



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

Projet de Fin d'Etudes

**Pour l'obtention du Diplôme de
Master en Génie Mécanique**

Option : Matériaux et Traitement des Surfaces (MTS)

Thème :

**Fatigue mécanique des revêtements réalisé
par projection thermique**

Proposé et dirigé par :

Mr A. ABDERRAHMANE

Réalisé par :

Mr. CHACHOUA MOHAMED AMINE

Dédicaces

A ma très chère mère au monde Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur...

A mon père Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être .Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation....

A mes frères et ma sœur ...

A tous la famille chachoua, et mes amis

Mohamed .A

Remerciements

Dieu merci, le tout puissant qui m'a donné la patience et le courage afin de réaliser ce modeste travail

Je tiens à remercier :

- ma famille, à qui revient le mérite de m'avoir éduqué, encouragé et soutenu.
- Tous les enseignants du département de génie mécanique en particulier ceux de la spécialité science des matériaux
- Je tiens à remercier mon promoteur Mr A. Abderrahmane
- Je tiens à remercier Ami Mohamed le chef section de l'atelier 3-1 au base logistique BCL de Blida
- Sans oublier tous ceux qui ont participés de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Résumé

La projection thermique tient un rôle important dans les industries de la mécanique comme la plupart des procédés de traitement de surface. C'est un moyen d'améliorer les propriétés de surface des matériaux pour résister à un besoin spécifique comme par exemple la tenue à l'usure, à la corrosion et à l'érosion. Le comportement en fatigue de ces pièces et de ces structures après revêtement est mal connu et reste à déterminer.

Dans ce cadre, nous avons réalisé des revêtements par projection thermique à la flamme. Trois types de poudres largement utilisés dans l'industrie mécanique ont été projetés par la torche Castodyn DS8000 pour étudier leurs comportements en fatigue par des essais de fatigue en flexion rotative

Les résultats de cette recherche ont montré que les pièces avec revêtement ont des durées de vie inférieures à celles des pièces brutes. Plusieurs facteurs influent sur ce comportement, à savoir la nature de la poudre, la rugosité et la profondeur de rechargement.

Introduction Générale

Les traitements de surface par projection thermique sont généralement utilisés pour l'amélioration des performances des matériaux contre l'usure, la corrosion et l'érosion, ainsi que dans la réparation et remise en état et des structures usés par ces derniers.

Les structures mécaniques utilisées dans l'industrie sont généralement soumises à des chargements cycliques complexes qui conduisent souvent à la rupture catastrophique sans indices annonciatrices, c'est le phénomène de rupture progressive désigné par la fatigue. Plusieurs accidents (catastrophe aérienne, arrêt brutale d'une chaîne de production ...etc.) qui ont conduit à des dégâts importants, humains et matériels, ont comme premier responsable le phénomène de fatigue.

Le comportement en fatigue de ces pièces et de ces structures après revêtement est mal connu et reste à déterminer.

Dans ce contexte, notre travail a pour objectif

- La réalisation des dépôts anti usure et anti corrosion par le procédé de la projection thermique à flamme.
- Etudier le comportement en fatigue des pièces avec revêtements déposés par projection thermique à la flamme en procédant des essais de fatigue en flexion rotative.

Pour cela, la présentation est scindée en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, on présente une étude bibliographique concernant les différentes techniques de projection thermique et leurs applications.
- Le deuxième chapitre concerne une étude bibliographique sur le phénomène fatigue et ces essais relatives.
- Les techniques expérimentales et les différents équipements utilisés dans notre recherche sont exposés dans le troisième chapitre.
- Le dernier chapitre est réservé à la présentation et à l'interprétation des résultats.

Notre travail est clôturé par une conclusion générale.

