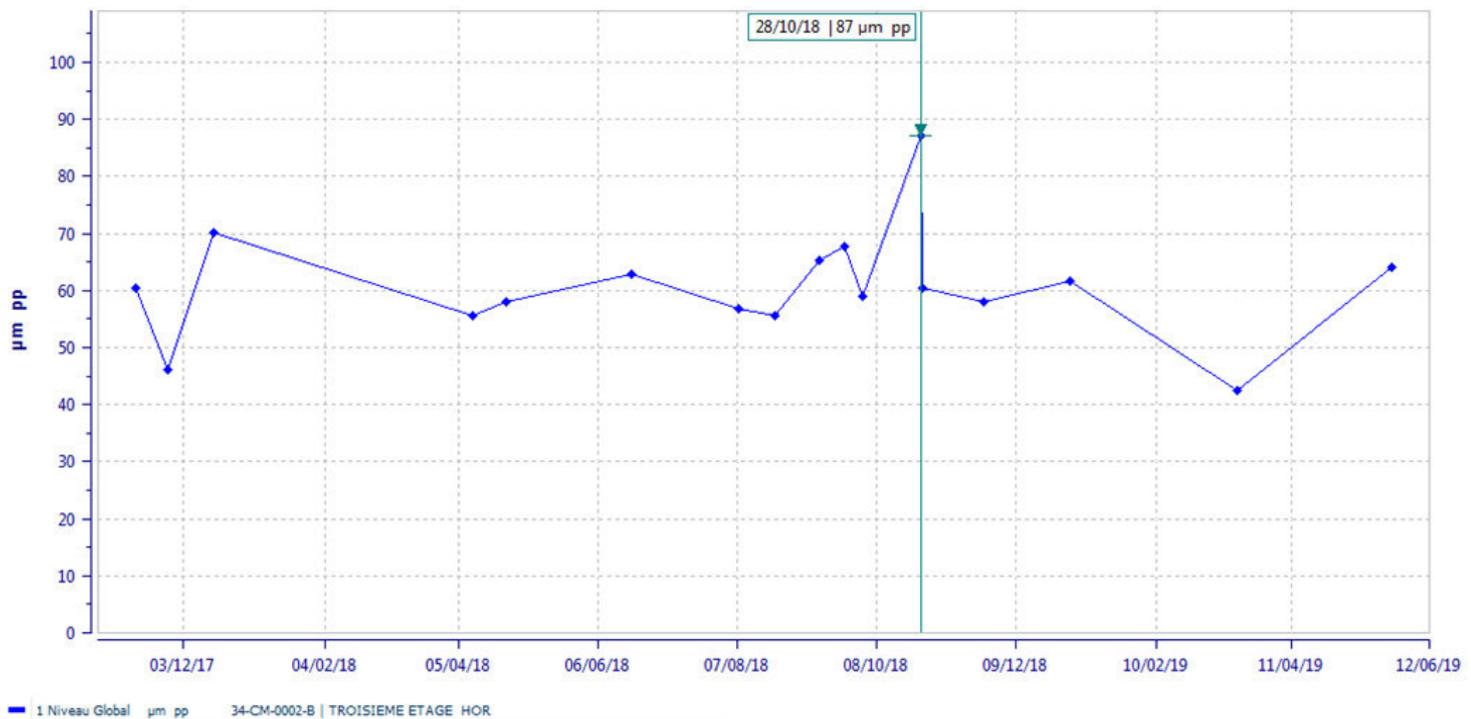


Figure 1.11 : les valeurs vibratoires horizontales du compresseur de la 3eme phase de la tige de piston du 3^{ème} étage [3]

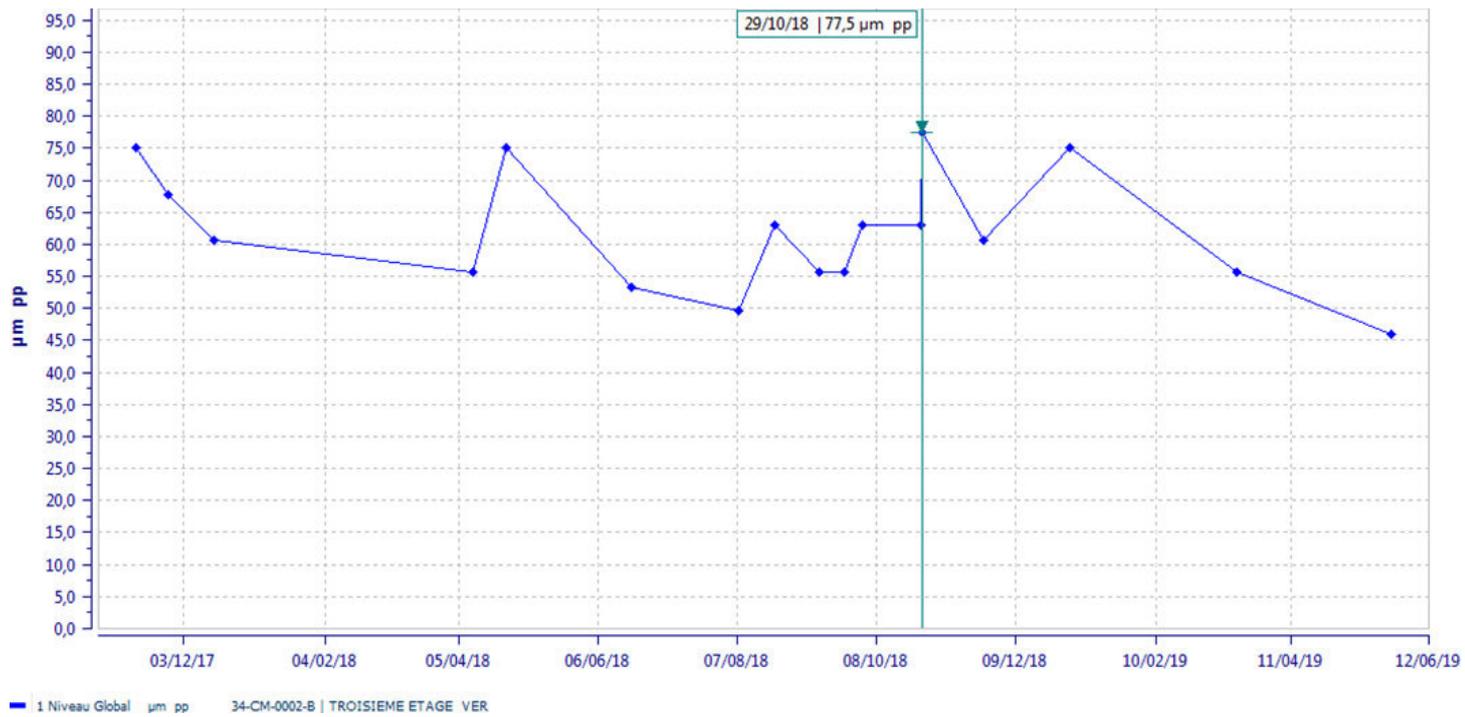


Figure 1.12 : les valeurs vibratoires verticales du compresseur de la 3eme phase de la tige de piston du 3ème étage [3]

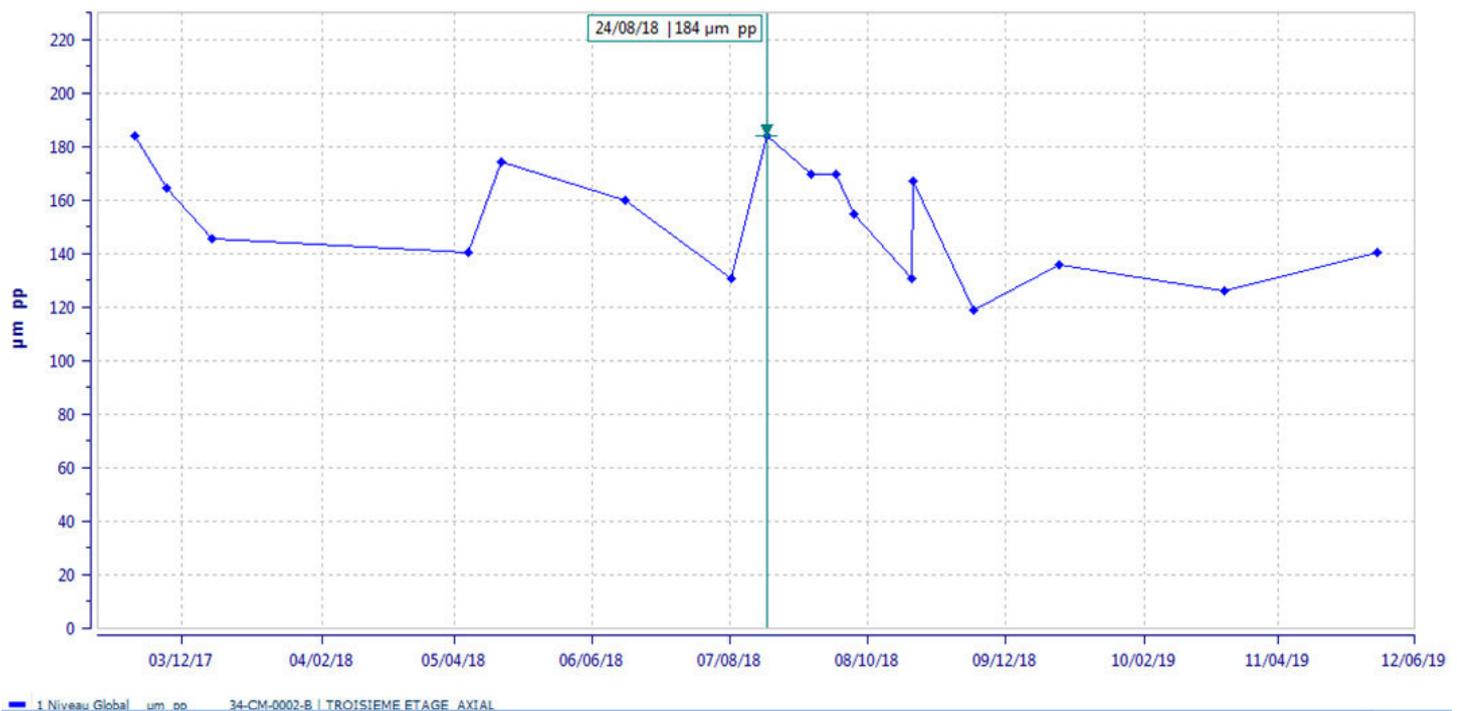


Figure 1.13: les valeurs vibratoires axiales du compresseur de la 3eme phase de la tige de piston du 3ème étage [3]

Dans le tableau qui suit, on montre le dernier relevé vibratoire avant la détection de la panne

Tableau 1.1 : les derniers relevés vibratoires avant la détection de la panne [3]

		3	4	5	6
<i>Point de mesure (Valeur Max)</i>		300µm			
<i>Valeur mesurée (µm)</i>	Horizontal	51	56	46	57
	Vertical	56	68	68	50
	Axial	128	151	192	131

On remarque bien que les relevés vibratoires ne montrent aucune anomalie car ils ne dépassent pas les valeurs maximales désignées par le constructeur IHI.

1.4) Contrôle métrologique

Le constructeur IHI préconise de faire une révision de piston et sa tige chaque 8000 heures de marche. Ce contrôle se fait par une micromètre et comme il est montré dans la figure qui suit le positionnement de prise de dimension sachant que le diamètre original est de 100 mm.

Lors de la dernière inspection systématique, les responsables de la révision ont constaté que la tige de piston se trouve dans un état défaillant avec un mauvais état de surface sur la plage d'action de la garniture d'étanchéité à gaz du troisième étage du compresseur, une déflexion, un problème de faux rond et un état d'usure avancé comme le montre le tableau suivant :

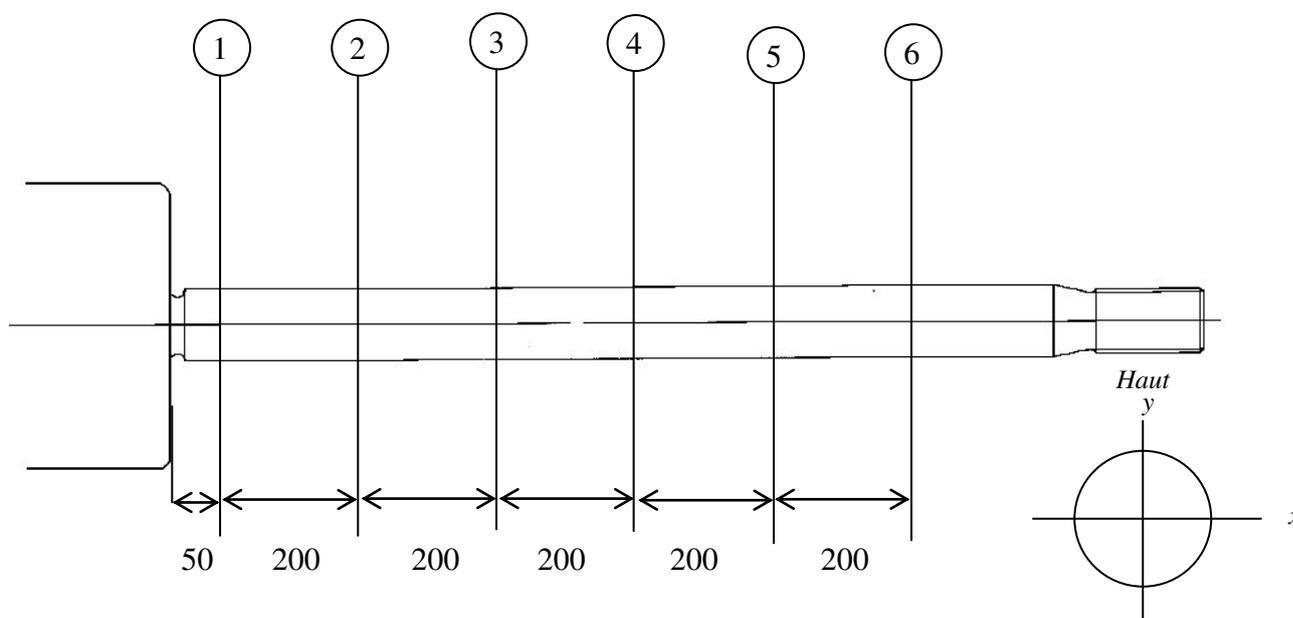


Tableau 1.2 : contrôle métrologique de la tige avant la réparation [3]

Point de mesure		1	2	3	4	5	6
1 ^{ère} étage A	x	99.94	99.93	99.93	99.93	99.93	99.92
	y	99.94	99.93	99.93	99.92	99.93	99.92
1 ^{ère} étage B	x	99.93	99.92	99.92	99.92	99.92	99.91
	y	99.94	99.93	99.92	99.91	99.91	99.90
2 ^{ème} étage	x	99.94	99.93	99.92	99.93	99.92	99.93
	y	99.94	99.93	99.93	99.94	99.92	99.92
3 ^{ème} étage	x	99,97	99,08	99,62	99,95	99,95	99,94
	y	99,96	99,15	99,70	99,94	99,95	99,94

Les valeurs exposées dans le tableau montrent clairement le défaut de faux rond qui entraîne de plus en plus la dégradation de l'état de surface à cause de l'usure. Le problème de déflexion a été détecté grâce au contrôle de déflexion de la tige par rapport à son extrémité du côté bas ensuite du côté latéral selon la gamme d'inspection, en prenant en compte des mesures qui ont pu nous démontrer l'usure. Les mesures sont exposées dans le tableau suivant en plus d'un schéma expliquant le positionnement de la prise de mesure.

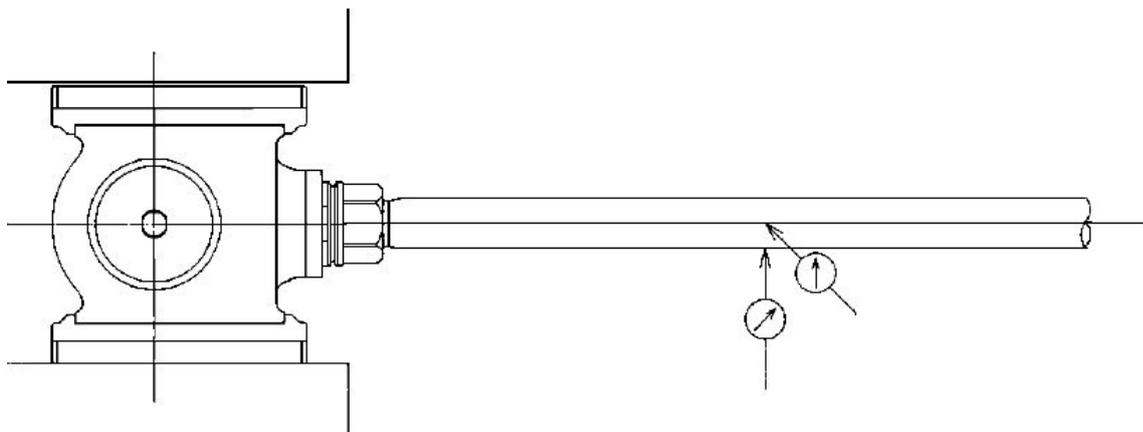
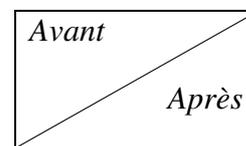


Figure 1.14 : contrôle de déflexion de la tige de piston [3]

Tableau 1.3 : les mesures des différents points de chaque tige de piston du compresseur [3]

Position	Point de mesure	
	Coté	Bas
1 ^{ère} étage A	- 0,04 ...	- 0,06 + 0,12
1 ^{ère} étage B	- 0,02 - 0,03	+ 0,04 + 0,11
2 ^{ème} étage	+ 0,03 - 0,03	+ 0,02 + 0,15
3 ^{ème} étage	+ 0,04 + 0,03	- 11 + 0,04

'...' : absence de data



1.5) Proposition

La méthode de traitement de signal utilisée par le complexe GP1Z n'a pas pu déceler les anomalies ni en état précoce ni en état critique donc nous proposons en plus des indicateurs globaux l'utilisation en temporel les méthodes de traitement de signal suivantes : les ondelettes et la séparation aveugle de source. Dans ce qui suit on présente en résumé ces méthodes.

1.5.1) Les ondelettes

Une ondelette est une fonction à la base de la décomposition en ondelettes, décomposition similaire à la transformée de Fourier à court terme, utilisée dans le traitement du signal. Elle correspond à l'idée intuitive d'une fonction correspondant à une petite oscillation, d'où son nom.

Cependant, elle comporte deux différences majeures avec la transformée de Fourier :

- Elle peut mettre en œuvre une base différente, non forcément sinusoïdale
- Il existe une relation entre la largeur de l'enveloppe et la fréquence des oscillations : on effectue ainsi une homothétie de l'ondelette, et non seulement de l'oscillation

En mathématiques, une ondelette

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (1.5)$$

tell que a est la fréquence et b le temps [4]

La transformée en ondelettes continues (TOC) est définie comme suit : [5]

$$TOC = \frac{1}{b} \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \Psi^*\left(\frac{t-a}{b}\right) \quad (1.6)$$

Avec : * symbolise le conjugué de l'ondelette mère $\Psi(t)$, $X(t)$ représente le signal.

Les analyses par ondelettes sont d'autres techniques temps-fréquence utilisées pour le suivi des différents paramètres non-transitoires des signaux vibratoires des machines tournantes. Ces techniques peuvent être utilisées en combinaison avec d'autres méthodes temps-fréquence, pour compenser les faiblesses de ces dernières.

Exemple :

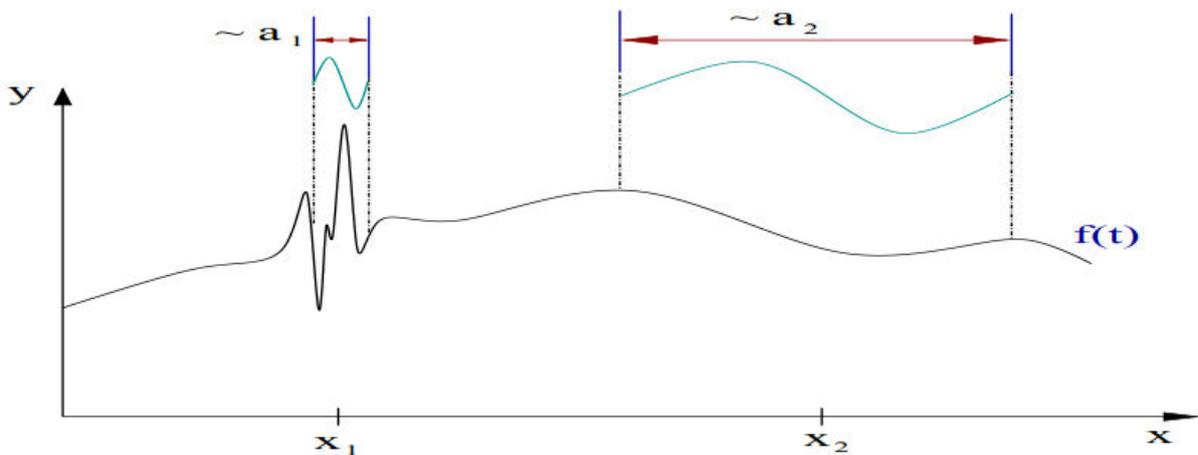


Figure 1.15 : transformé en continue d'une fonction $f(t)$ [5]

1.5.2) Séparation aveugle de source [6]

Le problème de la séparation aveugle de source consiste à restituer n signaux sources à partir de la seule connaissance de m signaux d'observation se référant à des mélanges de sources reçues au niveau d'une antenne de capteurs. Le mélange des sources (qui sont inobservables) se produit au cours de leur propagation jusqu'aux capteurs est inconnu d'où le terminologie "aveugle"

la SAS se formule de la manière simple suivante :

$$x(t) = A \{s(t)\} + n(t), \quad (1.7)$$

Avec :

- $s(t) = [s_1(t), \dots, s_n(t)]^T \in \mathcal{C}^n$ représente le vecteur colonne des sources émises.
- $x(t) = [x_1(t), \dots, x_m(t)]^T \in \mathcal{C}^m$ est le vecteur colonne des observations reçues au niveau des capteurs.
- $A\{.\}$ est le système liant les observations aux sources (de \mathcal{C}^n vers \mathcal{C}^m).
- $n(t) = [n_1(t), \dots, n_m(t)]^T \in \mathcal{C}^m$ est le vecteur colonne des bruits perturbateurs additifs.
- n (resp. m) désigne le nombre de sources émises (resp. le nombre de capteurs).
- $(.)^T$ désigne l'opérateur de transposition.