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre 1 Projection Thermique

1.1 Introduction	2
1.2 Principe général	2
1.3Présentation des différents procédés	3
1.4 Projection thermique flamme	4
1.4.1 Projection flamme-poudre.....	5
1.4.2 Projection flamme-fil	5
1.5 Projection par arc électrique entre deux fils	7
1.6 La projection plasma	8
1.7 Projection hypersonique	9
1.7.1 projection hypersonique a tir discontinue	9
1.7.2 Projection hypersonique à tir continu.....	10
1.8 Préparation de la surface à revêtir.....	11
1. 8.1 Les techniques de préparation	11
a.le grenailage ou sablage	12
b.le broage et poliage	12
c.filtage grossier	12
d.le préchauffage	13
1.9 Structure et caractéristiques des dépôts	13.
1.10 Traitement des dépôts après la projection.....	14
1.11Contrôles des dépôts	14
1.12 Adhérence.....	14
1.13 Conditions pour l'obtention d'un bon dépôt	15
1.14 Conclusion.....	15

Chapitre 2 Phénomènes et Essais De Fatigue

2.1 Introduction	18
2.2. Définition.....	18
2.3 Objet des essais de fatigue.....	18
2.4 Classification des essais de fatigue.....	19
2.5 Classification des modes de sollicitation.....	20
2.5.1 Classification des sollicitations	20
2.5.2 Définitions d'un cycle de contrainte.....	21
2.6 Essais de fatigue flexion rotative.....	21
2.6.1 Calcul de la contrainte en cas de flexion rotative.....	22
2.6.2 Dispersion des résultats	24
2.6.3 Courbe de Wöhler.....	25
a. La zone de fatigue oligocyclique.....	25
b. La zone d'endurance limitée.....	25
c. La zone d'endurance illimitée.....	25
2.6.4 Représentations mathématiques de la courbe.....	26
2.6.4 .1 Modèle de Wöhler	26
2.6.4 .2 Modèle de Basquin	26
2.6.4 .3 Modèle de Bastenaire	27
2.7 Le mécanisme de la rupture par fatigue.....	27
2.7.1 Période d'amorçage	27
2.7.2 Période de propagation	28
2.7.3 Rupture brutale	30
2.8 Les faciès caractéristique des ruptures en fatigue	30
2.9 Dommages cumulatifs.....	31

Chapitre 3 Protocoles Expérimentaux

3.1 Introduction	33
3.2 Substrat	33
3.3 Fabrications des éprouvettes.....	33
3.3.1 Découpage.....	33
3.3.2 Tour parallèle.....	34
3.4. Préparation des poudres.....	34
3.5 Préparation des éprouvettes.....	36

3.6 projection thermique avec torche catodyn D800.....	37
3.7 Usinage et rectifications des éprouvettes avec revêtements.....	38
3.8 Mesure d'épaisseur.....	39
3.9 Le calcul de rugosité	39
3.10 Machine d'essais de fatigue.....	40
3.11 Étude métallographique.....	41
3.11.1 Découpage par Micro tronçonneuse.	41
3.11.2 Enrobeuse.....	41
3.11.3 Polisseuse.....	42
3.11.4 Polisseuse de finition.....	42
3.11.5 Séchoir.....	43
3.11.6 Microscope optique.....	43
3.12 L'essai de micro dureté	44
3.13L'essai de dureté.....	44
3.14 La macrographie	45

Chapitre 4 Résultat et Interprétations

4.1 Introductions.....	45
4.2 Projections thermique	45
4.2.1 Propriétés d'éprouvettes projetées	47
4.3 Etude métallographique.....	47
4.4. Micro dureté	50
4.5 Résultats de la rugosité (Ra)	53
4.6 La dureté superficielle HS 30N.....	54
4.7 Comportement en fatigue.....	54
4.8 Faciès de rupture	58
Concluion generale	62