1.5.3 Inefficacité des indicateurs vibratoire globale (RMS, Kurtosis)

Nous avons mentionné dans la partie de détection de la panne les résultats de suivi du compresseur au niveau du complexe GP1Z et on a pu exposer que le seuil maximal donné par le constructeur n'a pas été déplacé ce qui veut dire qu'aucun défaut n'a été détecté. Cela est dû à notre avis au manque d'efficacité des indicateurs vibratoires, puisque cela peut être causé par la mauvaise exploitation de ces outils vibratoires. Pour confirmer nous avons opté pour présenter des études faites dans des cas similaires, dans un rotor.

Dans une étude [7], les indicateurs classiques sont calculés et normalisés pour les deux signaux mesurés sur la machine saine et avec défaut d'une barre cassée au rotor. Les valeurs obtenues ont permis de dresser l'histogramme de la Figure 1.16. Il est clair que les valeurs des indicateurs RMS et Kurtosis ne reflètent qu'une diminution ce qui n'est pas suspecté vu que ces indicateurs devraient être plus importants dans le cas avec la barre cassée.

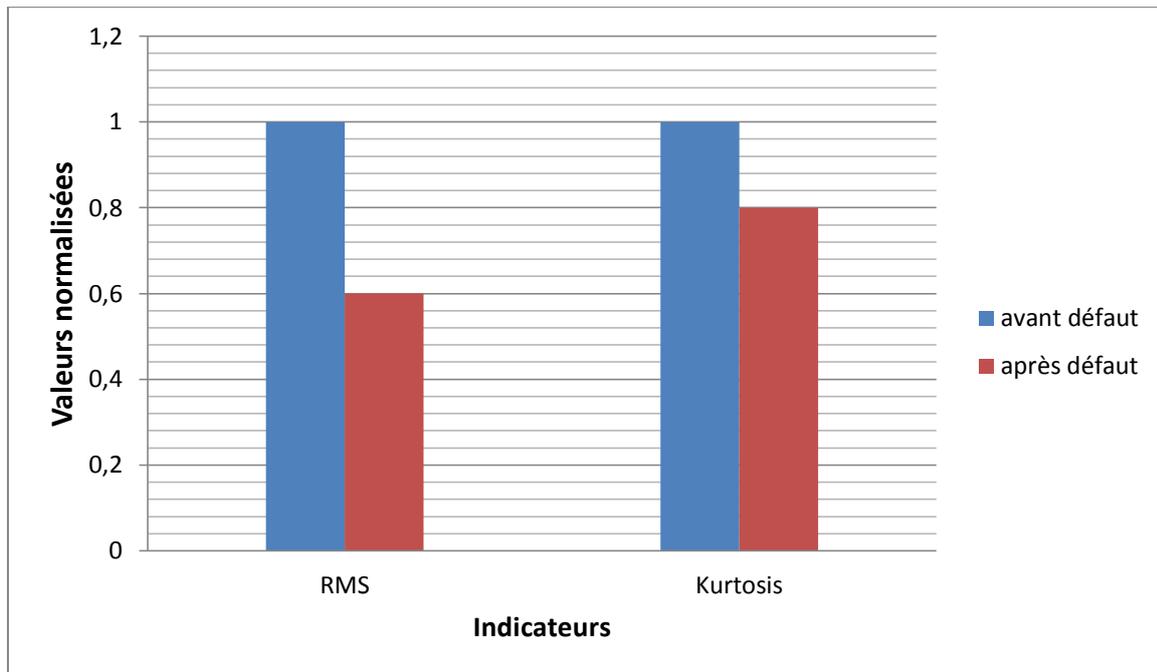


Figure 1.16 : Histogramme des indicateurs statistiques calculés pour le cas sans défaut et le cas avec défaut de barre rotorique cassée [7]

Dans un objectif de comparaison, les valeurs d'émission vibratoire transmises au corps des opérateurs sont présentées suivant des codes d'essais normalisés. Ces valeurs normalisées montrent clairement la limitation de ces indicateurs (détection tardive, diagnostic difficile peu adapté aux faibles vitesses de rotation, décroissance de l'indicateur en fin de vie du rotor). [1]

1.54) L'efficacité du traitement de signal par la méthode de Séparation aveugle de sources :

Afin de donner une proposition fiable et adéquate, nous présentons une synthèse des études faites sur des cas similaires, dans un rotor, pour montrer l'efficacité de cette méthode.

Pour concevoir le système d'expérimentation, trois capteurs sont installés. Les capteurs d'accélération sont installés dans le sens vertical des jeux de roulements aux deux extrémités de l'axe. Sur la direction verticale de l'axe en position de craquement, un capteur de déplacement est installé. Le signal est recueilli et enregistré par un système de collecte et d'analyse dynamique basé sur ordinateur. C'est ce que montre la Fig.1.17. [8]

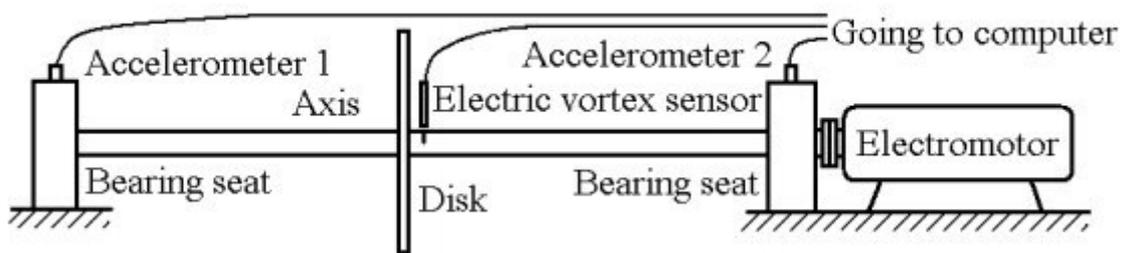


Figure 1.17 : emplacement des capteurs sur le rotor [9]

L'apparition d'un pic de spectre fractionnaire à la moitié et $3/2$ fois la fréquence propre. Si, à cette vitesse de rotation, un traitement est effectué sur un signal collecté, le spectre de puissance du signal est indiqué sur la Fig. 1.18. En utilisant la méthode de séparation aveugle de source, les signaux de source peuvent être séparés. Les résultats de la séparation sont présentés à la Fig. 1.19. [8]

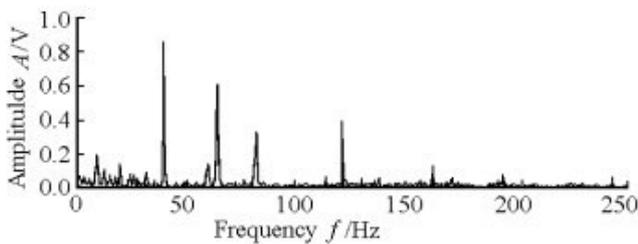
Les figures 1.18 et 1.19 montrent que la séparation par cette méthode peut être la meilleure pour séparer les sources de vibrations. Les résultats de l'analyse sont présentés ci-dessous :

(1) A partir de la Fig.1.18 des signaux collectés, la fréquence d'excitation (68Hz) de la rotation du moteur peut être vue de manière évidente. [8]

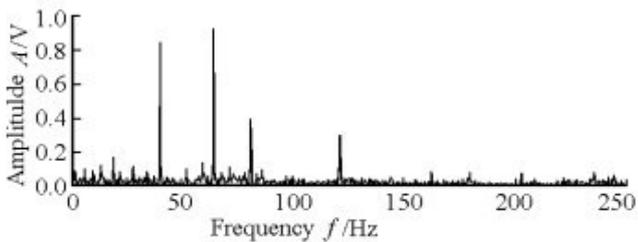
(2) En raison de la transmission des vibrations de la structure, les fréquences de défaut des signaux collectés sont mélangées sur un spectre de puissance. Avant l'application des sources aveugles de séparation, la confirmation des défauts existants ne peut pas être faite. Dans le cas de défauts

inconnus, chaque défaut peut être difficile à diagnostiquer avec précision sans une méthode de traitement adéquate. [8]

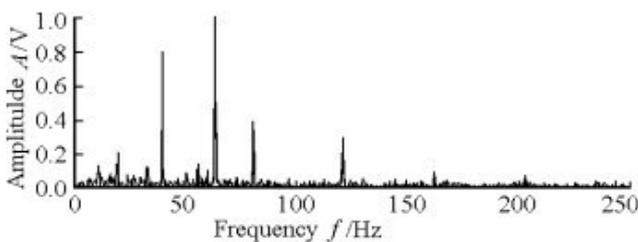
(3) Après la source aveugle de séparation, le spectre de puissance de la Fig. 1.19 montre mieux la séparation des caractères de défauts. Chaque spectre de puissance du signal du capteur n'affiche qu'un seul caractère de défaut en fin de compte. La figure 1.19(a) montre uniquement le caractère de jeu du support. Le caractère défectueux de la fissure du rotor dans la Fig.1.19(b), et celui du frottement dans la Fig.1.19(c) sont présentés de façon définitive. En comparant la figure 1.19(c) avec la figure 1.19(a), et bien que les caractéristiques du sous-spectre des défauts soient similaires, un pic apparaît aux 3/2 fois la fréquence de base seulement dans la figure 1.19(c). Maintenant, les défauts de toucher et de frottement et le relâchement du support sont séparés. [9]



a) le spectre de puissance par rapport au signal capté par l'accéléromètre 1

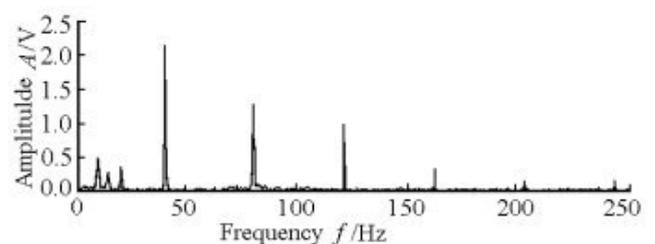


b) le spectre de puissance par rapport au signal capté par le capteur de tourbillon

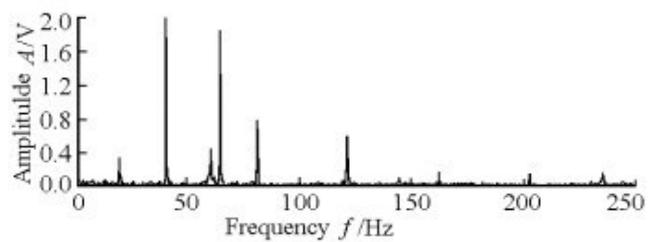


c) le spectre de puissance par rapport au signal capté par l'accéléromètre 2

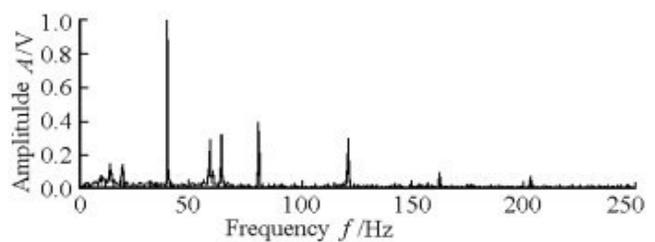
Figure 1.18 : Le spectre de puissance du signal de vibration mixte à chacun des capteurs de l'arbre [8]



a) le spectre de puissance après SAS au signal collecté par l'accéléromètre 1



b) le spectre de puissance après SAS au signal capté par le capteur de tourbillon



c) le spectre de puissance après SAS signal capté par l'accéléromètre 2

Figure 1.19 : Le spectre de puissance du signal de vibration après séparation [8]

1.6) Conclusion

Le diagnostic par les indicateurs globaux (RMS, Kurtosis) ne présente pas de symptômes clairs correspondants aux défauts simulés. En fait, les défauts du rotor ne peuvent pas être diagnostiqués avec certitude par ces indicateurs. Par contre on remarque clairement que la séparation aveugle des sources nous aide à mieux déceler les anomalies au niveau du rotor

Chapitre 2

Chapitre 2 : Le contrôle non destructif

2.1) Introduction

L'appellation **Contrôle Non Destructif** fait naturellement penser au diagnostic que le médecin formule lors de l'examen de son patient : le même principe appliqué aux pièces mécaniques consiste à mettre en œuvre des méthodes d'investigation permettant de juger «**sans destruction**» l'état de santé des pièces et de formuler un avis sur leur aptitude à remplir la fonction pour laquelle elles sont destinées.

Considérée sous cet aspect d'aptitude au bon fonctionnement, la définition suppose une bonne connaissance de tous les phénomènes mis en jeu, en particulier de la nocivité des défauts, de leur évolution dans le temps et des lois générales de la mécanique de la rupture.

Dans la pratique, les spécialistes en contrôle non destructif chargés de l'inspection sont davantage confrontés à des problèmes d'interprétation des résultats de contrôle par rapport à des critères établis en liaison avec le concepteur de la pièce. Dans cet esprit, la définition suivante des **Contrôles Non Destructifs** apparaît plus proche de la réalité industrielle : il s'agit de « **qualifier, sans nécessairement quantifier, l'état d'un produit, sans altération de ses caractéristiques par rapport à des normes** ».

En ce sens, le contrôle non destructif (**CND**) apparaît comme un élément majeur du **contrôle de la qualité** des produits. Il se différencie de l'instrumentation de laboratoire et industrielle puisque l'objet est de **détecter des hétérogénéités et anomalies** plutôt que de **mesurer** des paramètres physiques tels que le poids ou les cotes d'une pièce. [9]

2.2) Les types de contrôle

On peut, par ailleurs, considérer que le contrôle non destructif d'un produit ou d'un objet peut être effectué à trois stades différents de sa vie, conduisant à trois types d'applications. [9]

2.2.1) Le contrôle en cours de fabrication

Le contrôle en cours de fabrication procède de la philosophie de l'instrumentation industrielle en tant qu'outil de contrôle d'un procédé souvent automatisé et impliquant alors un appareillage installé à demeure en ligne de fabrication présentant une grande robustesse, une réaction rapide, un coût d'exploitation faible et une bonne fiabilité. Les défauts recherchés sont ici généralement bien identifiés, le fonctionnement est automatique aboutissant à un repérage ou un tri des produits défectueux. [9]

2.2.2) Le contrôle de réception

Le contrôle de réception d'un lot de pièces, d'une installation, d'un ouvrage au moment de la livraison procède d'une philosophie de respect de conformité à des spécifications de qualité définies auparavant.

Si l'aspect coût et productivité peut avoir encore une certaine importance à ce stade de contrôle, c'est surtout l'aspect procédure de la démarche qui devient primordial, qu'il s'agisse du choix du procédé, du choix des paramètres de réglage, de l'étalonnage, de la présentation et de l'archivage des résultats obtenus. À ce stade, il s'agit de **détecter des défauts** mais aussi souvent d'**en définir la nature et les dimensions**. [9]

2.2.3) Le contrôle en service

Le contrôle en service s'effectue sur pièces ou structures lors d'opérations de maintenance ou à la suite de détection d'anomalies de comportement. On en attend une très grande fiabilité car les risques de non-détection d'un défaut sont graves. Pour ce type de contrôle, il convient de pouvoir estimer le mieux possible la **nature et les dimensions des défauts** pour pouvoir en apprécier la nocivité ; il faut disposer aussi d'une grande reproductibilité de l'examen non destructif, de façon à pouvoir **suivre l'évolution du dommage au cours du temps**. [9]

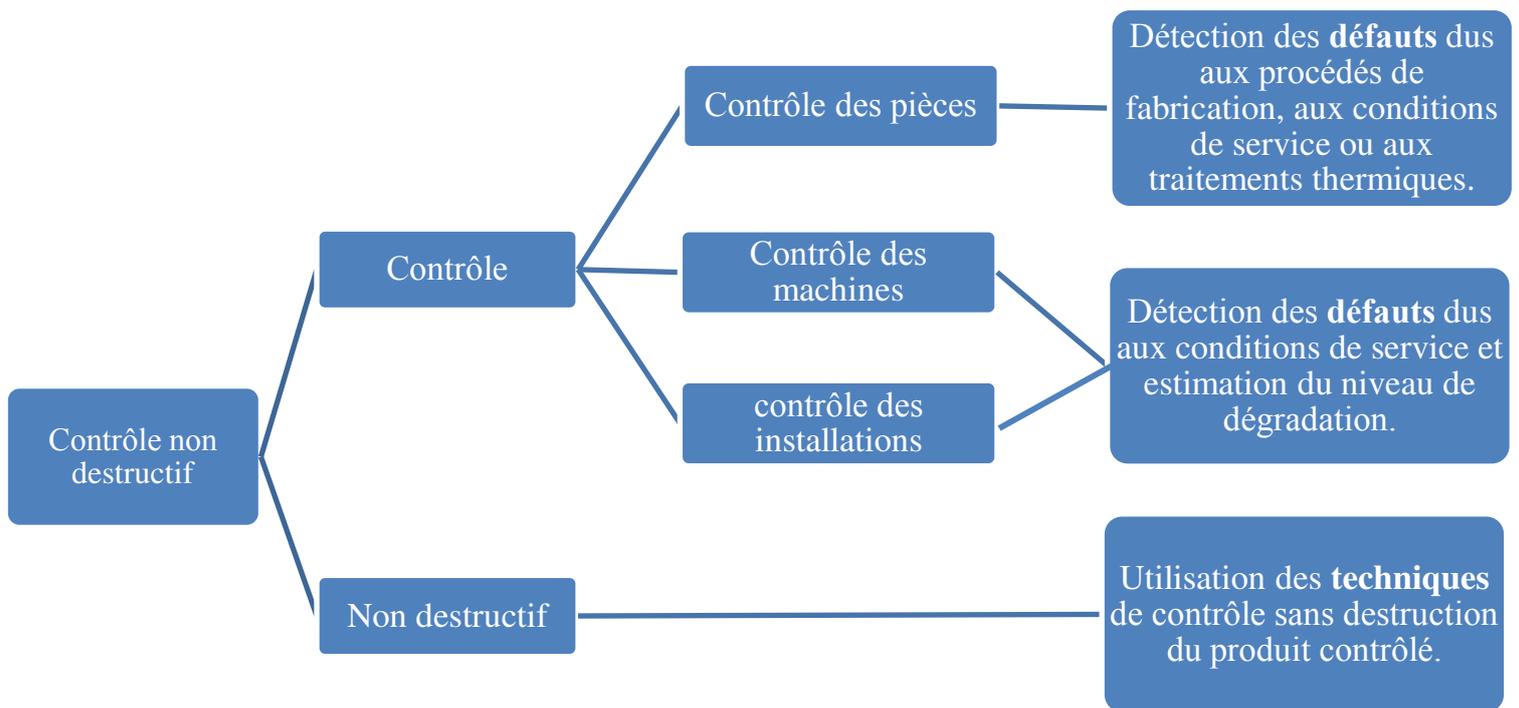


Figure 2.1 : type d'application [9]

2.3) Les méthodes de contrôle non destructif

2.3.1) Définitions

2.3.2) Contrôle par examen visuel (VT)

L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle, le plus simple et le plus général puisque c'est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructifs.

En examen préalable, l'inspection visuelle d'un objet, d'une structure, d'un assemblage tel qu'une soudure permettra de guider un observateur expérimenté dans la définition d'une autre technique : choix de l'angle de tir en radiographie, direction de magnétisation, fréquence ultrasonore.

L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des hétérogénéités locales et superficielles (taches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect rédhitoires pour des produits plats du type tôles, tissus, verre, etc. Toutefois l'examen purement visuel présente des limitations de différentes

natures que nous allons examiner et qui justifient l'écllosion de toute une gamme de procédés de contrôle optique. [9]

2.3.3) Contrôle par ressuage (PT)

Le ressuage est une extension de l'inspection visuelle qui peut s'appliquer sur tout matériau à l'exception de certaines fontes qui présentent une surface poreuse.

C'est un terme qui désigne la sortie d'un fluide (liquide ou gazeux) d'une discontinuité dans laquelle ce fluide s'était précédemment accumulé au cours d'une opération d'imprégnation. [10]

2.3.4) Contrôle radiologique (RT)

Rayons X (RTX)

Les rayons X en contrôle non destructif sont principalement utilisés pour réaliser des radiographies X. L'avantage de cette technique est de fournir des informations directement exploitables sur l'intérieur des objets ou des matériaux. L'étape d'inversion peut être assez réduite et la résolution spatiale suffisamment bonne. Toutefois, l'interprétation des images demande de l'expertise et la réalisation des clichés nécessite des conditions de sécurité pour l'opérateur et l'environnement. [10]

Gammagraphie (RT gamma)

Cette technique de radiographie industrielle utilise une source de rayonnements gamma. Elle se rapproche de la radiographie par rayons-X mais nécessite plus de précautions. La qualité d'image est également moins bonne. L'avantage principal réside dans l'énergie du rayonnement qui permet une meilleure pénétration que par les rayons-X et la plus grande compacité des projecteurs et des sources. Les appareils de gammagraphie appelés gammagraphes (abrégié : GAM) fonctionnent à l'aide d'isotope radioactif stable (principalement iridium 192, cobalt 60 et sélénium 75). Ce sont des sources autonomes qui ne nécessitent aucune prise de courant contrairement au poste à rayon X [10]

Neutronographie

Le principe de la neutronographie est similaire à celui de la radiographie X et lui est complémentaire. Elle peut être effectuée grâce à un faisceau neutronique issu d'un réacteur, d'un accélérateur d'ions ou d'une source de ^{252}Cf (émetteur de neutrons). Elle est notamment utilisée pour le contrôle de matériaux hydrogénés situés à l'intérieur d'enceintes métalliques. [10]

Avec Cf : Californium

Jauges

Le principe des jauges est basé sur la loi de l'atténuation des rayonnements (**loi de Beer-Lambert**). On distingue :

- jauges de niveau : elles indiquent la présence ou l'absence de matériau sur le trajet horizontal du faisceau (source et détecteur placé de part et d'autre du matériau). Les sources utilisées sont des émetteurs bêta ou gamma selon l'épaisseur et la densité du matériau à mesurer. Elles sont utilisées pour le contrôle des réservoirs de liquides, des silos (sable, grains, ciment, etc.) ;
- jauges d'épaisseur : si le matériau est de densité constante, l'intensité du signal reçu par le détecteur sera fonction de l'épaisseur de celui-ci. Elles sont utilisées pour la mesure en continu de produits en feuilles : papiers, tissus ou caoutchouc par exemple.

Loi de Beer-Lambert est une relation empirique reliant l'atténuation d'un faisceau de lumière aux propriétés du milieu qu'il traverse et à l'épaisseur traversée. [10]

2.3.5) Contrôle par ultrasons (UT)

Le contrôle non destructif par ultrasons est un procédé de recherche du manque de matière (défaut) dans un matériau. Il permet de localiser et de dimensionner les discontinuités (défauts) à l'aide d'ondes acoustiques. [9]

2.3.6) Émission acoustique (AT)

Le contrôle par émission acoustique consiste à recueillir l'émission d'une pièce ou structure soumise à sollicitation, par exemple lors d'une épreuve hydraulique ou pneumatique. La propagation des ondes ultrasonores élastiques dans le matériau, détectée par un maillage de capteurs, peut conduire à une localisation des sources d'endommagement du matériau en temps réel (fissuration...) et à une évaluation de leur sévérité. C'est une méthode globale (tout l'appareil est contrôlé en même temps) et dynamique (les défauts non évolutifs ne sont pas détectés).[10]

2.3.7) Thermographie (TT)

La **thermographie** ou **thermographie infrarouge** est une technique permettant à distance et sans contact, d'observer des scènes thermiques et d'en mesurer des températures avec une précision variable en fonction des critères recherchés.

La norme française A 09-400 définit la thermographie infrarouge comme «**Technique permettant d'obtenir au moyen d'un appareillage approprié l'image thermique d'une scène thermique dans un domaine spectral de l'infrarouge** ».

La thermographie infrarouge est utilisée dans le domaine de la surveillance conditionnelle de fonctionnement pour optimiser les tâches de maintenance sans interrompre le flux de production et réduire au maximum les coûts d'entretien.[10]

2.3.8) Magnétoscopie (MT)

Le principe de la magnétoscopie est exposé dans la norme NF A09-590, comme suit: «L'examen magnétoscopie consiste à soumettre la pièce ou une partie de la pièce à un champ magnétique de valeur définie en fonction de la pièce. Les discontinuités superficielles provoquent à leur endroit des fuites magnétiques qui sont mises en évidence par des produits indicateurs déposés à la surface de la pièce. L'image magnétique obtenue est observée dans des conditions qui dépendent du produit indicateur utilisé». [10]

2.3.9) Contrôle d'étanchéité (LT)

Les méthodes de contrôle d'étanchéité font appel à des gaz traceurs, couplés à des instruments très sensibles à des concentrations minimales de ces gaz traceurs. Les plus courants sont l'hélium, l'hydrogène (azote hydrogéné), l'utilisation du gaz SF₆ est maintenant interdite par la réglementation. Actuellement, cette méthode n'est encore pas codifiée par le Cofrend, mais elle l'est dans de nombreux autres pays, les États-Unis par exemple.

Tel que Cofrend (Confédération française pour les essais non destructifs) est un organisme "tiers-partie" qui gère le système de certification selon deux normes : norme française et européenne NF EN 473 intitulée : « Essais non destructifs, qualification et certification du personnel END » [10]

2.3.10) Contrôle d'étanchéité ITM TODA-15

La méthode de contrôle ITM TODA-15 associe une mise en dépression des éléments à contrôler (réservoirs et accessoires et canalisations associées) à une détection acoustique des « bruits de fuites » dans les zones non étanches. La dépression est l'élément physique qui provoque l'émission de turbulences dans les zones non étanches. Les « bruits » de fuite (turbulences) sont détectés grâce au positionnement de capteurs dans l'installation contrôlée (canalisations, réservoirs associés et accessoires). Les capteurs ATEX sont raccordés à une interface électronique (TODA Unit) qui permet, en combinaison avec un logiciel spécifique, le traitement des signaux acoustiques et la gestion du contrôle d'étanchéité. La méthode de contrôle ITM TODA-15 est principalement utilisée dans les installations de stockage travaillant sous pression atmosphérique. [10]

2.3.10) Courants de Foucault (ET)

La technique de contrôle par **courants de Foucault** est une méthode de Contrôle Non Destructif (CND) fondée sur la circulation de courants induits dans un matériau conducteur électrique. La configuration de contrôle la plus simple consiste à utiliser un bobinage alimenté par une tension sinusoïdale. Ce bobinage est placé à proximité de la pièce à contrôler. Le bobinage crée un champ magnétique sinusoïdal dans la pièce. Des courants apparaissent dans la pièce et s'opposent à la variation du champ magnétique (Loi de Lenz-Faraday). [10]

2.3.11) Méthodes couplées

Récemment, des méthodes couplées ont vu le jour, et pour certaines sont encore dans le domaine de la recherche : les méthodes électromagnétiques acoustiques, électromagnétiques ultrasonores ou magnéto-optiques. [10]

2.3.12) Acoustique non linéaire

Plusieurs études ont montré que les méthodes acoustiques linéaires ne sont pas assez sensibles à l'endommagement très localisé. Devant une telle difficulté, les méthodes acoustiques non linéaires présentent une alternative importante capable de caractériser et éventuellement de déterminer les endommagements faibles ou précoces, localisés ou diffus. Ainsi depuis quelques années, l'acoustique non linéaire apparaît de plus en plus comme une nouvelle piste très prometteuse pour le contrôle et l'évaluation non destructive des matériaux de structure. [10]

2.4) Procédure de CND

L'**opération de contrôle non destructif** d'un objet ne se borne généralement pas à la **détection** d'éventuels défauts. En effet, même si le choix du procédé, de la méthode et du matériel a été effectué au préalable, il faut envisager toute une **procédure** ayant les objectifs suivants : fiabilité de l'examen, reproductibilité, localisation des défauts, identification, caractérisation de ceux-ci, en particulier par leur taille, classement, présentation visuelle, décision concernant l'affectation de l'objet, enfin archivage des résultats et des conditions d'examen. [10]

2.5) Principe de la détection d'un défaut

Le principe de la détection d'un défaut consiste à exciter celui-ci et à recueillir sa réponse.

Schématiquement, on peut généralement distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la méthode employée :

- ❖ Mise en œuvre d'un processus physique énergétique (**excitation**);
- ❖ Modulation ou altération de ce processus par les défauts (**perturbation**);
- ❖ Détection de ces modifications par un capteur approprié (**révélation**);

❖ Traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée.

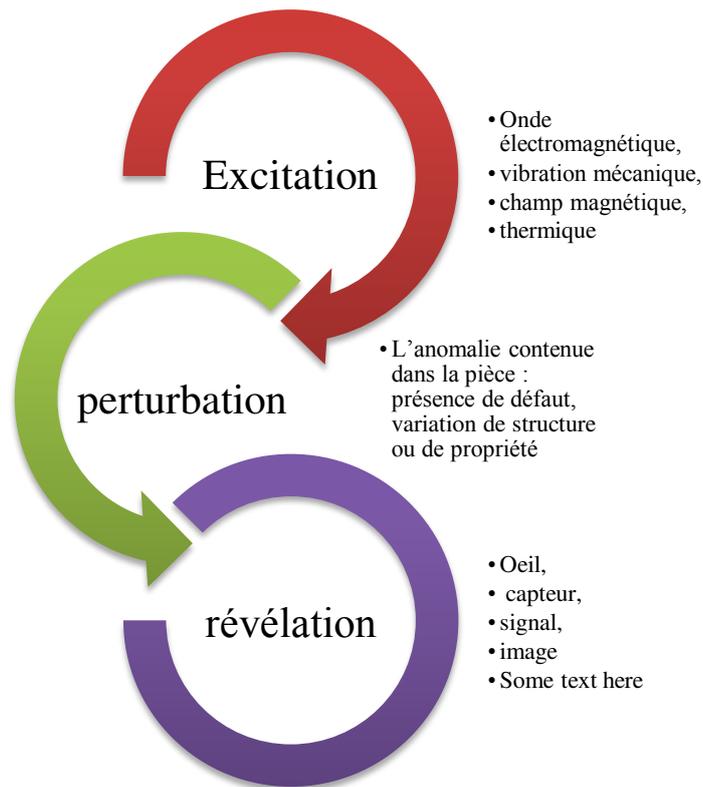


Figure 2.2 : Principe général du CND [9]

Différents types d'énergie sont employés en pratique : énergie mécanique (ultrasons, ressuage), électromagnétique (radioscopie, observation dans le visible, flux magnétique...). On peut schématiquement distinguer deux groupes de méthodes de détection :

- a- **Les méthodes de flux**, avec une excitation et une détection **de même nature** et pour lesquelles le défaut introduit une perturbation de flux qui peut être relevée soit directement dans le flux transmis (radiographie) ou le flux rediffusé (ultrasons), soit par un effet de proximité (bobine de sonde à courants de Foucault, flux de fuite magnétique) : figure ci-dessous ; la grande majorité des procédés du contrôle non destructif se réfère à ce groupe de méthodes. [9]

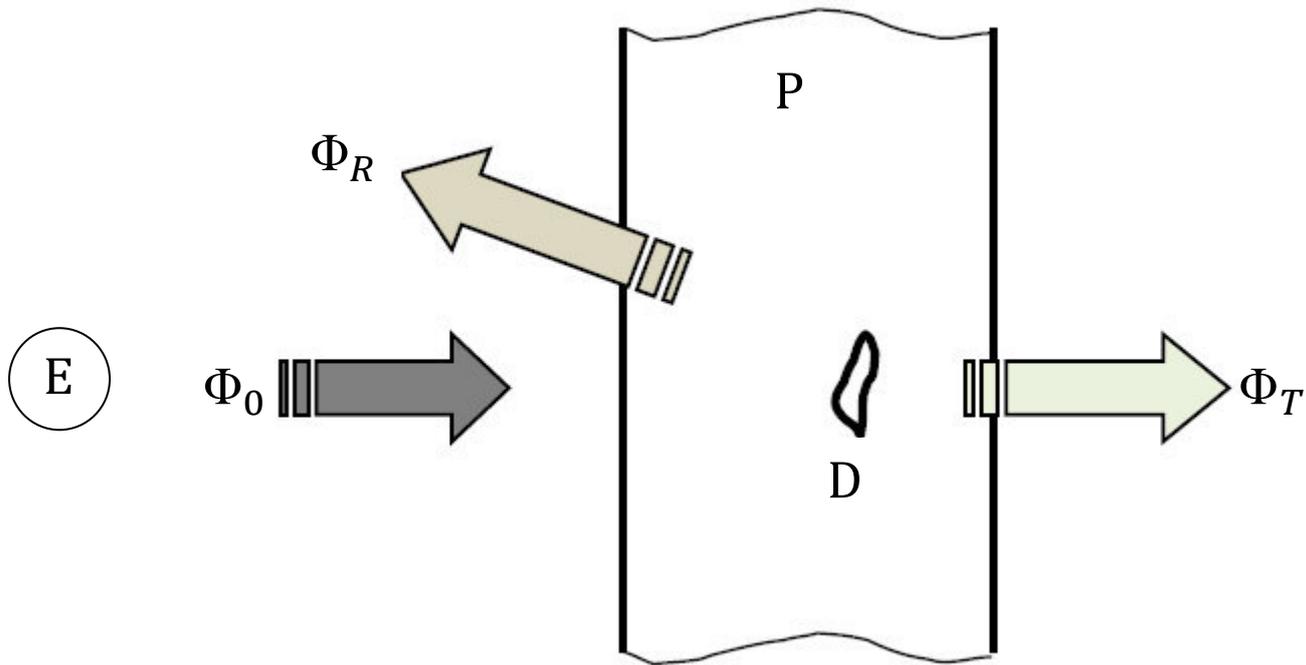


Figure 2.3: Principe du contrôle non destructif (méthode de flux) [9]

E : émetteur du flux Φ_0 émis vers la pièce P à contrôler ;
 Φ_R : flux réfléchi ;
 Φ_T : flux transmis ;
 Φ_R ou Φ_T sont les vecteurs de l'information utilisés par le contrôleur ;
D : défaut

- b- Les méthodes pour lesquelles l'excitation et la détection sont **de natures différentes**, chacune mettant en jeu un processus original et spécifique ; l'excitation la plus employée est la sollicitation mécanique ; elle conduit aux techniques d'analyse de vibrations mécaniques ou de microdéformations (interférométrie holographique) ou encore à une technique d'émission provoquée dont la plus connue est l'émission acoustique. [9]

2.6) Contrôle par ultrasons (UT)

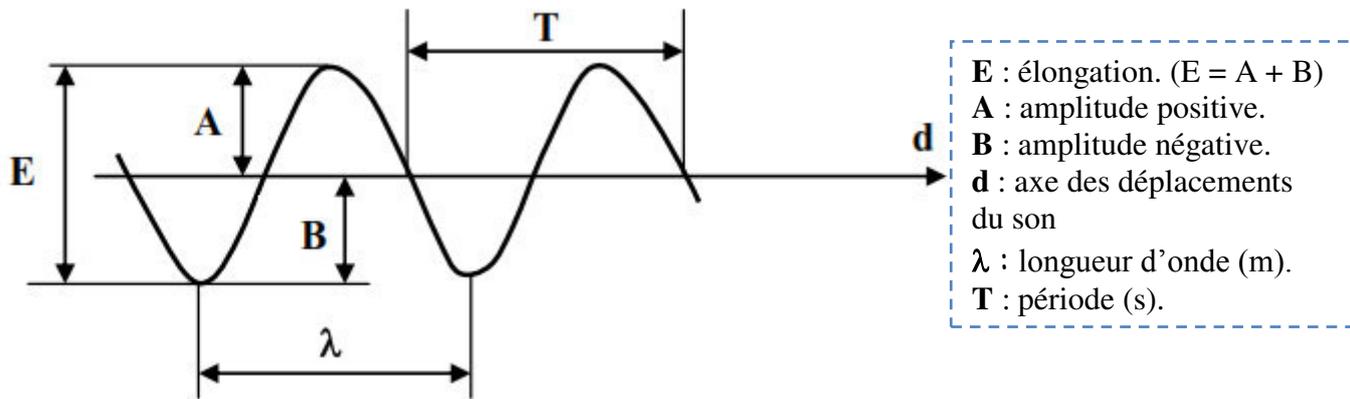
Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques dont la fréquence est supérieure au domaine audible d'une oreille humaine normale (16 Hz à 16 KHz). Elles se propagent à l'intérieur des matériaux avec des vitesses qui dépendent du milieu lui-même et du type d'onde.

Dans les matériaux métalliques, les fréquences d'utilisation courante vont de quelques centaines de kilohertz à quelques dizaines de mégahertz. Dans ce domaine de fréquence, l'amortissement dans l'air est tel qu'elles ne s'y propagent pratiquement pas.

En contrôle non destructif par ultrasons, la plage utilisée est comprise entre 10^5 Hz et $20 \cdot 10^6$ Hz. [9]

2.6.1) Nature des ondes ultrasonore [9]

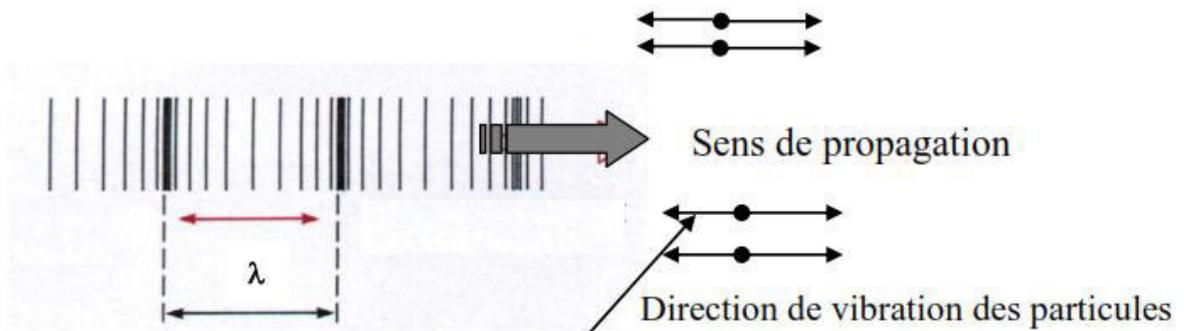
On parle généralement d'onde lorsqu'il s'agit d'un phénomène qui se répète après un certain temps (T) appelé période.



Dans les solides (milieu isotrope) il existe deux modes de déplacements des déformations avec des vitesses bien définies :

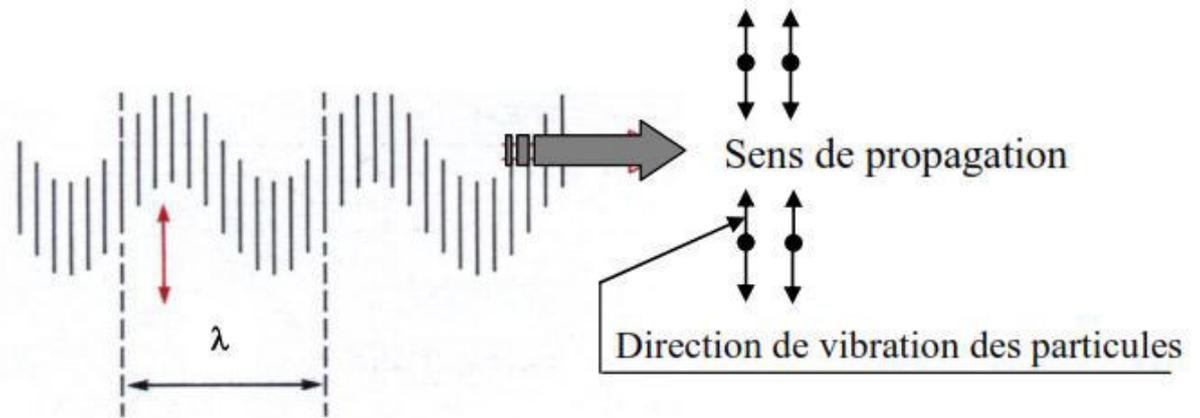
- Déplacement sans cisaillement : onde longitudinale ou de compression.
- Déplacement sans dilatation : onde transversale ou de cisaillement.

a- Onde longitudinale ou de compression : la direction des vibrations des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde ; [9]



b- Onde transversale ou de cisaillement : la direction des vibrations des particules est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.