Liste des figures

Figure 1.1 Principe fondamental de la projection thermique.....	02
Figure 1.2 Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre.....	04
Figure 1.3 Principe de la projection à flamme par fil.....	05
Figure 1.4 Principe de fonctionnement d'un pistolet arc électrique.....	07
Figure 1.5 Principe de fonctionnement d'une torche plasma.....	08
Figure 1.6 Schéma de principe d'un canon à détonation	09
Figure 1.7 Principe de la projection thermique par HVOF.....	10
Figure 1.8 Grenailleuse.....	12
Figure 2.1 rupture par fatigue.....	18
Figure 2.2 représente les différentes charges cycliques.....	20
Figure 2.3 représente un chargement de fatigue.....	21
Figure 2.4 schéma explicatif de l'essai de fatigue par flexion rotative.....	22
Figure 2.5 Schéma de machine de fatigue de flexion rotative.....	22
Figure 2.6 Schéma équivalent en RDM.....	23
Figure 2.7: Eprouvette sous une charge.....	23
Figure 2.8 représente dispersion des résultats des mesures de fatigue.....	24
Figure 2.9 représente 'une courbe de Wöhler.....	25
Figure 2.10 Formation d'intrusion et d'extrusion.....	28
Figure 2.11 Période de propagation.....	29
Figure 2.13 Faciès de rupture.....	30
Figure 3.1 scie semi-automatique	33
Figure 3. 2. tour parallèle.....	34
Figure 3.3 La forme de l'éprouvette de fatigue	34
Figure 3.4 Balance électronique.....	36
Figure 3.5 l'endroit de préparations	37
Figure 3.6 torche castodyn ds8000.....	37
Figure 3.7 Rectifieuse.....	38
Figure 3.8 appareil de mesure des couches de revêtement.....	39
Figure 3.9 Rugosimètre.....	39
Figure 3.10 machine de fatigue série WP 140.....	40
Figure 3.11 micro tronçonneuse.....	41

Figure 3.12 Enrobeuse.....	42
Figure 3.13 polisseuse.....	42
Figure 3.14 Polisseuse de finition.....	42
Figure 3.15 Séchoir.....	43
Figure 3.16 microscope optique.....	43
Figure 3.17 microduromètre.....	44
Figure 3.18 duromètre.....	44
Figure 3.19 appareil a photo numérique.....	45
Figure 4.1 : Epreuve de fatigue avec revêtement après usinage.....	45
Figure 4.2 Epreuves projetés avec la poudre 21031.....	46
Figure 4.3 épreuves projetés avec la poudre 1009+30%wc17c.....	46
Figure 4.4 dépôts 21031.....	48
Figure 4.5 dépôts 1009+30%wc17co.....	49
Figure 4.6 Courbe de dureté de revêtements 21.....	51
Figure 4.7 courbe de micro dureté de dépôts 1009+30%wc17co.....	52
Figure 4.8 histogramme la durée de vie des épreuves avec revêtements 21031.....	56
Figure 4.9 Durée de vie moyenne des épreuves avec revêtement.....	57
Figure 4.10 Durée de vie du dépôt 1009+30%WC17Co, Prf. 0.9.....	58
Figure 4.11 Rupture par fatigue de l'épreuve brute.....	58
Figure 4.12 rupture par fatigue d'une épreuve avec revêtements 1009+30%c17Co .Profondeur 0.3	59
Figure 4.13 rupture par fatigue d'une épreuve avec revêtements 1009+30%c17co profondeur 0.9.....	59
Figure 4.14 rupture par fatigue d'une épreuve avec revêtements 21031 profondeur 0.3....	60
Figure 4.15 rupture par fatigue d'une épreuve avec revêtement 21031 profondeur 0.6	60
Figure 4.16 rupture par fatigue d'une épreuve avec revêtements 21031 profondeur 0.9...61.	61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Principales caractéristiques des différents procédés de projection thermique	
[4].....	03
Tableau 3.1 : représente la composition chimique d'acier 42cd4.....	33
Tableau 3.2 propriétés des poudres utilisé.....	35
Tableau 3.3 préparation des éprouvettes.....	36
Tableau 4.1 Paramètres de la projection.....	45
Tableau 4.2 Diamètre avec revêtements et épaisseurs des dépôts 21031.....	47
Tableau 4.3 Diamètre avec revêtements et épaisseurs des dépôts 1009+30%(WC17Co.....	47
Tableau 4.4 Microdureté des revêtements.....	51
Tableau 4.5 Résultats des essais rugosité.....	52
Tableau 4.6 Dureté du dépôt 1009+30% WC17Co.....	52
Tableau 4.7 résultat d'essais de fatigue pour le dépôt 21031.....	54
Tableau 4.8 Résultat d'essais de fatigue pour les dépôts 1009 + 30% WC17Co.....	55

CHAPITRE 1

PROJECTION THERMIQUE

1.1 Introduction

La technique de revêtement par projection thermique représente aujourd'hui un procédé industriel qui propose différentes solutions efficaces pour plusieurs domaines tel que l'énergétique (turbines à gaz, alternateurs, chambres de combustion) et le transport (véhicules terrestres, trains, avions et engins spatiaux) ainsi que le biomédical (implants, couronnes dentaires, prothèse). Cette technique répond à l'attente écologique des procédés de fabrication, car c'est un procédé par voie sèche, qui n'utilise pas des polluants lors de sa mise en œuvre et ne conduit qu'à très peu de déchets à l'issue. Il est ainsi possible d'obtenir un revêtement de haute qualité, à prix raisonnable, tout en ayant un moindre impact environnemental.

1.2 Principe général

La projection thermique est une méthode de revêtement des surfaces permettant d'obtenir des dépôts en mettant en œuvre un large spectre de procédés (projection à la flamme, projection à l'arc électrique ; l'HVOF et la projection à torche plasma d'arc soufflé, etc.) et de matériaux (alliages métalliques, céramiques, polymères et matériaux composites, etc.).

Pendant ce procédé, le matériau sous forme de particules est injecté dans la torche puis soufflé et chauffé afin d'arriver un état fondu sur un substrat. Ainsi, les particules possèdent une température élevée et sont accélérées vers la surface à revêtir. A l'impact elles s'étalent et se solidifient. Un empilement de lamelles les unes sur les autres se forme, ce qui conduit à réaliser un dépôt sur la surface à revêtir

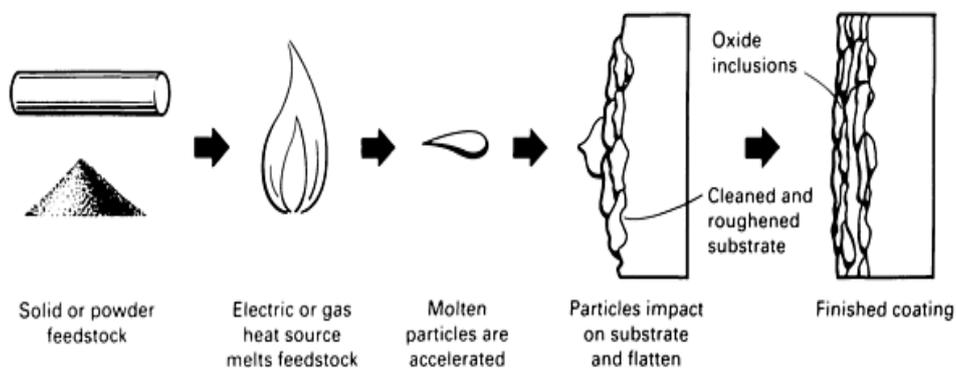


Figure 1.1 : Principe fondamental de la projection thermique

1.3 Présentation des différents procédés

Caractéristiques	Projection flamme-poudre	Projection flamme-fil	Arc électrique	plasma	hvof	Canon a détonation
Source d'énergie	Flamme oxyacétylénique	flamme oxyacétylénique	arc électrique	plasma	flamme oxyacétylénique	flamme oxyacétylénique
Température de flamme....c	3000	3000	6000	12000	3000	3000
Transports des particules	Gaz flamme	Air comprimé	Air comprimé	Gaz plasma Ar/h	Gaz flamme	Gaz flamme
Vitesse des particules... m/s	40	150	250	200	700	950
Forme des produits d'apport	Poudre	Fil-cordon	Fil	Poudre	Poudre	Poudre
Taux horaire de dépôts ...kg/h	1 a 3	1 a 20	5 a 30	1 a 4	3 a 5	3 a 5
Rendements moyens.%	50	70	80	70	70	70
Force d'adhérence ...MPa	20 a 40	20 a 40	40	30 a 70	50 a 80	50 a 80
Taux de porosité.. %	10 a 20	10 a 20	8 a 15	1 a 10	0.5 a 2	0.5 a 2
Epaisseur déposé mm	0.1 a 1.5	.1 a 1.5	0.2 a 3	0.05 a 1.5	0.05 a 1	0.05 a 1
Exemples de matériaux d'apports	-Métaux -Céramique -Carbure de matrice métallique	-Métaux -Céramique -Carbure de matrice métallique	-métaux	- Métaux Céramique - carbure	-Métaux -carbure	-Carbure -céramique