Ces ondes ne peuvent exister que dans les solides car leur existence est liée à une résistance au cisaillement que ne possèdent ni les liquides ni les gaz. [9]



c- **Onde de surface** : ondes obtenues par superposition des deux ondes longitudinale et transversale parallèle à la surface du solide. [9]

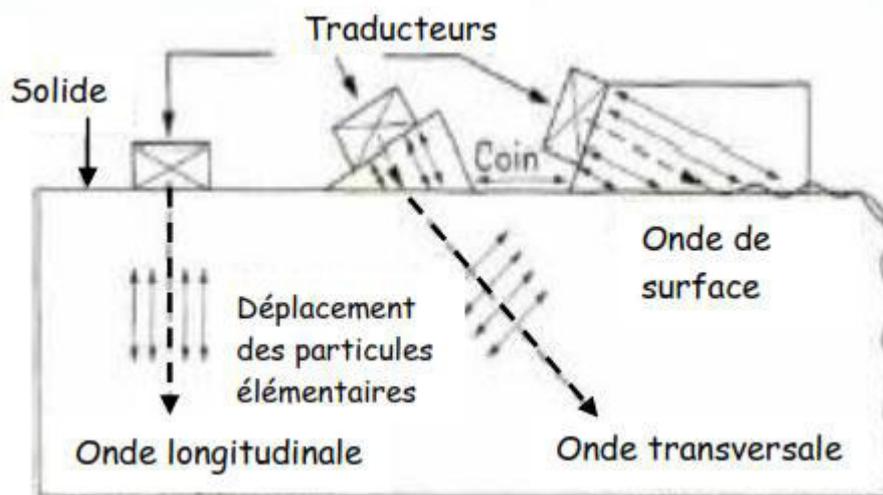
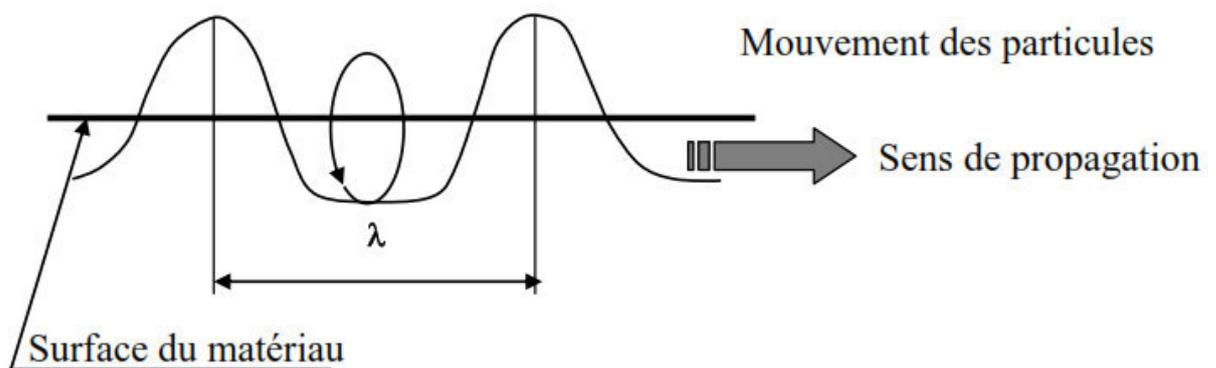
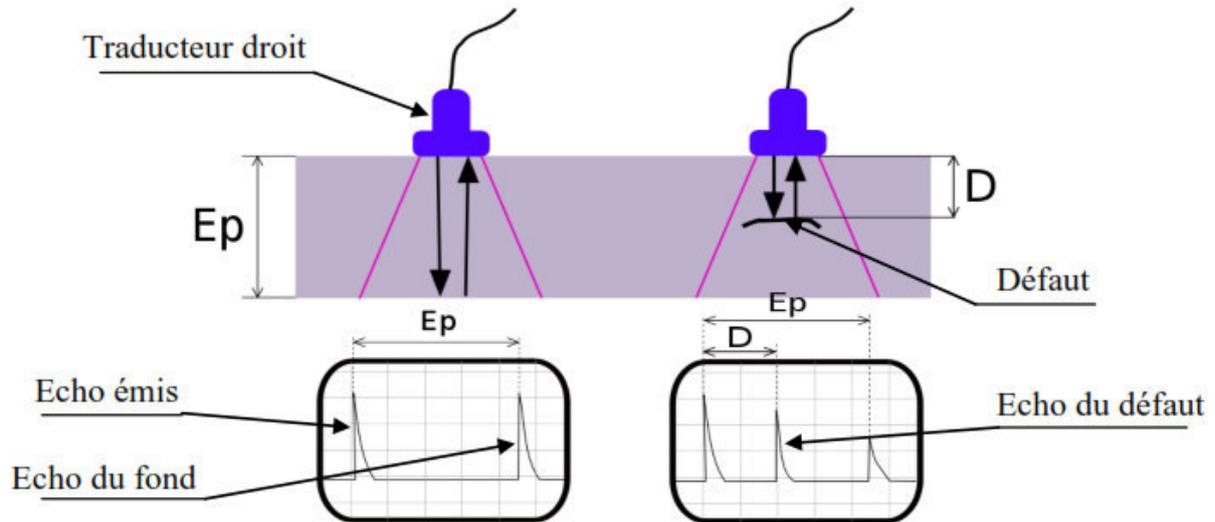


Figure 2.4: Types d'ondes et modes de propagation des ultrasons dans un solide [9]

2.6.2) Principe de contrôle par ultrasons [8]



La vibration mécanique engendrée par l'élément piézo-électrique du transducteur se propage dans la section de la pièce en se réfléchissant sur les faces. Une partie du faisceau acoustique est interceptée par le défaut et renvoyée vers le transducteur qui convertit la vibration en signal électrique.

L'œil observe sur l'écran de visualisation un écho caractéristique apparaissant à une distance donnée sur la base de temps.

Il est alors possible de détecter la présence du défaut, d'évaluer sa position et son étendue. L'amplitude de l'écho reçue dépend de l'étendue et de l'orientation de la surface réfléchissante

Il existe deux types de procédures d'analyse :

- Méthode par transmission
- Méthode par réflexion

Chapitre 3

Chapitre 3 : Préparation et Revêtement de la tige

A- Préparation

3.1) Localisation des défauts

Après la détection des défauts et leur localisation on passe à la projection mais pour bien mener l'opération de projection, il est impératif de respecter certaines étapes telles que la bonne usinabilité, et une préparation de la surface à savoir le sablage ainsi que les paramètres de projection.

3.2) Elimination de la couche de chromage

Tout d'abord on commence par l'élimination de la couche du chromage dur, elle se fait dans un tour par une simple opération de chariotage, pour avoir un bon état de surface de la surface à revêtir.

3.3) Préparation des surfaces à revêtir

Après avoir élaboré un bon état de surface par l'usinage, on effectue les différentes opérations de préparation de surface comme suit :

3.3.1) Dégraissage

Ce traitement est d'importance capitale, il a pour but d'éliminer de la surface, toutes traces de substances organiques, huiles, produits gras qui sont dues aux différents échanges effectués pendant la période de fonctionnement que le matériau a subi auparavant. La tige est dégraissée par nettoyage avec de l'éthanol. [11]

3.3.2) Grenailage [12]

Le grenailage est une technique consistant à projeter de la grenaille sur la surface d'un objet pour en modifier la structure superficielle. Le grenailage est une technique de traitement des surfaces, qui a pour but d'améliorer l'aspect de la pièce. Des petites billes d'acier sont projetées à grande vitesse continue qui peut aller jusqu'à 100m/s. La pression est élevée, aux environs de 5 bars, pour obtenir une rugosité de surface importante. Elle permet d'atteindre les niveaux SA3 de préparation (SA3 : Décapage à blanc. Il conduit jusqu'à l'obtention d'une surface parfaitement propre, avec une grande amélioration maximale dans la rugosité).



Figure 3.1 : les abrasifs ronds et angulaire utilisé dans le grenaillage [12]

B- Revêtement

3.4) Rechargement

3.4.1) Définition

Le **rechargement** est une technique, selon la nature du substrat, métallurgique ou chimique qui consiste à revêtir une pièce ou une partie de pièce d'un matériau (métal, céramique, gomme, etc.) ayant les propriétés requises pour résister à une sollicitation connue et définie.

Les trois principales techniques de rechargement sont le rechargement par laser, par projection, par soudage et par explosion (placage par explosion). En règle générale le rechargement est envisagé au moment de la conception d'une pièce ou de sa maintenance. [13]

3.4.2) Rechargement laser (Laser cladding)

Le revêtement au laser est l'un des traitements de surface au laser. Les effets positifs des traitements de surface au laser sont basés sur un changement de la microstructure ou de la composition du matériau de la couche de surface dû à un cycle thermique induit par une source laser en mouvement. Le processus est schématisé à la figure 3.2.

La zone traitée est chauffée par absorption d'énergie délivrée par le faisceau laser. L'apport de chaleur dû à un faisceau laser de forte puissance est bien confiné et très intense. Par conséquent, les vitesses de chauffage dans la couche de surface sont élevées. La couche chauffée est auto-trempeée après le passage du faisceau laser par diffusion de chaleur au volume froid. Les vitesses élevées de chauffage et de refroidissement dans la couche de surface entraînent un raffinement du grain et la formation de phases métastables et / ou de microstructures altérées.

De plus grandes zones peuvent être traitées en faisant plusieurs pistes adjacentes. Certains procédés nécessitent l'utilisation d'un gaz de protection pour éviter la corrosion de la zone traitée. [14]

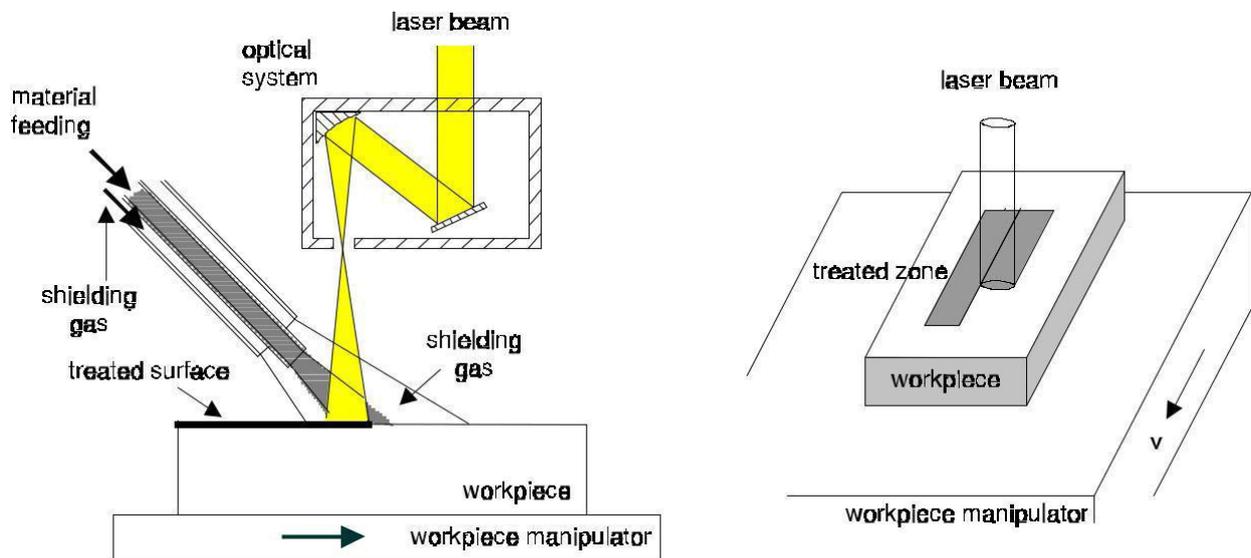


Figure. 3.2 : La pièce effectue un mouvement relatif par rapport au faisceau laser. La zone exposée par le faisceau laser est traitée. Les zones plus grandes peuvent être traitées en appliquant plusieurs pistes adjacentes. [14]

Un laser CO₂ de 2kW peut être utilisé comme source de chaleur. Ce niveau de puissance peut être considéré comme une exigence minimale pour les traitements de surface au laser. Dans la plupart des applications industrielles, la puissance du laser est supérieure à 5 kW. Cela permet de traiter de plus grandes zones en une seule étape. La longueur d'onde de 10,6 μm entraîne des pertes de réflexion importantes. À la température ambiante, 6 à 10% seulement du rayonnement est absorbé par une surface solide en acier faiblement allié. L'absorption peut être augmentée en utilisant des revêtements spéciaux (graphite). Dans les conditions de revêtement l'absorption du rayonnement CO₂ sur une surface d'acier doux est considérablement plus grande : environ 30%.

Récemment, les lasers Nd: YAG ont été développés pour des puissances laser de plusieurs kW, ce qui les rend utiles pour les traitements de surface au laser. La longueur d'onde de 1,06 μm est plus efficace : l'absorption sur une surface d'acier solide est d'environ 30%. [14] Dans des conditions de revêtement, l'absorption augmente jusqu'à 60%.

Un autre avantage par rapport au laser CO₂ est la possibilité de transporter le faisceau laser à travers des fibres optiques, ce qui permet des systèmes de gestion de faisceau flexibles. Compte tenu de ces deux avantages, on peut donc dire que ce type de laser est très utile pour les futurs traitements de surface au laser.

On distingue trois groupes de traitements de surface au laser : ceux sans fusion, ceux avec fusion de la surface et ceux avec fusion de la surface et du matériau additionnel.

Le principe de fonctionnement des traitements de surface au laser les plus courants est résumé à la figure 3.3.

Les effets de la refusion laser et du durcissement par transformation laser sont basés sur un changement microstructural de la couche de surface. Cependant, il peut être nécessaire ou moins coûteux d'appliquer une couche de composition différente sur le matériau de base si le matériau de base lui-même ne peut pas être amélioré suffisamment.

Trois techniques laser permettant d'améliorer les propriétés de surface en modifiant la composition du matériau dans la surface peuvent être distinguées : alliage au laser, dispersion au laser et revêtement au laser. Ces techniques sont schématisées à la figure 4.4.

Les trois méthodes impliquent la formation d'un bain de fusion auquel le matériau est appliqué. En fonction du degré de mélange obtenu entre le matériau ajouté et le matériau de base dans la couche de surface, on peut distinguer l'alliage au laser et la dispersion au laser d'une part, et le revêtement laser d'autre part. La première classe est caractérisée par un mélange complet et / ou une réaction des éléments ajoutés avec le matériau de base. En revanche, le revêtement laser génère une couche de surface qui contient à peine des éléments du substrat au-dessus de la base. [14]

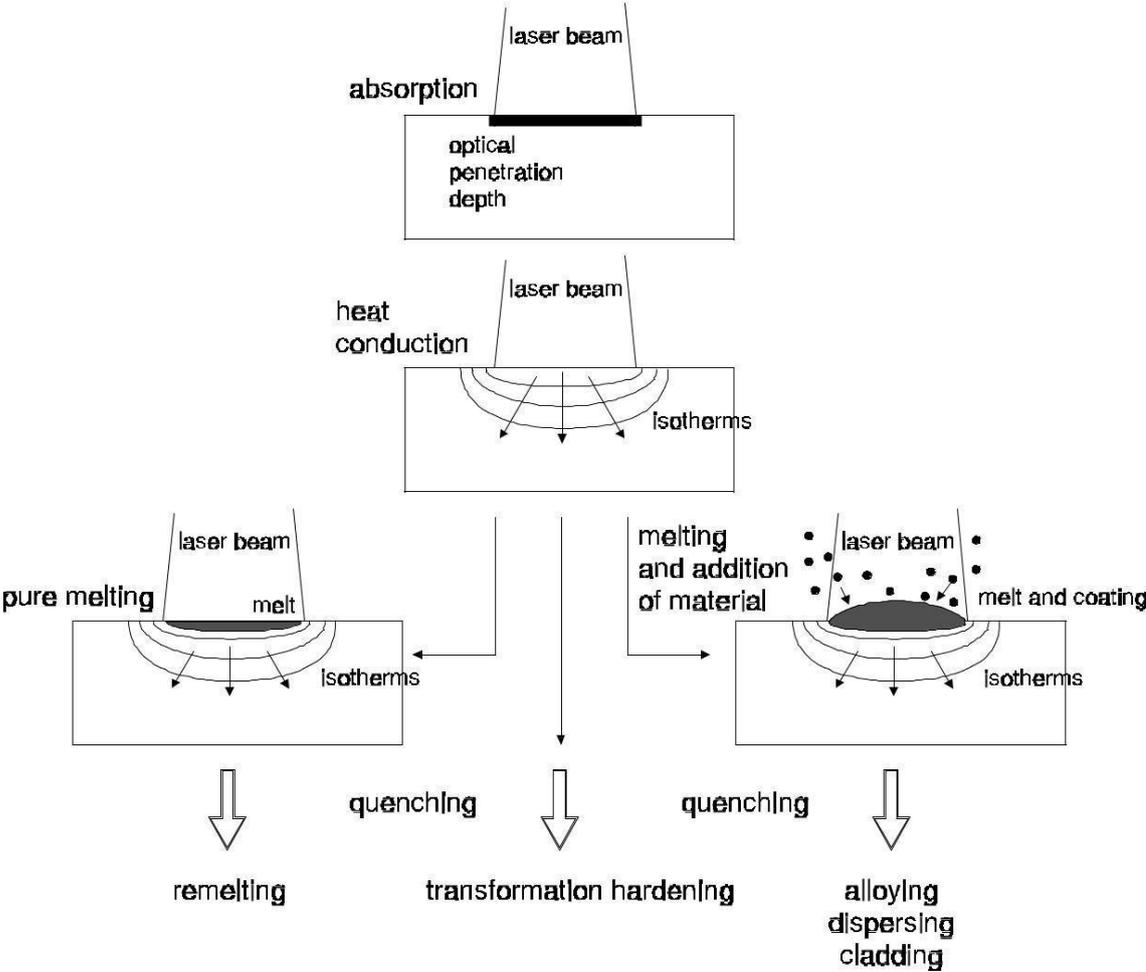


Figure 3.3 Les traitements de surface au laser se distinguent par la température de surface (phase solide / bain de fusion) et par l'addition de matériau. [14]

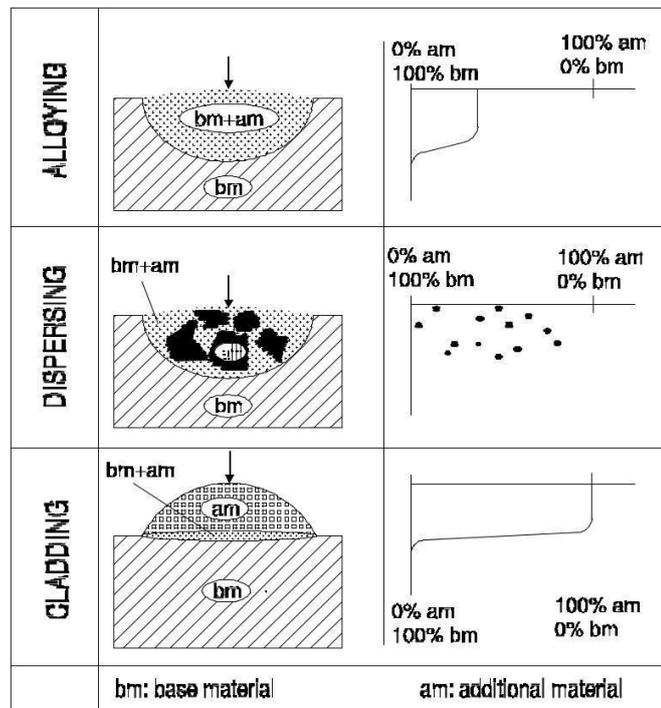


Figure 3.4 : Alliages, dispersions et gaines au laser. La partie droite de l'image indique la répartition des éléments ajoutés, mesurée de haut en bas au centre de la piste. [14]

Il suffit de mélanger suffisamment pour obtenir une liaison solide. Par conséquent, les propriétés de la couche plaquée produite dépendent entièrement du matériau de revêtement appliqué. [14]

3.4.3) Applicabilité de revêtement laser

Le revêtement laser est une technique utilisée pour améliorer la dureté, la résistance à l'usure et / ou résistance à la corrosion des couches superficielles. Le revêtement laser peut également être utilisé pour produire des barrières thermiques pour réaliser des couches appropriées pour une application dans les centrales nucléaires ou pour obtenir des couches de surface empêchant l'empilement. La technique est utilisée pour produire des couches de surface de haute qualité sur de nouvelles pièces, pour produire des pièces entières et pour rénover et améliorer les pièces usagées [14]

Le revêtement est appliqué sur les pièces mécaniques exposées à un environnement agressif : cycles thermiques à vitesses de chauffage et de refroidissement élevées, gaz corrosifs, températures élevées, particules abrasives et / ou érosion par cavitation. La plupart de ces pièces nécessitent uniquement un traitement local pouvant être effectué avec une piste simple vêtue.

Par contre, le revêtement d'une extrudeuse avec une couche de 10 mm de large et 2 mm d'épaisseur sur une longueur de plus de 3 m est un exemple de traitement non local qui nécessite l'utilisation d'un laser de 10 kW. Le revêtement laser n'est pas l'alternative la plus économique pour le revêtement d'une surface aussi vaste en termes de taux de couverture ou de coûts de production.

Cependant, dans ce cas, toutes les autres techniques ne permettent pas d'obtenir une liaison de fusion forte entre le revêtement et le matériau de base. Pour le bardage de surfaces encore plus grandes, de très hautes puissances de CO₂ lasers avec une puissance laser supérieure à 20 kW sont disponibles. Ils peuvent être utilisés en une étape pour produire des pistes de 44 mm de large et de 5,5 mm de hauteur [14].

3.4.4) Revêtement au laser et méthodes conventionnelles

Le revêtement au laser est l'une des techniques de revêtement utilisées pour améliorer les propriétés de surface des pièces mécaniques. Des exemples d'autres méthodes de revêtement thermique sont la projection à la flamme, la projection au plasma et le soudage à l'arc. Le revêtement appliqué sur le matériau de base doit fournir les propriétés de surface requises, telles que la résistance à la corrosion ou à l'usure. L'utilisation d'un matériau dédié sur un matériau de base peu coûteux permet de réaliser des économies de coûts considérables.

Le matériau de revêtement peut être préalablement placé sur le substrat à recouvrir ou lui être fourni au cours du processus. Tous les procédés appliquent une source de chaleur pour faire fondre le matériau de revêtement et / ou le matériau de base. Selon la technique, une liaison par fusion ou une liaison adhésive est réalisée entre la couche de surface et le matériau de base. En général, l'utilisation d'un faisceau laser dans les traitements de surface offre plusieurs avantages par rapport aux sources de chaleur conventionnelles [14]

L'approvisionnement en énergie peut être bien contrôlé ;

- ❖ Un traitement très local est possible;
- ❖ L'apport total de chaleur est faible, entraînant une distorsion minimale;
- ❖ Les vitesses de chauffage et de refroidissement sont élevées, ce qui entraîne une microstructure fine et / ou des phases métastables;
- ❖ Le traitement est un processus sans contact. Il n'y a aucune usure de l'outil, ni aucune force mécanique sur la pièce;
- ❖ La profondeur du processus est bien définie.

Certains chercheurs décrivent certains autres avantages du revêtement au laser par rapport aux techniques de revêtement conventionnelles. La combinaison d'une dilution minimale contrôlée du substrat par le matériau de revêtement et néanmoins d'une très forte liaison par fusion entre eux constitue une caractéristique unique du revêtement au laser. La porosité dans le revêtement peut être totalement évitée et une répartition homogène des éléments peut être obtenue. [14]

3.4.5) Méthodes de revêtement au laser

Deux principes d'application de matériaux peuvent être distingués: la technique à deux étapes (pré-placée) et la technique à une étape (in-situ), qui sont toutes les deux illustrées à la figure 4.4. Cependant la méthode à une seule étape qu'on va utiliser dans notre cas donc on va la présenter dans les paragraphes qui suit. Le matériau de revêtement est principalement fourni sous forme de particules de poudre.

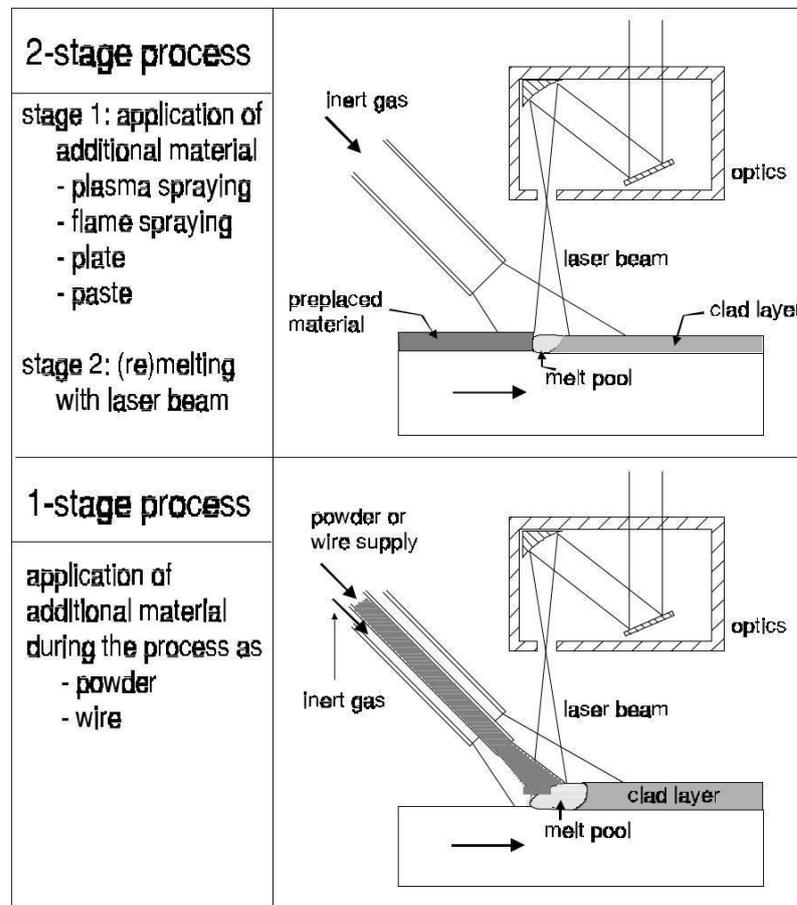


Figure 3.5 : Revêtement laser à deux étages (pré placé) et à un étage (in-situ) [14]

Processus en une étape

Le processus en une étape commence par la formation d'un bain de fusion dans le substrat. Simultanément, le matériau de revêtement est introduit dans cette bain et fond; une liaison de fusion forte entre le matériau de revêtement et le substrat est obtenue immédiatement.

Le procédé en une étape présente plusieurs autres avantages par rapport au processus en deux étapes:

- ❖ Des zones plus grandes qui nécessitent l'application de plusieurs pistes adjacentes peuvent être produites avec une dilution moindre. La contraction des couches plaquées lors du refroidissement se produit toujours, mais comme le matériau est amené sur le substrat près de la piste précédente, aucune partie du substrat n'est irradiée inutilement;

- ❖ L'épaisseur du revêtement peut être modifiée en ligne en contrôlant le taux d'alimentation du matériau;
- ❖ Les produits à géométrie complexe peuvent être traités, car les matériaux sont acheminés en continu vers la zone d'interaction. Par conséquent, l'écoulement par gravitation du matériau fondu n'est plus un problème.

Deux méthodes d'alimentation sont disponibles: l'alimentation en fil et l'injection de poudre.

Fil d'alimentation peut être utile pour le revêtement de produits à symétrie de révolution pouvant être plaqués sur une piste continue. Le positionnement du fil sur le substrat est un aspect critique du processus pour deux raisons:

- ❖ Le fil est généralement en contact direct avec le bain de fusion dans le substrat. Afin de ne pas perturber ce bain de fusion, le procédé nécessite l'utilisation d'un système de positionnement du fil précis et d'un contrôle précis du taux d'alimentation en fil;
- ❖ Le substrat est partiellement protégé du faisceau laser par le fil solide. Pour permettre une couche de revêtement de bonne qualité, c'est-à-dire avec une bonne liaison au substrat, aux surfaces étalées et lisse, il faut utiliser un rapport entre le diamètre du faisceau et le diamètre du fil d'au moins un facteur de trois. Le fil doit être bien aligné au centre du point laser pour assurer la formation d'une couche plaquée symétrique.

La buse d'alimentation en fil doit être proche de la zone de traitement pour permettre une alimentation précise du fil dans le bain de fusion. Par conséquent, l'usinage de produits courbés, de formes concaves en particulier, est difficile.

L'utilisation de têtes rotatives d'alimentation en fil permet un revêtement avec un angle constant entre le fil et le substrat, ainsi qu'un angle constant entre la direction d'injection et le mouvement relatif du substrat.

L'efficacité du procédé peut être augmentée par l'application d'une unité d'induction pour préchauffer le fil.

L'injection de poudre dans un bain de fusion généré par laser est une méthode beaucoup plus répandue que le revêtement par fil. La méthode est plus flexible: elle permet la variation en ligne des dimensions et de la composition des gaines, de nombreux autres éléments et alliages sont disponibles sous forme de poudre puis sous forme de fil.

Le revêtement par injection de poudre est une méthode plus robuste que le revêtement par fil, car il n'y a pas de contact direct avec le bain de fusion et le faisceau laser peut traverser le flux de particules de poudre au lieu d'être obstrué par le fil. [14]

3.4.6- Propriétés des couches de revêtement

Les propriétés des couches de revêtement sont classées en quatre groupes (tableau 3.1). Certaines de ces propriétés peuvent être liées entre elles. La résistance à l'usure peut, par exemple, être affectée par la dureté, la microstructure, le nombre de fissures, leur profondeur et leur direction, la liaison entre le matériau de base et le substrat, etc

Tableau. 3.1 Propriétés des couches plaquées [14]

Propriétés géométriques	Propriétés mécaniques	Propriétés métallurgiques	Propriétés Qualitatives
Dimensions du revêtement	distribution de dureté	Microstructure	Porosité
dilution	contrainte résiduelle	dilution	fissuration
rugosité	résistance à l'usure	taille d'un grain	
	résistance à la traction	homogénéité	
		résistance à la corrosion	

En pratique, il est difficile de produire une couche plaquée qui réponde à toutes les exigences. Généralement, un équilibre doit être trouvé entre plusieurs propriétés. Un exemple est la réduction de la formation de fissures dans la couche plaquée en préchauffant le substrat. Le préchauffage réduit les vitesses de refroidissement et la contrainte résiduelle résultante. Par conséquent, la formation de fissures est évitée et la dureté est également. La prévention des fissures est importante car les fissures provoquent la corrosion et réduisent la résistance à la fatigue. [14]

Dilution

Le revêtement au laser nécessite la création d'une forte liaison par fusion entre le matériau de revêtement et le substrat, ce qui nécessite à son tour la formation d'un bain de fusion dans le substrat. Il convient toutefois de noter que la profondeur de cette masse fondue doit être aussi petite que possible afin d'obtenir une couche de surface pure qui ne soit pas diluée par le matériau de base.

La dilution de la couche de revêtement produite par des éléments du substrat est utilisée pour caractériser la qualité du revêtement. On peut la mesurer de deux manières. La première méthode est basée sur la géométrie de la couche de revêtement (figure 4.5). La dilution est alors

définie comme le rapport de la profondeur de revêtement (d_c) dans le substrat sur la hauteur totale de revêtement (t_c). Cette approche géométrique suppose une répartition homogène des éléments sur la section transversale du revêtement.

La deuxième méthode est basée sur une analyse de la composition du matériau dans la couche plaquée (dilution «chimique» ou «volumétrique»). Une comparaison est faite entre la composition du matériau de revêtement pur et celle du substrat. Cette méthode permet de déterminer une variation de la dilution sur la profondeur de revêtement et est préférable à l'approche géométrique. [14]

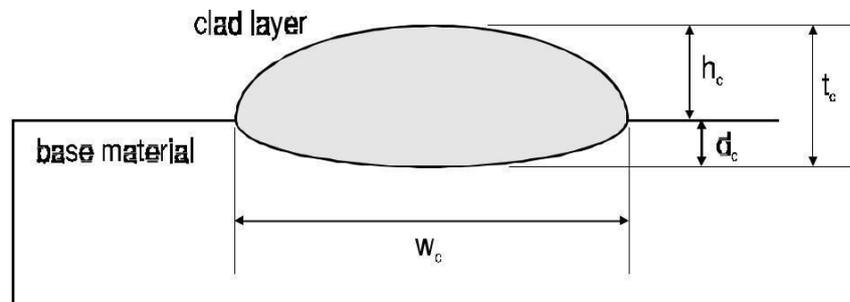


Figure 3.6 : Coupe d'une seule couche de revêtement avec définition de la géométrie du revêtement: hauteur de revêtement (h_c), profondeur de revêtement (d_c), hauteur totale de revêtement (t_c) et largeur de revêtement (w_c). [14]

Porosité

La présence de trous dans la couche de revêtement est appelée porosité. La porosité peut être causée par plusieurs raisons. Premièrement, cela peut être dû à la formation de bulles de gaz qui sont piégées dans le bain de fusion en fusion. Ce phénomène peut être diminué par une vibration de la pièce (fréquence: 25 Hz; amplitude: 20 mm). Il a été observé que ce revêtement laser "vibro" réduit également les contraintes internes et la fissuration.

Deuxièmement, si la solidification se déroule dans des directions différentes, certaines régions de la fusion peuvent être enfermées. Une contraction se produit lors de la solidification de ces régions fermées. Cette contraction provoque une contrainte de traction dans la couche et peut même conduire à la formation de trous. Ces deux types de porosité se retrouvent dans les couches plaquées.

Deux autres types de porosité sont confinés à l'interface revêtue de substrat. Le premier est dû à la présence de défauts mineurs, tels que la graisse qui influence la tension superficielle et donc la liaison du matériau de revêtement au substrat.

Le dernier type de porosité apparaît lorsque des pistes superposées sont appliquées comme indiqué à la figure 3.7. Cette «porosité inter-couches» peut se produire lorsque trop de poudre est fournie. Cela peut être évité avec un rapport largeur-hauteur de plus de cinq [14].

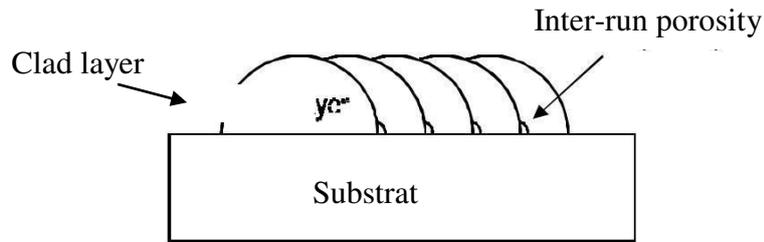


Figure 3.7 : Porosité entre les couches. [14]

3.5) Projection thermique

3.5.1) Introduction

La projection thermique est définie comme un procédé de dépôts de particules liquides, semi liquides ou solides se déposant sur un substrat, se solidifiant et s'agglomérant. Le matériau projeté était, à l'origine, sous la forme de fil, ou de poudre. Quand les matériaux de revêtement sont alimentés par l'unité de projection, ils sont chauffés au dessus de leur température de fusion ou l'état plastique et propulsé par un flux de gaz comprimé sur le substrat. En raison de l'accélération et de la température des particules, ces dernières s'aplatissent et forment des plaquettes minces qui adhèrent aux irrégularités de la surface préparée et au revêtement déjà formé. Particule par particule, le dépôt se constitue avec une structure lamellaire. Le pistolet génère la chaleur nécessaire à la fusion de particule par la combustion de gaz, par un arc électrique, ou grâce à un plasma.

La projection thermique est une technique très polyvalente et est très utilisée pour fabriquer des revêtements avec des propriétés de résistance à l'usure, de résistance à l'oxydation, de résistance à la corrosion, pour restaurer des dimensions, pour élaborer des barrières thermiques etc. Actuellement, cinq techniques différentes de projection thermique sont disponibles dans le commerce : La projection de fil à l'oxygène (Oxygen Fuel Wire spray: OFW), la projection arc fil (Electric Arc Wire spray: EAW), la projection de poudre à l'oxygène (Oxygen Fuel Powder spray: OFP), la projection plasma atmosphérique de poudre (Plasma Arc powder spray: PA) et la projection à la flamme supersonique (High-Velocity Oxygen Fuel powder spray: HVOF). [15]

3.5.2) La projection à la flamme supersonique HVOF : Principe et fonctionnement

Le procédé HVOF brûle efficacement l'oxygène et un combustible gazeux ou liquide pour produire une énergie cinétique élevée avec un apport de chaleur contrôlé. Le matériau de revêtement, sous forme de poudre, est introduit et uniformément chauffé par le flux de gaz chaud jusqu'à l'état fondu ou semi-fondu.

La flamme et la poudre sont accélérées par une buse convergente / divergente (chapeau d'air) pour produire des vitesses supersoniques de gaz et de particules, qui propulsent les particules de poudre vers le substrat à revêtir.

Les particules de poudre s'aplatissent plastiquement lors de l'impact avec le substrat ; elles refroidissent et se solidifient pour former le revêtement. Des vitesses de particules élevées, un chauffage uniforme et un temps de séjour réduit se combinent pour produire des revêtements très denses et étroitement liés au substrat. Les chimies de revêtement sont plus prévisibles et les revêtements ont des microstructures fines et homogènes. [16]

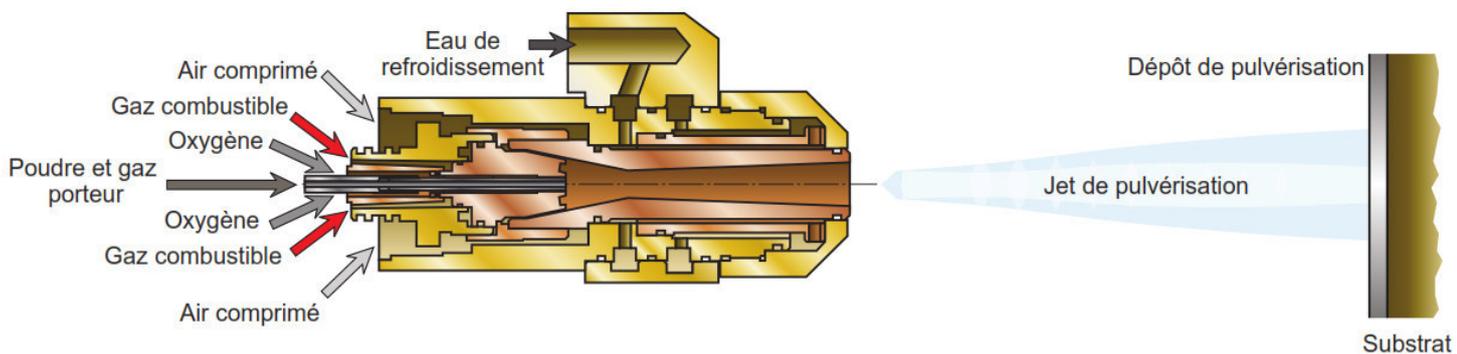


Figure 3.8: Pistolet HVOF à carburant gaz [17]

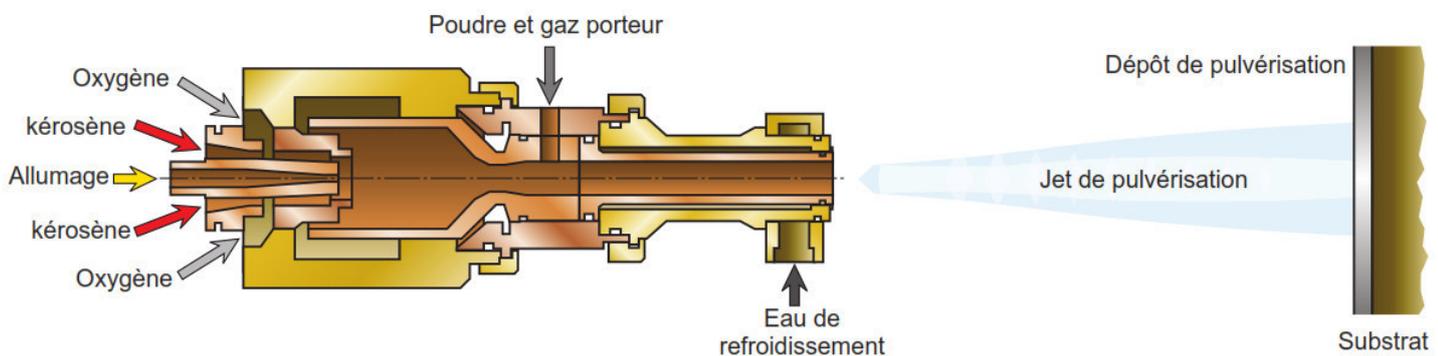


Figure 3.9 : Pistolet HVOF à carburant liquide [17]

3.5.3) Les différents types d' H.V.O.F

Les procédés H.V.O.F se répartissent en deux familles

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

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

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 **H.V.A.F** (High-Velocity Air Fuel), utilise quant à lui un mélange de combustion kérosène/air comprimé, d'un coût d'exploitation très faible. [18]

a)- Comparaison générale des technologies HVOF à combustibles gazeux et liquides

Tableau 3.2 : comparaison des différents paramètres de deux types de HVOF [17]

	HVOF à carburant gaz	HVOF à carburant liquide
Possibilités de carburant	H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₃ H ₆ , C ₃ H ₈	Jet-A, kérosène
La pression de combustion	~ 0.55 MPa	0.55 à 0.83 MPa
Vitesse du gaz	1800 à 2100 m/s	2000 à 2200 m/s
Vitesse des particules	450 à 600 m/s	475 à 700 m/s
Injection de poudre	Alimentation axiale (zone plus chaude)	Alimentation radiale (zone plus froide)
Pression d'injection de poudre	Supérieur	Inférieur
Débit de pulvérisation	jusqu'à 120 g/min	jusqu'à 200 g/min
Comparaison de la consommation (consommation typique des services utilitaires pour une heure de fonctionnement)		
Carburant	43800 l H ₂ , ou 5280 l C ₃ H ₆ , ou 5280 l C ₃ H ₈	28 l kérosène
Oxygène	18420 l	61400 l
Eau	600 l	2375 l

b)- Choix du type

Le choix sera guidé par la qualité du revêtement à obtenir, en tenant compte du 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.

3.5.4) 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. Les principaux paramètres du procédé HVOF, contrôlables par l'opérateur, ainsi que les caractéristiques inhérentes à l'état des particules de poudre dans la flamme supersonique (vitesse et température) sont présentés aux paragraphes suivants. Ils consistent en les paramètres de la torche, le débit de matières premières, les propriétés des particules pendant le vol, la distance de projection, l'angle de projection et la température du substrat. [18]

a) 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 des 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. [18]

b) 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 des défauts microstructuraux dans les revêtements. [18]

c) 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. [18]

❖ 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 3.10 pour des poudres d'alumine. [18]

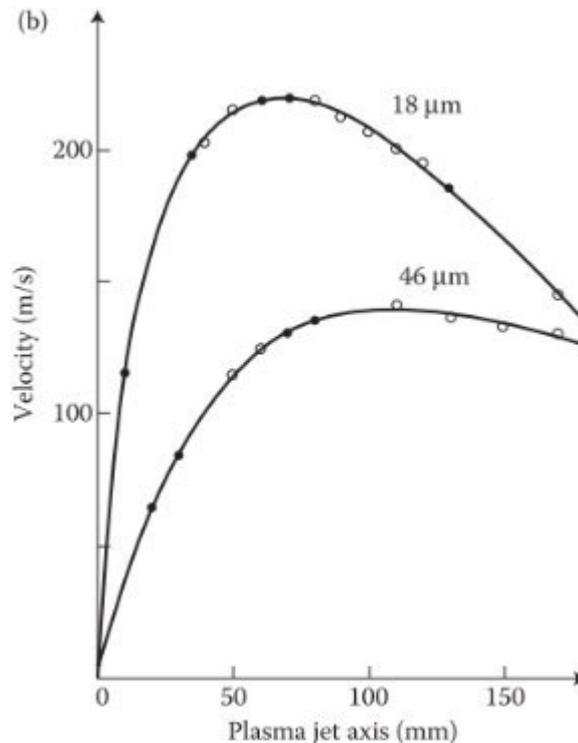


Figure 3.10 : Effet de la taille de particule (18 μm et 46 μm) sur l'évaluation de la vitesse d'une particule en fonction de la distance de projection d'une poudre d'alumine obtenue avec la projection au plasma. [18]

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.

La vitesse des particules dans le procédé HVOF est aussi reliée aux propriétés mécaniques des revêtements déposés. Par exemple certains chercheurs [16] ont signalé l'importance de la vitesse des particules en relation avec la dureté des revêtements et l'efficacité de déposition. Ils ont observé qu'autant la dureté que l'efficacité de déposition augmentent lorsque la vitesse des particules dans le jet de flamme est maximale. Ils ont travaillé avec des systèmes HVOF DJ-2600 et DJ-2700, pour trois poudres commerciales de type WC-12Co.

D'autres travaux comme ceux de ont tiré les mêmes conclusions pour la résistance à la corrosion de revêtements HVOF de type WC-Co-Cr. Ils ont déterminé que l'obtention des vitesses de projection élevées contribue à donner un revêtement plus compact et homogène, fournissant ainsi un revêtement ayant une bonne protection contre la corrosion.

D'autres travaux nous indiquent une forte dépendance linéaire entre la vitesse des particules avec les contraintes résiduelles (mesurés par la méthode de déflexion almen) des revêtements HVOF de type nanostructurée de titane (TiO_2). Aux valeurs basses de vitesse des particules, il est possible de produire des revêtements sans des niveaux significatifs de contraintes résiduelles. Cependant, pour les revêtements produits dans des valeurs plus élevées de vitesse des particules, il a été clairement observé que les niveaux de contraintes résiduelles de compression étaient supérieurs dans les revêtements. [18]

❖ **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 (voir figure 3.11). Selon cette figure, 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). Par contre, lorsque les particules parcourent des distances plus grandes, la température des petites particules tend à diminuer plus rapidement que celles de plus grosses particules à cause de la plus grande friction de l'air (les petites particules ont plus de surface pour une masse thermique donnée). [18]

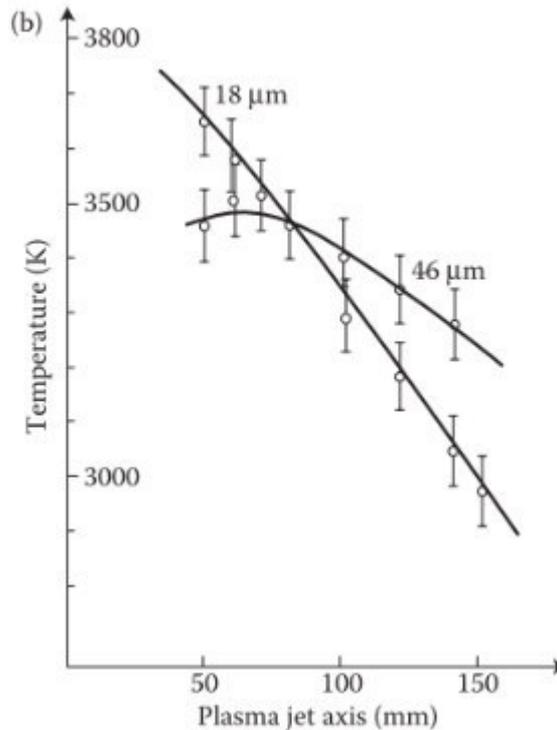


Figure 3.11: Effet de la taille des particules (18 μm et 46 μm) sur l'évaluation de la température d'une particule en fonction de la distance de projection d'une poudre d'alumine obtenue avec la projection au plasma. [18]

La température des particules influe la porosité ainsi que la dureté des revêtements de WC-Co-Cr produits. Dans ces travaux, le système de projection qui a été utilisé pour leurs résultats est le HVOF DJ-2600 et la poudre employée a été de type WC-Co-Cr avec une taille de particules de 11 + 45 μm . Il a été constaté que le pourcentage de porosité diminue lorsque la température des particules augmente. De plus, la dureté des revêtements devient plus élevée lorsque la température des particules passe de 1950 °C à 2150°C.

Les travaux de ont aussi déterminé qu'il existe une dépendance linéaire entre la température des particules et les contraintes résiduelles (mesurés par la méthode de déflexion almen) des revêtements HVOF de type nanostructurée de titane (TiO_2). Les températures de particules plus élevées induisent des niveaux plus élevés de contraintes de compression sur les revêtements et vice-versa. Ces niveaux de contraintes résiduelles sont dus à la trempe et contraction de particules fondues ou semi-fondues pulvérisées à la surface du substrat. [18]

d) Distance de projection

La distance de projection est définie comme la distance existant entre la sortie de la buse et la surface du substrat à traiter. Généralement, pour les procédés HVOF elle se trouve dans une plage de 150 à 300 mm (Pawlowski, 2008). 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 (voir 3.12) 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.

Une distance optimale de projection est donc nécessaire pour s'assurer d'un bon dépôt avec une qualité homogène et couvrir le maximum de la pièce sans entraîner dans des pertes du matériau. Une fois que la distance de projection est établie, elle doit être maintenue constante pendant toute l'opération de projection, indépendamment du mouvement de la torche nécessaire entre les passes pour s'assurer d'une épaisseur uniforme sur la pièce.

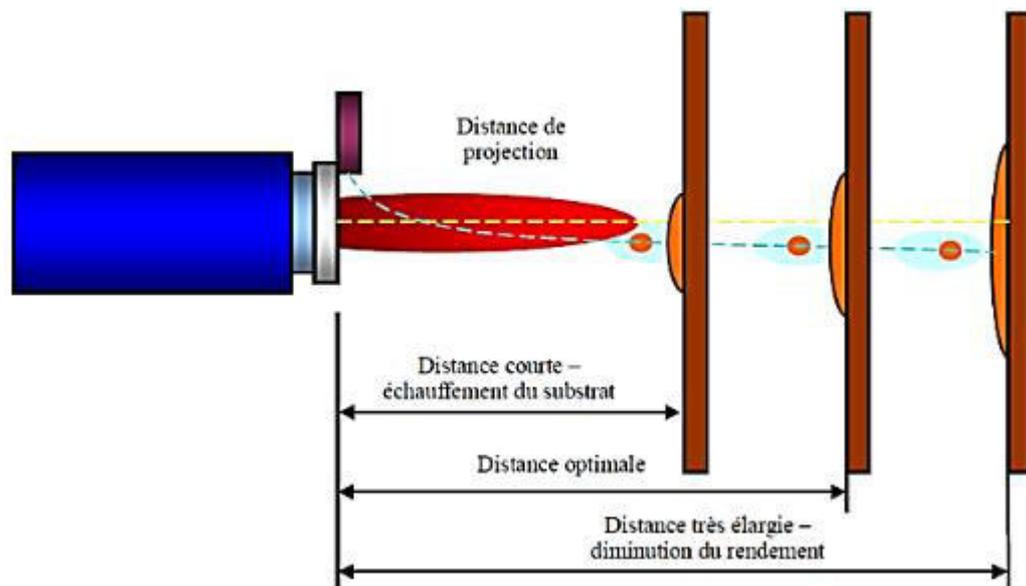


Figure 3.12 : Schéma de distance de projection dans les procédés de projection thermique. [18]

Les travaux d'ont étudié l'influence de la distance de projection ainsi que des débits d'oxygène et de kérosène sur la résistance à la corrosion des revêtements par projection HVOF de type WC-10Co-4Cr. La méthode Taguchi y compris le rapport signal sur bruit (S/B) et l'analyse de variance (ANOVA) ont été utilisées pour optimiser la porosité et, par conséquent, la résistance à la corrosion des revêtements. Les résultats ont indiqué que la distance de projection est le facteur le plus important affectant la résistance à la corrosion de ces revêtements. Dans ce sens, ils ont déterminé que la distance de projection optimale se trouve à 300 mm, la condition la plus favorable du point de vue de la résistance à la corrosion. [18]

e) 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 $90^\circ \pm 20^\circ$ afin d'obtenir le meilleur rendement de la projection (Houdkovà, Kasparova et Zahalka, 2010). L'angle de projection et d'autres paramètres influent sur la qualité des revêtements obtenus par projection thermique. 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. [18]

f) Température du Substrat

La température du substrat et d'autres paramètres influent sur les propriétés des revêtements par projection thermique HVOF. L'interaction particules/substrat est différente lorsque le substrat est chaud et lorsqu'il est à température ambiante. Dans certains travaux, il a été signalé l'influence de la température du substrat sur l'aplatissement et la solidification des particules une fois l'impact. Il a été montré que, sur des substrats à haute température 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. [18]

3.5.5) Méthodes de caractérisation des poudres

Les poudres utilisées en projection thermique HVOF sont caractérisées principalement par :

- Distribution granulométrique
- Densité apparente
- Coulabilité
- Morphologie
- Composition de phases.

Ces caractéristiques sont nécessaires pour évaluer les propriétés physiques et chimiques des poudres afin d'obtenir un bon contrôle de la qualité et assurer le bon rendement du procédé. [18]

Dans les paragraphes suivants seront expliquées les méthodes de caractérisation des poudres.

a) Distribution granulométrique

La granulométrie est une méthode de caractérisation qui sert à connaître la distribution volumétrique des particules dans un lot de poudre. Elle détermine les intervalles de diamètres des particules d'un échantillonnage représentatif du matériau. Une des techniques les plus utilisées pour l'étude de la distribution granulométrique des poudres est la granulométrie laser. « Cette technique consiste à mesurer l'intensité de la lumière diffusée lors du passage d'un faisceau laser à travers un échantillon de particules dispersées. Cette donnée est ensuite analysée pour calculer la taille des particules qui ont créé l'image de diffraction » [18]

b) Densité apparente

La densité apparente est définie comme le rapport entre la masse et le volume occupé par les particules de poudre. Dans ce ratio, on comptabilise aussi les interstices créés entre ces mêmes particules. La procédure consiste à déposer environ 100 gr (m) de poudre dans un cylindre gradué de 250 ml et lire le volume apparent (V_0) occupé par les particules de poudre. Le rapport selon la formule (m/V_0) correspond à la densité apparente. Avec cette propriété, on peut avoir une idée sur la porosité interne des particules de poudre. [18]

c) Coulabilité

La coulabilité est la capacité que possède un medium à s'écouler par un orifice calibré, tel un entonnoir. L'écoulement est un facteur important qui peut influencer le comportement physique des poudres lorsqu'elles rentrent dans la flamme (vitesse et température des particules). [18]

d) Morphologie

La forme (morphologie) des particules d'une poudre dépend principalement du procédé de fabrication employé. Les différentes morphologies schématiques des particules de poudre sont présentées à la figure 3.13. [18]

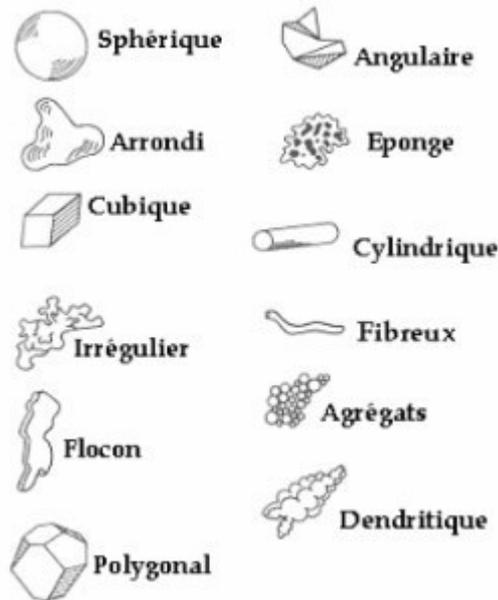


Figure 3.13 Morphologies des particules de poudre. [18]

La morphologie des particules est généralement observée par microscopie électronique; soit le microscope électronique à balayage (MEB) ou le microscope électronique à transmission (MET) respectivement. La forme des particules influence considérablement la capacité à l'écoulement des poudres. Plus elles sont de forme sphérique, plus elles ont la capacité à s'écouler ce qui est très bénéfique pour leur comportement à l'intérieur de la flamme. [18]

3.6) Cas d'application

3.6.1) Revêtement par HVOF

3.6.1.1) Introduction

Une bonne qualité de revêtement avec des propriétés appropriées et des performances requises pour des applications spécifiques est l'objectif du revêtement par projection thermique. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de mieux comprendre le processus de pulvérisation dans son ensemble. Le substrat de départ, le procédé de pulvérisation et les interactions particule-substrat influent la formation d'un revêtement.

3.6.1.2) Substrat

- Substrat SCM 440

C'est un acier en alliage de chromage, ce matériau a subi un traitement thermique, une trempe à 850°C pour une heure et un recuit à 350°C pendant trois heures. SCM440 est utilisé généralement dans des engrenages, des arbres de transmission ou bien comme dans notre cas la tige de piston, ce type de matériau est utilisé dans tous les domaines dans lesquels la recherche est

concentrée sur des pièces ayant une grande résistance interne. Sa dureté est de 32 HRC. La composition chimique de SCM440 est présentée dans le tableau suivant [19]

Tableau 3.3 : Composition chimique (%massique) [19]

Matériau	Elément	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
SCM 440	%Massique	0.39	0.23	0.80	0.16	0.27	0.14	0.10	1.04	0.15

Dans le tableau suivant on montre les propriétés mécaniques du substrat avant revêtement sur une éprouvette identique à celle montrée dans la figure suivante

JIS Z2201-5

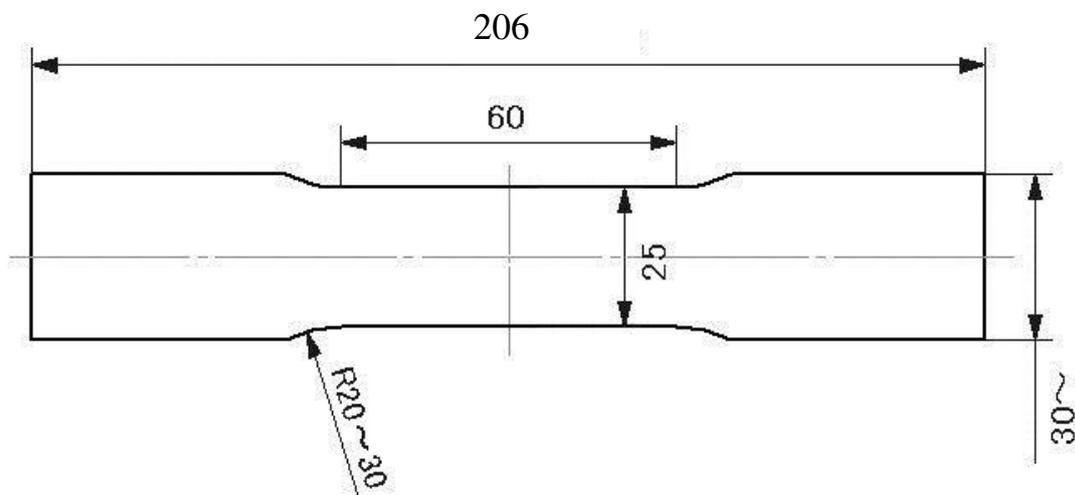


Figure 3.14: éprouvette model Jis Z 2201-5 [19]

Tableau 3.4 : les propriétés mécaniques d'une éprouvette en SCM440 [19]

Limite d'élasticité	Résistance à la traction	Elongation	Striction
N/mm ²	N/mm ²	%	%
91	110.5	20.8	56.8

3.6.1.2) Choix de la méthode

Depuis plus de 70ans, le revêtement par chromage dur a été le plus favorisé pour donner une bonne résistance à l'usure, aux chocs et à la corrosion mais les dernières années plusieurs limitations de performance ont poussé la communauté de l'ingénierie à trouver des alternatives plus performantes avec un meilleur rapport coût-efficacité.

Parmi les alternatives les plus prometteuses est la projection à la flamme supersonique (HVOF). Des essais de performance approfondis et de nombreuses applications commerciales réussies par HVOF (roulements et paliers de moteurs à réaction, arbres de turbine, piston et tige de piston) dans des cas similaires au notre ont été effectués.

Au-delà des avantages de performance que les revêtements en HVOF peuvent apporter dans des conditions de fonctionnement difficiles, le procédé de revêtement HVOF est plus facile à réaliser que le chromage dur classique.

En fait, diverses évaluations technologiques déjà publiées (dont plusieurs projets conjoints entre les secteurs privé et militaire) ont conclu que la projection thermique HVOF est une technologie viable pour remplacer le chromage dur. Jusqu'à présent, des essais approfondis en laboratoire et sur prototype, ainsi qu'une expérience commerciale de plus en plus poussée, ont démontré des performances comparables ou supérieures à celles du chromage en termes d'usure, de corrosion et de résistance à la chaleur, de faisabilité d'application, de coût global du cycle de vie et de rentabilité des procédés.

Le procédé de dépôt HVOF est plus rapide que le chromage conventionnel. Les revêtements typiques sont appliqués en une heure ou deux, contre 24 heures ou plus pour le chromage dur. De plus, contrairement aux revêtements en chrome dur, les revêtements en HVOF ne subissent pas de fragilisation par l'hydrogène, ce qui permet d'éliminer le temps et les coûts nécessaires au traitement de réduction de la fragilisation.

Tous ces facteurs concourent à réduire la fréquence des réparations et à accélérer les révisions et les travaux d'entretien. Il en résulte une réduction du temps de mise hors service et, en général, une réduction des coûts globaux du cycle de vie associés aux pièces

Faisons maintenant une comparaison de quelque propriété du chromage dur et de carbure de tungstène, dans le tableau suivant : [20]

Tableau 3.5 : comparaison entre HVOF et chromage dure [20]

Propriétés	Revêtement HVOF du carbure de tungstène	Revêtement par chromage dur
Dureté HRC	>70	60-70
Microdureté DPH300	>1050	750-850
Energie de liaison (MPa)	>8	41
Porosité	<1%	Intrinsèquement fissuré
Epaisseur de revêtement (mm)	>0.08	<0.13
Rugosité (Ra)	<4	<4
Test de corrosion ATSM B117 (heures)	720	55
Limite de température de surface °C	550	400

De plus cet alliage comporte des problèmes environnementaux. Les bains de placage de chrome dur contiennent de l'acide chromique, dans lequel le chrome est à l'état hexavalent (Cr^{6+}) qui est connu comme un agent cancérigène ayant un niveau de toxicité supérieur à l'arsenic ou le cadmium. Pendant le fonctionnement, les réservoirs de chromage émettent une brume de chrome hexavalent dans l'air qui doit être enlevée par des épurateurs et rejetée dans l'atmosphère. Les déchets produits par électrodéposition doivent être éliminés comme des déchets toxiques et les opérations de placage doivent se conformer à des normes environnementales de plus en plus sévères afin de réduire au minimum les risques sanitaires. [18]

Toutes ces données concourent au choix de faire un revêtement par HVOF.

3.6.1.4) Choix de la poudre

La première étape du choix d'une poudre de revêtement pour la projection par HVOF pour une application spécifique consiste à définir une fonction de revêtement.

Dans notre cas un contrôle non destructif par ultrason a été effectué à la tige de piston pour détecter les défauts et les localiser. Ceci a pu montrer un état d'usure glissant développé au niveau de la surface de contact entre la garniture d'étanchéité et la tige de piston. Donc la fonction clé que le revêtement doit accomplir est de prolonger la résistance à l'usure et prolonger la durée de vie de l'organe. Sur cet aspect plusieurs tests ont été faits au niveau des laboratoires et sur des prototypes

pour faire une liaison entre les différentes poudres et différents défauts, aussi entre différentes poudres et différentes fonctions. Le tableau (3.6) liste les fonctions les plus courantes pour le revêtement par projection thermique, les types de matériaux utilisés et les exemples d'application.

Tableau 3.6 : sélection des matériaux [21]

Fonction de revêtement	Applications	Matériaux
usure abrasive	Lames de coupe Bouchons de moule en verre Pompe centrifuge à volute	Carbure de tungstène-cobalt Carbure de nickel-chrome-chrome Alliage de rechargement dur à base de cobalt Alliage auto-fluxant nickel/cobalt
Usure de glissement	Tige de piston Segment de piston Arbres de roue Alésages de cylindre	Carbure de tungstène cobalt nickel chrome Fonte-molybdène Titane Métal de Babbitt
Impact, usure par frottement vibratoire	Amortisseurs à mi-portée Tiges de ventouse	Cobalt chrome chrome molybdène Carbure de tungstène cobalt
Chrome d'usure par érosion/cavitation	Aube de turbine à vapeur Application turbine à eau	Carbure de tungstène cobalt Carbure de chrome-chrome-nickel

Afin de déterminer le meilleur matériau pour une application particulière, il faut considérer d'autres facteurs. Le coût des matériaux, la vitesse de déposition, les exigences de finition, l'épaisseur du revêtement, la disponibilité de l'équipement sont tous des éléments importants à considérer. Aussi, les critères d'acceptabilité doivent être considérés (tableau 3.7). Ces facteurs seront expliqués plus loin.

Tableau 3.7 : critères d'acceptabilité

Propriétés demandées	Critères d'acceptabilité
Épaisseur	1m
Adhésion	Non-séparation ou enlèvement du dépôt avec le substrat
Microstructure	Le revêtement ne doit pas avoir des fissures ou délaminations. Niveau de porosité exigé < 1 %.

En définissant la fonction clé de revêtement et en exploitant les données du tableau proposé par les ingénieurs spécialistes dans le domaine, nous allons choisir le matériel *Carbure de tungstène cobalt nickel chrome* appelé par l'entreprise TM Comas *HVOF-843*. Non seulement par ce qu'il est recommandé par les ingénieurs spécialités mais par ce qu'il satisfait nos critères d'acceptabilité.

- Propriété de la poudre HVOF-843

Afin d'aborder les propriétés de la poudre on commence par présenter la composition chimique de la poudre (tableau 3.8).

Tableau 3.8: composition chimique [22]

Eléments	C	Ni	Cr	Fe	Co	W
%massique	5.47	1.07	5.50	0.08	8.76	Balance.

Les propriétés thermochimiques de carbure de tungstène (tableau 3.9)

Tableau 3.9: propriété thermochimiques du carbure de tungstène [23]

Point de fusion	2785-2830°C
Point de vaporisation	6000°C
Densité	15.63 g/cm ³
Capacité thermique	39.8 J/(mol·K)
Conductivité thermique	110 W/(m·K)
Taille des particules	46µm

La propriété mécanique de la poudre est montrée sur le tableau (3.10) :

Tableau 3.10: les propriétés mécaniques de WC-Cr-Co [23]

Dureté HRC	Module de Young GPa	Résistance à la traction N/mm ²
85	250	344

3.6.1.5) Les paramètres de projection

Pour faire un bon choix de la température et de la vitesse des particules on opte pour l'utilisation de la méthodologie de cartographie des procédés. Celle-ci est développée pour le contrôle des procédés et l'optimisation des propriétés de revêtement. Dans le concept de cartographie des procédés, les outils de diagnostic sont utilisés pour comprendre les principes fondamentaux des relations dans le procédé de pulvérisation thermique, à partir de la poudre jusqu'au procédé de pulvérisation thermique, à la formation des dépôts, aux caractéristiques du revêtement et finalement à la performance du revêtement. Un diagramme de processus de premier ordre exprime la relation entre les paramètres de la torche et les particules dans le jet de pulvérisation. Un diagramme de processus de deuxième ordre représente la relation entre les réponses mesurées du jet de pulvérisation et les propriétés du revêtement. L'évaluation systématique des procédés, menant éventuellement à l'optimisation des propriétés de revêtement pour une performance spécifiée et une évaluation de la fiabilité du procédé, peut être effectuée en créant des cartes de premier et de second ordre pour certains matériaux et procédés de projection thermique.

Par la suite on a pris une étude d'optimisation dans le but de maximaliser la résistance à l'usure et minimiser la porosité d'une part et d'autre part de maximaliser la ténacité interne et de surface. Nous présentons dans la figure suivante un diagramme de processus de deuxième ordre pour un revêtement HVOF de carbure de tungstène. [24]

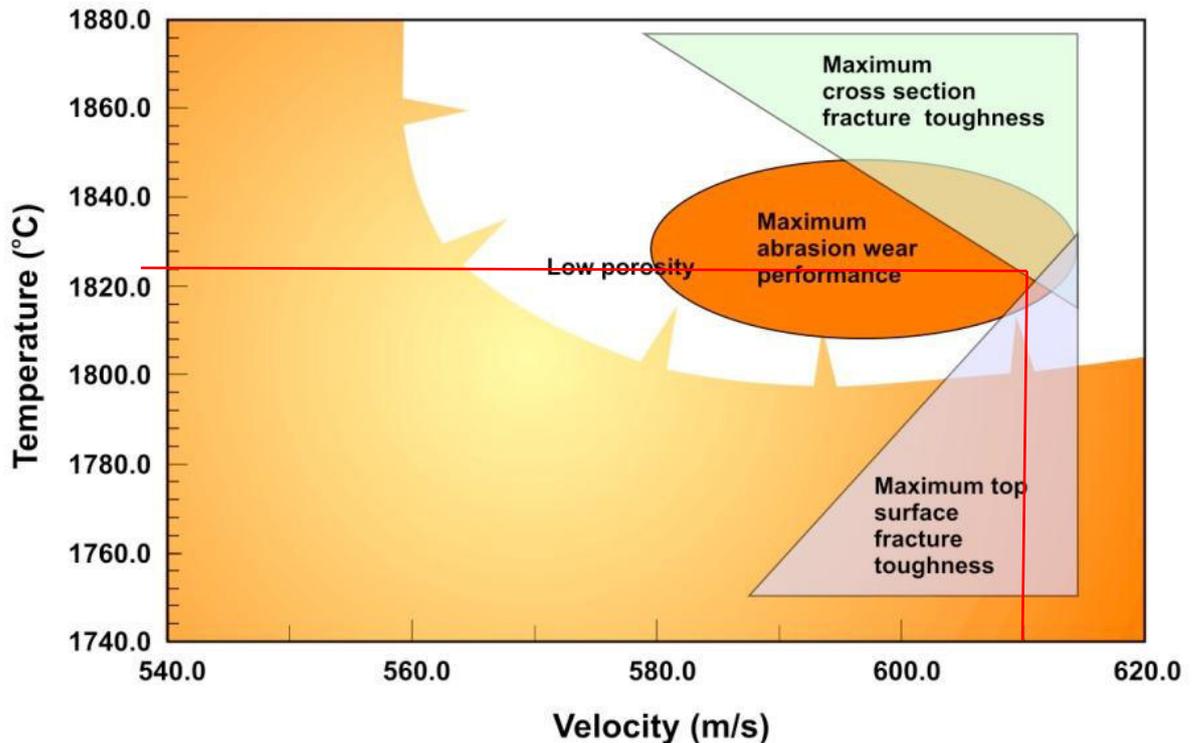


Figure 3.15: un diagramme de processus du second ordre liant la température à la vitesse généralisée pour le revêtement HVOF du carbure de tungstène (WC-Co-Cr-Ni) [24]

D'après les spécialistes [24] du domaine les angles de projection utilisés dans les procédés thermiques HVOF sont de $90^\circ \pm 20^\circ$ afin d'obtenir le meilleur rendement de la projection (Houdkovà, Kasparova et Zahalka, 2010) mais l'angle optimal dans une poudre de HVOF-843 est de 90° [16].

Sur le choix de la distance, certains travaux [18] ont étudié l'influence de la distance de projection sur la résistance à la corrosion et à l'usure des revêtements par projection HVOF. Dans ce sens, ils ont déterminé que la distance de projection optimale se trouve à 300 mm [18], la condition la plus favorable du point de vue de la résistance à la corrosion et à l'usure.

Pour déterminer les débits (de la poudre, de kérosène et d'oxygène), certains chercheurs ont fait des études sur l'influence des débits sur la dureté et le module de Young de revêtement HVOF de WC-Co-Cr, ils ont déterminé que la combinaison optimale des débits est 10 l/min [24] pour le kérosène est 35 l/min [24] pour l'oxygène et 40 g/min [24] pour la poudre.

Dans le tableau qui suit on a résumé tous les paramètres et les conditions de projection pour le revêtement par HVOF.

Tableau 3.11 : les paramètres et conditions de projection [18][24]

Conditions de projection	Débit de la poudre (l/min)	40
	Débit de kérosène (l/min)	10
	Débit d'oxygène (l/min)	35
Paramètres de projection	Distance du revêtement (mm)	300
	Vitesse des particules (m/s)	612
	Température des particules (°C)	1825
	Angle (°)	90

3.6.2) Rechargement par laser cladding

3.6.2.1) Choix de la méthode

L'usure, avec la corrosion et la fatigue, sont les trois principaux processus qui limitent la durée de vie utile des produits d'ingénierie. Avec leur effet combiné, des réparations et des remplacements des pièces sont toujours faites. En outre, le contrôle et la réduction de l'usure et la corrosion permettent l'allongement de la durée de vie des machines, l'amélioration de l'efficacité des dispositifs, la conservation des ressources matérielles, les économies d'énergie et la sécurité.

. La surface est largement reconnue comme la partie la plus importante de nombreux composants d'ingénierie, puisque la plupart des défaillances se produisent en surface, soit par usure, fatigue ou corrosion. Une solution possible pour réduire l'usure, la corrosion ou la fatigue est donnée par le domaine de l'ingénierie de surface, c'est la réparation de pièces par Laser cladding. Ceci a fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières années. Toutefois, la résistance à la traction et la dureté des éprouvettes ne répondaient pas aux exigences industrielles donc des simulations et des expériences appliquées pour étudier le processus de remise à neuf des pièces ou organes ont prouvé que par rapport aux sources de chaleur conventionnelles, l'utilisation du laser permet d'atteindre des densités d'énergie supérieures de plusieurs ordres de grandeur, car une énergie optique très concentrée peut être focalisée sur une zone bien délimitée de la surface du matériau de base. Grâce à ces caractéristiques, une couche très mince de matériau de base est fondue avec le matériau de revêtement, ce qui conduit simultanément à une dilution minimale contrôlée par le substrat et néanmoins à une très forte liaison par fusion entre le substrat et le revêtement, ce qui est une caractéristique unique du revêtement laser. L'utilisation d'une source laser présente d'autres avantages : la densité énergétique élevée du laser permet des temps

d'interaction courts entre la source de chaleur et le matériau de base, ce qui entraîne des taux de solidification et de refroidissement élevés. Les taux élevés de solidification et de refroidissement génèrent des microstructures à grains fins.

3.6.2.2) Substrat

Le substrat SUS50 est un acier inoxydable, par manque d'information on n'a pas pu présenter ses caractéristiques mécaniques et sa composition chimique. Toutefois, en sachant que c'est un acier inoxydable et connaissant ses conditions de fonctionnement, ceci nous suffira pour faire un bon choix de la poudre. Cependant, dans l'industrie dans un cas pareil ils utilisent la PMI (positive material identification) pour avoir la composition chimique afin de pouvoir faire le revêtement.

3.6.2.3) Choix de la poudre

Les alliages 410L et Fe-Cr-B-Si-Mo sont tous deux des aciers inoxydables ferritiques et des matériaux de revêtement appropriés pour la réparation de pièces en acier en raison de leur grande compatibilité métallurgique avec les aciers et de leur excellente compatibilité laser. L'alliage 410L est largement utilisé dans les dispositifs de traitement des gaz d'échappement des automobiles et les chambres de combustion des chaudières en raison de ses performances exceptionnelles en flexion, sa ductilité et sa résistance à l'oxydation à haute température.[25]

- Propriété de la poudre 410 L

La poudre de 410L est produite par la TMCOMAS. La gamme de taille des particules de la poudre est 50-150 µm. Sa composition chimique est présentée dans le tableau suivant:

Tableau 3.12 : Composition chimique (% massique) de **410L** [22]

Elément	C	S	Ni	Cr	Fe
%Massique	0.027	0.01	0.1	12.5	BALANCE.

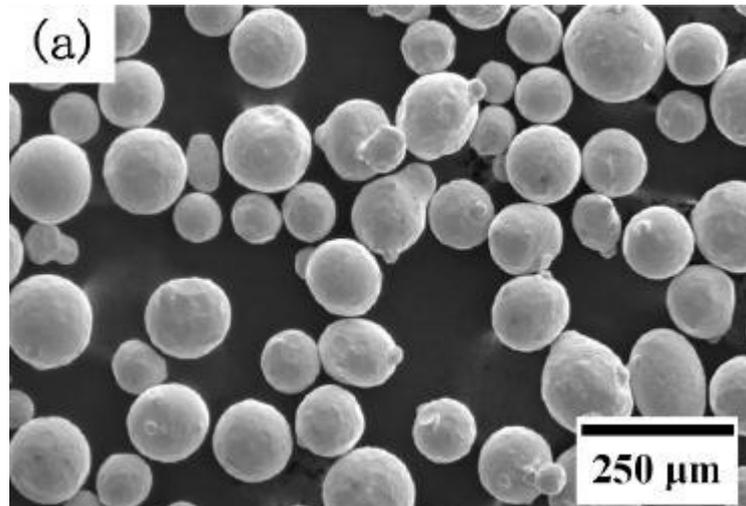


Figure 3.16 : Micrographie de la poudre de 410L [25]

Dans cette image, la poudre est représentée par la partie claire et la résine par la partie sombre de la photo. Au grandissement de 250μm, l'observation des clichés obtenus montrent que la poudre de 410L est dense. L'image obtenue montre aussi que les grains constituant la poudre de 410L ont une forme sphérique. La microstructure est construite à partir des dendrites entourées par des eutectiques. [25]

On présente dans le tableau suivant les propriétés mécanique de la poudre

Tableau 3.13 : propriété mécanique de la poudre 410L [25]

Dureté HRC	limite d'élasticité MPa	Resistance a la traction MPa	Allongement %
43	330	545.5	18

3.6.2.4) Les paramètres d'injection

Plusieurs études et expériences ont été faites dans le but d'avoir des combinaisons de puissance, débit de poudre et vitesse de particule. De nombreux lots ont été produits en variant les trois principaux paramètres de traitement, à savoir la puissance laser, la vitesse de balayage et le débit de la poudre. Différentes combinaisons de poudres et de substrats ont été utilisées. Dans certains cas, le préchauffage du substrat jusqu'à 400°C a été effectué dans un four ou avec un chalumeau oxygène-combustible. Les plages de conditions de traitement pour les différents lots produits sont indiquées. [26]

Tableau 3.14 : condition de processus pour des différentes poudres [26]

Poudre	substrat	Préchauffage	Puissance	Débit de la poudre	Vitesse de balayage
			[kW]	[g/s]	[mm/s]
410L	Acier inoxydable	-	2.0 – 3.8	0.3 – 0.9	1 – 8
In625	Acier doux	-	2.0 – 3.8	0.3 – 0.9	1 – 8
NiBSi	Acier doux	400°C, (four)	2.0 – 3.8	0.3 – 0.9	1 – 8
NiBSi	Fonte grise	400°C, (four)	2.0 – 3.8	0.3 – 0.9	1 – 8
WC+Stellite 12	Acier doux	400°C, (chalumeau oxygène-combustible)	2.0 – 4.0	0.5	5

Afin d’avoir une combinaison optimale qui maximise la résistance à l’usure d’autres expériences ont été faite pour une épaisseur de couche 0.1mm, la combinaison est de 4kW pour la puissance et 0.8 g/s pour le débit de la poudre et une vitesse de balayage de 3 mm/s. Ces paramètres ont été liés à d’autres qui sont l’angle du laser 28° et l’angle du poudre 90° et un débit de gaz d’argon à 3.4 l/min avec une distance entre la buse et la pièce de 8 mm. Dans le tableau suivant on résume tous ces paramètres. [26]

Tableau 3.15 : les paramètres et conditions de projection de laser cladding

Conditions de projection	Puissance du laser (kW)	4
	Débit de la poudre (g/s)	0.8
	Débit de gaz d’argon (l/min)	3.4
	Vitesse de balayage (mm/s)	3
Paramètres de projection	Distance entre la buse et la pièce (mm)	8
	Angle du laser (°)	28
	Angle de débit de la poudre (°)	90
	Epaisseur de la couche (mm)	0.1

3.7) Rectification de la cote :

Après le rechargement par HVOF une procédure s’impose c’est la rectification où on ramène la tige du piston à la côte d’origine ceci se fait par des outils spéciaux car la dureté après revêtement est élevée. Pour cela nous utilisons des plaquettes en diamant pour revenir à la côte d’origine qui est de 100 mm.

3.8) Contrôle non destructif par ultrason après la réparation

Le contrôle non destructif après la réparation est nécessaire afin d'avoir la qualité de surface et la porosité ou bien déceler d'autres défauts non réparés ou causés pendant la réparation. Notre contrôle montre bien qu'il n'y a aucune trace de porosité hors les critères d'acceptabilité en plus d'une très bonne adhésion entre le substrat et la poudre ce qui montre que notre réparation a fini par aboutir au bon résultat.

3.9) Proposition: free floating piston

3.9.1) Processus de l'endommagement

3.9.1.1) Introduction

Les signaux vibratoires contiennent des informations significatives de l'état de fonctionnement des différents composants d'un système mécanique. A partir de ces signaux, il est possible d'élaborer une loi d'endommagement significative de la sévérité du défaut en fonction du nombre de cycle de vie du composant. Des méthodes statistiques des moindres carrées permettent d'estimer cette loi à partir des mesures expérimentales [1].

L'objectif est d'estimer l'évolution d'un endommagement et de modéliser son évolution afin de prédire la défaillance d'un composant. C'est à partir de cette estimation qu'il va être établi un modèle pour pouvoir déterminer la durée de vie résiduelle du composant.

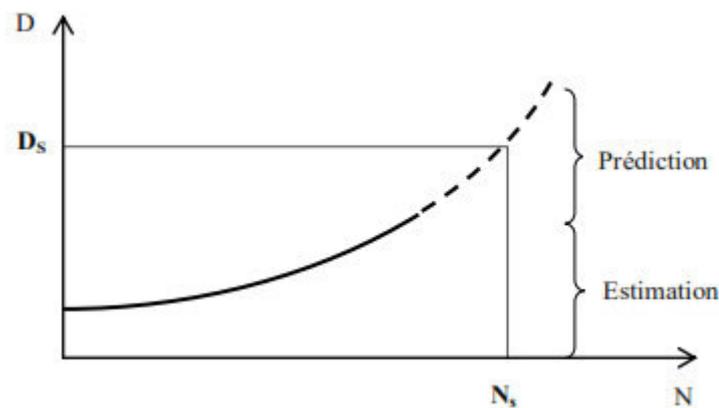


Figure 3.17 : Loi de dégradation [1]

Où

D : représente l'endommagement (la taille de l'écaillage),

N : nombre de cycles,

D_s et N_s : sont des valeurs du seuil limite.

Généralement, la modélisation de la loi d'endommagement est présentée par une loi mathématique.

3.9.1.2) Notion d'écaillage

L'écaillage est la détérioration d'une surface par le détachement de morceaux de matière relativement gros, alors que les cavités isolées à la surface sont dites **piqûres** (figure 3.18) qui se rejoignent parfois pour former de plus grandes cavités lorsque l'écaillage est très avancé [1].

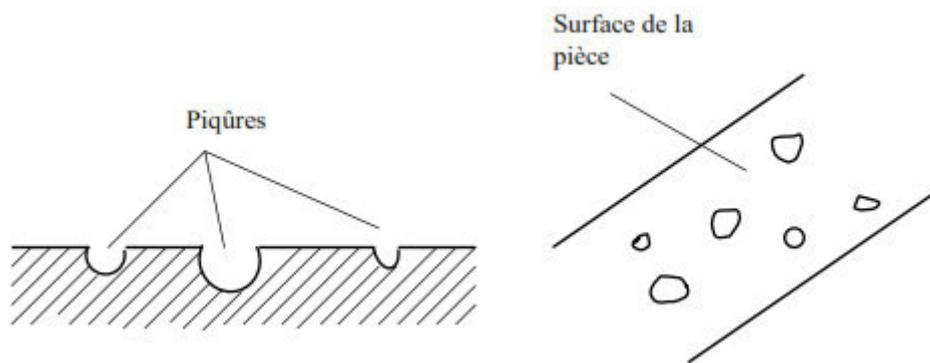


Figure 3.18 : Ecaillage d'une surface [1]

L'écaillage survient dans les contacts hertziens, lubrifiés ou pas, par exemple les engrenages, les cames, les roulements. La fatigue d'un matériau est initiée par des fissures à partir de la surface en contact qui progressent avec le temps jusqu'à ce qu'un morceau se détache. Une fissure germe généralement par l'un des mécanismes suivants [1]:

- Lésion de la surface par une aspérité ou l'interférence d'aspérités si le film lubrifiant est trop mince (figure 3.19a).
- Lésion de la surface par une particule, débris d'usure ou poussière, trop grosse par rapport à l'espace disponible pour son passage (figure 3.19b),
- Défaut de surface, rayure, strie d'usinage (figure 3.19c),
- Défaut du matériau au voisinage de la surface, pore ou impureté en sous couche (figure 3.19d).

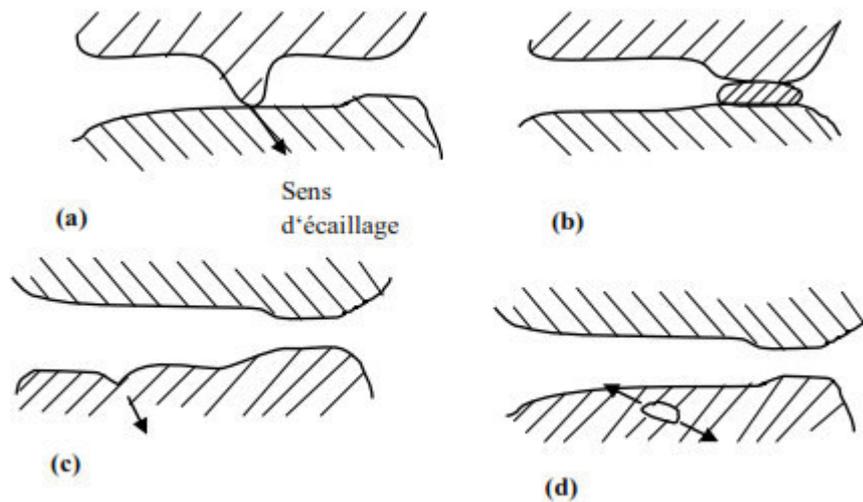


Figure 3.19 : Initiation des fissures : (a) par une aspérité, (b) par une particule étrangère, (c) par un défaut de surface, (d) par une impureté en sous couche [1]

L'écaillage initié en surface se reconnaît par une piqûre en forme de V ouvert en direction du mouvement. L'écaillage étant lié à une fissuration de fatigue, on constate une relation de la pression limite d'écaillage et du nombre de cycles sollicitant une surface. Dans le domaine d'endurance limité, au delà de 10^5 cycles environ, la pression limite d'écaillage diminue avec l'augmentation du nombre de sollicitations selon une loi de type [1]:

$$N \cdot p^n = \text{constante} \quad (4.1)$$

Où

n: exposant compris entre 3 et 4 selon le type de contact (ponctuel ou linéaire) et selon le matériau,

N: nombre de cycles,

P : pression limite d'écaillage.

3.9.1.3) Endommagement en fatigue d'un composant

a- Fatigue et endurance

Définitions

On entend par **fatigue** ou **endommagement par fatigue** la modification des propriétés des matériaux consécutive à l'application de cycles d'efforts, cycle dont la répétition peut conduire à la rupture des pièces constituées avec ces matériaux. En général, la fatigue se produit sans déformation plastique d'ensemble mais avec une *déformation plastique* très localisée autour des défauts, à fond de taille ou en surface. [1]

Caractérisation de l'endommagement

L'endommagement en fatigue correspond à l'amorçage et à la propagation des microfissures dans les métaux, sous l'effet des sollicitations cycliques, jusqu'à la rupture d'un élément de volume. L'élément de volume est défini au sens de la mécanique du solide, comme étant suffisamment grand par rapport aux hétérogénéités de la matière. [1]

b- Mécanisme de dégradation : Les modèles physiques

Ils s'appuient sur l'identification du *mécanisme* d'endommagement et sont constitués de l'enchaînement de la modélisation de l'amorçage d'une fissure avec la modélisation de sa propagation. Ils s'appuient sur les concepts de la micromécanique et de la théorie des dislocations. Plusieurs modèles existent dont le modèle de Cheng et al [1].

Le mécanisme d'endommagement mis en jeu est basé sur l'incompatibilité de déformation entre l'inclusion et la matrice. Ces incompatibilités sont accommodées par l'émission de dislocations qui créent les papillons de fatigue observés expérimentalement (figure 3.20). Ces dislocations, en s'accumulant, conduisent à l'amorçage d'une fissure, qui va ensuite se propager. L'application de ce modèle aux différentes inclusions présentes dans la zone sollicitée par le contact permet de définir une durée de vie du contact. La répétition de ce processus à une famille de contacts permet d'obtenir la distribution des durées de vie qui résulte de la dispersion inclusionnaire liée au processus d'élaboration du matériau. Grâce à ce modèle, on peut déterminer la limite d'endurance. C'est la pression de Hertz que l'on peut appliquer sur le contact sans qu'il y ait émission de dislocations irréversibles autour des inclusions, c'est-à-dire sans que la limite d'élasticité ne soit dépassée, en tenant compte des hétérogénéités microstructurales. La limite d'élasticité pour une déformation résiduelle ne dépasse pas 0,2% def (valeur de la jauge de déformation) et correspond aux premiers mouvements irréversibles des dislocations.[1]

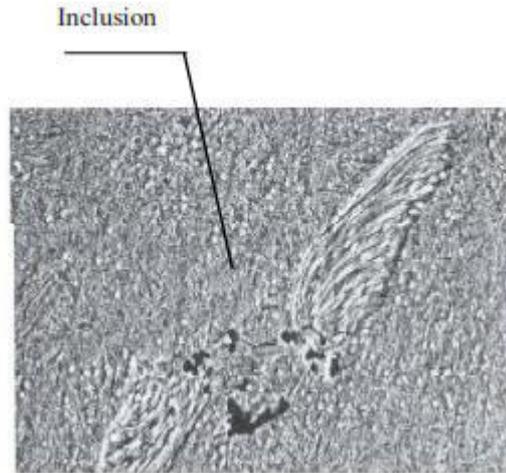


Figure 3.20 : Papillon et fissure amorcée autour d'une inclusion [1]

3.9.2) La cause de la panne

La tige de piston est enveloppée par des garnitures d'étanchéité composées de bagues entourées par des ressorts jarretières dans le but d'immobiliser la garniture. La figure suivante montre le positionnement des deux types de garniture ; la première est responsable du blocage des fuites de gaz du cylindre vers le bloc de la tige de piston, et la deuxième fait un rideau de barrage à l'aide d'un gaz inerte (N₂) afin de dégager les fuites de la première partie vers l'atmosphère.

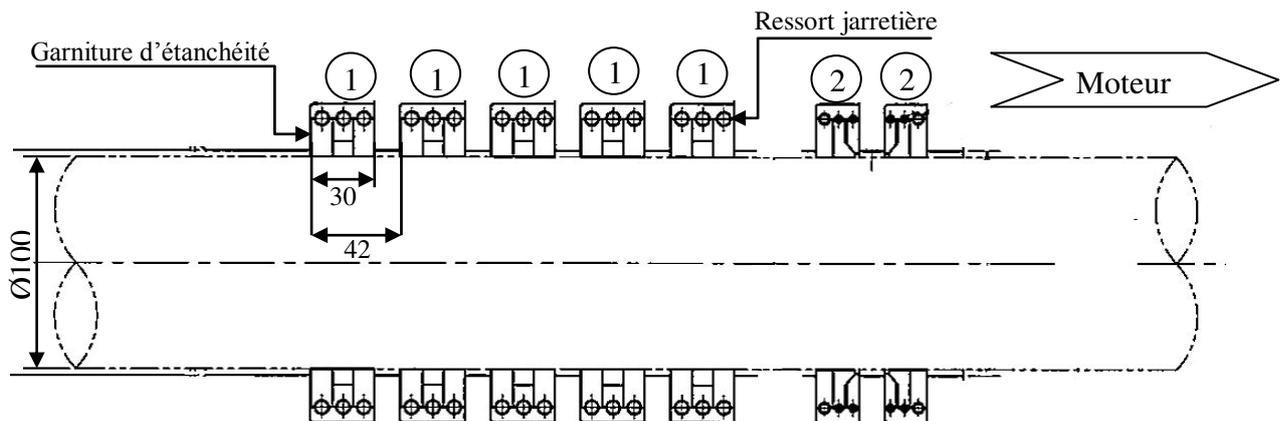


Figure 3.21: positionnement des garnitures d'étanchéité au niveau de la tige de piston [19]

Dans les tableaux suivants on montre les propriétés mécaniques de la garniture d'étanchéité et celle de la tige de piston liée à la cause d'identification de la cause d'usure

Tableau 3.16 : illustration des garnitures d'étanchéité et leurs propriétés liées à l'étude [19]

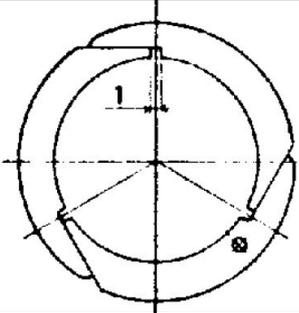
Garniture d'étanchéité	Schéma	Matériaux	Dureté HRC	Coefficient de frottement à sec
①		PTFE	30	0.06
②		PTFE	30	0.06

Tableau 3.17 : propriétés mécaniques de la tige de piston liée à l'étude [19]

Matériaux	Dureté HRC	Coefficient de frottement à sec
SCM 440	32	0.09

Le contact entre deux corps solides engendre des contraintes au niveau de la zone de contact et puisque la dureté de la tige de piston et son coefficient de frottement sont supérieurs à celle de la garniture d'étanchéité ceci va provoquer le phénomène d'écaillage au niveau de la garniture d'étanchéité qui va se manifester par la détérioration de la surface par le détachement des morceaux de matières relativement gros. Tandis que le ressort jarretière se serre instantanément dès qu'un jeu se présente, certains morceaux détachés de la garniture resteront coincés entre cette dernière et la tige de piston.

De plus les cavités isolées au niveau de la garniture d'étanchéité vont se rejoindre pour former une cavité plus grande engendrant une surface plus rugueuse, d'autre part l'application des cycles d'efforts va créer par la suite une déformation plastique localisée en surface et un endommagement par fatigue va se manifester au niveau de la tige de piston sous forme d'amorçage. La propagation des microfissures aura lieu sous l'effet de la sollicitation cyclique, jusqu'à la rupture d'un élément de volume. Cet élément de volume est défini au sens de la mécanique de solide, comme étant suffisamment grand par rapport aux hétérogénéités de la matière. Le problème de détachement des

morceaux au niveau de la garniture d'étanchéité, cité plus haut, va créer un environnement pollué au niveau du contact, ce qui va accélérer le processus de la détérioration de la surface de la tige mais celle-ci n'est pas le seul facteur influent sur l'accélération du processus de l'endommagement. Il a été constaté au niveau du bloc de la tige de piston une augmentation de la température due à la fuite de gaz de propane à une température élevée à cause de la détérioration de la garniture d'étanchéité. Cette fuite de gaz va engendrer une répartition non homogène de température sur la tige de piston qui va causer le défaut de faux rond et dès que ce phénomène se produit le contact entre la garniture d'étanchéité et la tige de piston ne sera plus parfait et la fuite de gaz ne cessera d'augmenter en causant de plus en plus le défaut du faux rond. Combinant ce phénomène avec celui de la flexion de la tige de piston due à la détérioration causée au niveau des bagues de guidage de piston, une distribution non homogène de pression, au niveau de la tige de piston, maximale à la partie la plus proche au piston, c'est la même zone de contact, ce qui va créer un pont de contrainte. Le prolongement des cavités au niveau de la garniture d'étanchéité et de la fatigue au niveau du piston entraînent le contact sera à la partie pointue de la cavité et la partie endommagée par fatigue sous déformation plastique avec un pont de contrainte, tous ces paramètres ont contribué naissance de l'usure.

Le principe de la proposition « free floating piston »

Un compresseur alternatif se compose d'un châssis, d'un guide de traverse et d'un cylindre. Les pièces mobiles sont : vilebrequin, bielle, tige de piston et un piston. Le piston est équipé de plusieurs segments de piston à base de PTFE qui supporte son poids, les segments de piston agissent comme un joint d'étanchéité entre le côté haute et le côté basse pression du cylindre selon le processus, le piston peut être lubrifié ou non lubrifié. Pour des compresseurs non lubrifiés, les conditions de gaz du processus accélèrent de manière imprévisible l'usure des bagues de guidage en causant par la suite la flexion au niveau de la tige de piston.

Le principe de cette technique est que le gaz de procédé lui-même emprunte axialement (figure 3.22) le chemin du piston, pendant la course de compression, en raison de la différence de pression, le gaz s'écoule au fond, assurant qu'il n'y a pas de contact physique entre les bagues de guidage et la chemise du cylindre, où il est ainsi réduit à pratiquement zéro, entraînant une durée de vie beaucoup plus longue des bagues de guidage. La conception du piston a également été spécialement adaptée : on intervertit entre les bagues de guidage et les segments. Les segments de piston sont maintenant aux extrémités du piston alors que les bagues prennent place entre ces segments. Cette solution va créer une pression constante entre les segments. Les soupapes de compresseur qui réagissent aux différences de pression de gaz sont situées dans la surface du piston

pour permettre au gaz d'entrer dans le piston. Des buses d'écoulement ont été intégrées dans les bagues de guidage et un profil usiné sur la surface inférieure pour créer une couche porteuse de gaz sous le piston puisque l'épaisseur de cette couche porteuse est de l'ordre du micron, le débit requis pour soulever le piston est marginal comparé à la capacité du compresseur, la nouvelle construction compense cette capacité nette, de façon que le compresseur ne subit aucune incidence.

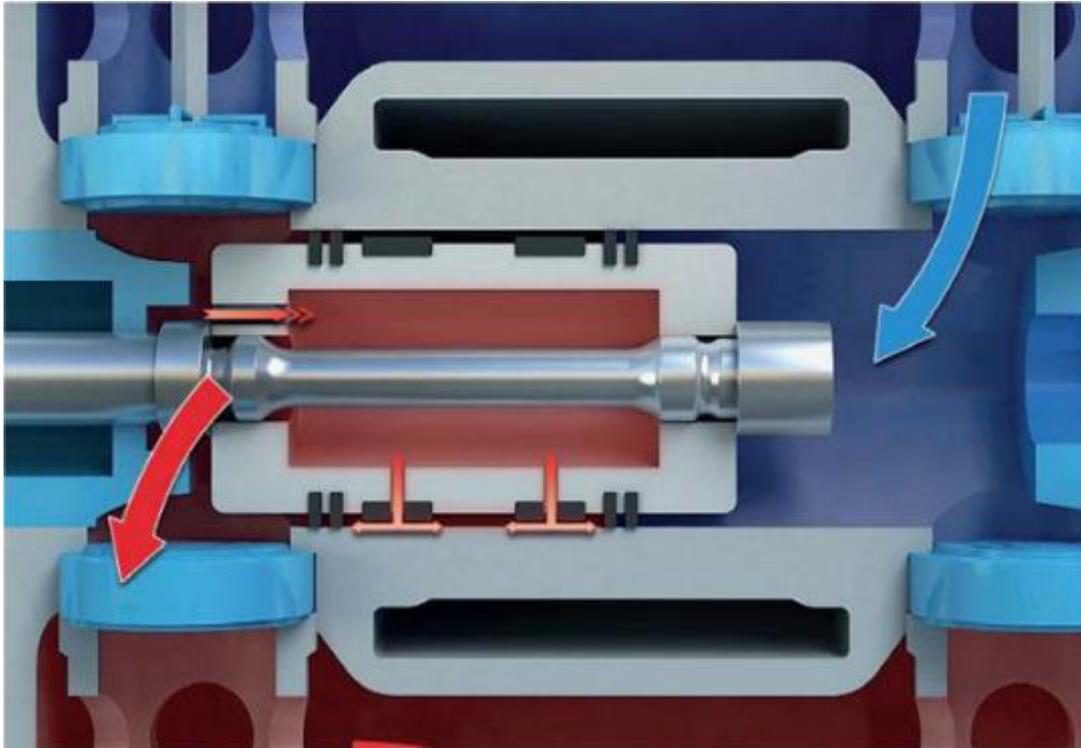


Figure 3.22 : le principe du free floating piston [27]



Figure 3.23 : clapet anti-retour [27]



Figure 3.24 : buses d'écoulement [27]

Conclusion générale

Ce mémoire a eu pour objectif principal d'exploiter les procédures de suivi par le complexe GP1Z et la réparation utilisée par TM Comas afin de faire une étude critique.

Pour ce qui concerne le suivi de la réparation de la tige au profit du complexe GP1Z.

Quelques conclusions ont pu être tirées :

- Le suivi par l'analyse vibratoire se basant sur les indicateurs vibratoires globaux n'est pas trop efficace pour déceler l'usure au niveau de la tige de piston, c'est pour cela qu'on a donné des propositions dans le but d'améliorer l'aspect de la détection de la panne par le traitement de signal (ondelette et source de séparation aveugle), en espérant qu'elles seront développées sous forme de projet de fin d'étude pour que la proposition soit plus adéquate et s'intègre dans notre cas pratique.
- Pour ce qui concerne le contrôle systématique fait par un contrôle métrologique, la méthode est efficace pour déceler l'usure au niveau de la tige de piston. Cependant pour approfondir plus cette technique, il vaut mieux faire un contrôle non destructif sur site à chaque contrôle systématique pour déceler profondément les défauts, les localiser pour évaluer le degré de dégradation et de procéder à la réparation

Concernant la réparation de la tige par TM Comas étudiée. Quelques conclusions ont pu être tirées :

- La détection des défauts avant réparation était à la hauteur pour déceler toutes les erreurs qui nous ont permis de faire un bon choix de revêtement et une préparation adéquate.
- Pour la compréhension de la technique de rechargement, l'exploitation de certaines informations était nécessaire pour mieux comprendre la particularité des deux méthodes adoptées (Laser cladding et HVOF), l'influence du choix de la poudre de projection, les paramètres principaux et les conditions de projection sur les propriétés mécaniques et l'état de surface. Ces choix ont été confirmés par des expériences faites dans d'autres recherches.

Pour la dernière partie de la proposition free floating piston il fallait détecter les causes de la panne et les paramètres qui ont permis d'accélérer le processus d'endommagement et pour bien déceler la cause on a dû passer par quelques généralités. Cette méthode est une technique de pointe innovée récemment, brevetée et confirmée par des tests et expériences, ce que nous proposons à la fin de ce mémoire comme solution mécanique intéressante qui pourra permettre de prolonger la durée de vie de la tige en plus de la technique déjà utilisée par revêtement.

Bibliographie et sitographie :

[1] Omar Djebili, Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement. 155p

Thèse de doctorat : Mécanique : Université de Reims Champagne Ardenne, 2013

[2] Analyse vibratoire en maintenance Alain Boulanger et Christian Pachaud
Editions Dunod 2007

[3] Données fournis du document de la part de la gamme de contrôle métrologique au niveau de GP1Z,

[4] C. Charles, introduction aux ondelettes, support de cours, Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, 2017, 22p

[5] Valérie Perrier, Application de la théorie des ondelettes, Institut National Polytechnique de Grenoble, cours, 65p, 2005

[6] Omar Cherrak, Séparation aveugle de mélanges linéaires de sources : application à la surveillance maritime, 251p

Thèse de doctorat : automatique : Université de Toulon en France, 2016

[7] Yacine IMAOUCHEN, Mesure et analyse des vibrations des machines électriques tournantes, 365p

Thèse de doctorat : Electricité : UNIVERSITE A.MIRA-BEJAIA, 2015

[8] Mohammed Boufenar, approche comparative des techniques de détection et d'analyse en présence des défauts conjugués dans les machines tournantes.

Thèse de doctorat : Mécanique : Ecole nationale polytechnique ,2016

[9] RABHI Mouldi, support de cours de contrôle non destructif, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de GAFSA, cours, 125p, 2017

[10] Wikipédia, contrôle non destructif. [Consulté le 15 mars 2019].

Disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Contr%C3%B4le_non_destructif>

[11] Mr. TAOUINT Lounis et Mr. BENKADOUM Rachid, Influence des Traitements thermiques sur les propriétés. Mécaniques et microstructurales d'un dépôt réalisé par projection thermique. 88
Mémoire : Mécanique : université Abderrahmane mira Bejaia, 2017

[12] Epoxy 300, Quelle est la différence entre sablage, grenailage, corindonnage et microbillage ? [Consulté le 25 avril 2019].

Disponible sur : <<https://www.epoxy3000.com/difference-entre-sablage-grenailage-corindonnage-et-microbillage/>>

- [13] Wikipidia, Rechargement. [Consulté le 5 avril 2019].
Disponible sur : < <https://fr.wikipedia.org/wiki/Rechargement> >
- [14] M.F. Schneider, laser cladding with powder effect of some machining parameters on clad properties,
Thèse de doctorat : Mécanique : University of Twente, Enschede, 1998
- [15] wikipidia, projection thermique. [Consulté le 10 avril 2019].
Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Projection_thermique>
- [16] Xueping GUO, Etude des procédés d'élaboration et caractérisation des revêtements de bronze et de ses composites préparés par projection à froid, 143p
Thèse de doctorat : Mécanique : Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2009
- [17] Metco oerlikon, issue7, High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Solutions, rapport scientifique, 25p, 2005
- [18] 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, 149p
Mémoire : mécanique : école de technologie supérieure université du Québec, 2016
- [19] Document fournis par le constructeur du compresseur IHI, 328p, 2009
- [20] Peter F. Ruggiero, advanced materials & processes, article, Juillet, 2005, 2p
- [21] Handbook of environmental degradation of materials, MYER KUTZ, chapitre: surface engineering, william andrew publishing, Norwich, 2005, 600p
- [22] document furnish par TM Comas, 2p, 2016
- [23] Wikipidia, Carbure de tungstène, [consulté le 5 mai 2019].
Disponible sur : < https://fr.wikipedia.org/wiki/Carbure_de_tungst%C3%A8ne>
- [24] Maria Oksa , Erja Turunen , Tomi Suhonen , Tommi Varis et Simo-Pekka Hannula, Optimization and Characterization of High Velocity Oxy-fuel Sprayed Coatings: Techniques, Materials, and Applications, septembre, rapport scientifique, 36p, 2011
- [25] Sheng Huang, Dichen Li, Lianzhong Zhang, Xiaoyu Zhang et Weijun Zhu, Tailoring the Mechanical Properties of Laser Cladding-Deposited Ferrous Alloys with a Mixture of 410L Alloy and Fe–Cr–B–Si–Mo Alloy Powders, article, 15p, janvier,2019
- [26] Simone Zanzarin, Laser Cladding with metallic powders, 133p
Thèse de doctorat : Mécanique : University of Trento, Italy, 2015
- [27] Brochure Howden Thomassen Compressors Free Floating Piston, rapport scientifique, 4p, avril, 2012