Tableau1.1 Principales caractéristiques des différents procédés de projection thermique [4]

1.4 Projection thermique flamme

La projection thermique utilisant l'énergie calorifique provenant de la combustion des gaz comburants avec l'oxygène, un est connue sous le nom projection thermique à la flamme. La température d'une flamme combustible varie selon les gaz comburants utilisés de 2 800 C° pour le propane et à 3 150 C° en cas d'une flamme oxyacétylénique. Les matériaux qui fondent à une température inférieure à 2 800 C°, et qui ne se subliment pas, peuvent être projetés à la flamme. [4]

1.4.1 Projection flamme-poudre

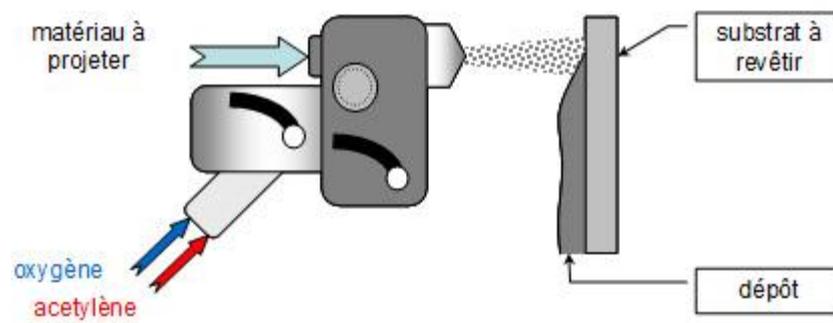


Figure 1.2 Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre

On désigne généralement sous le nom de projection flamme-poudre le procédé de projection thermique le plus ancien, consistant à introduire un matériau sous forme de poudre dans une flamme oxycombustible à travers d'un pistolet et à le véhiculer grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion.

Les pistolets flamme-poudre sont de deux types :

- à réservoir de poudre intégré, la poudre tombant par gravité puis étant aspirée par un des gaz de combustion.
- à réservoir séparé, relié au pistolet par un flexible, la poudre étant véhiculée par un gaz porteur (gaz neutre, air...).

La vitesse des particules projetées est faible (30 m/s) et la distance entre buse et substrat est comprise entre 100 et 200 mm (afin que la poudre ait un temps de séjour suffisamment long pour être fondue). Ce procédé permet des dépôts de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur, à des taux horaires de dépôt d'environ 2 à 3 kg/h, sans échauffement important

du substrat. Les matériaux les plus utilisés restent les alliages auto fusibles, la refusion après projection permet d'améliorer l'adhérence et de diminuer la porosité. La projection d'aciers, d'alliages à bas point de fusion, de céramiques ou de polymères est également possible.

Ce matériel est plus répandu et reste d'un coût très abordable [tableau 1.1], il est apprécié pour son niveau sonore faible et est utilisé dans tout type d'industrie pour des applications telles que l'isolation thermique ou électrique, revêtements anti usure, et anti corrosion sur des pièces neuves ou usagées. La projection à flamme est très bien adaptée pour projeter les métaux (Zn, Ni, Al, Mo...) ou les alliages (bronze, Ni Al, l'acier inoxydable). Ces matériaux sont projetés sous forme d'une poudre de taille de 5 à 100 μ m, avec un débit variant de 30 à 100 g/min ou sous forme de fils de diamètre $d = 2.3$ à 6mm avec un débit massique de l'ordre de 80 à 650 g/min. [4 ,3]

1.4.2 Projection flamme-fil

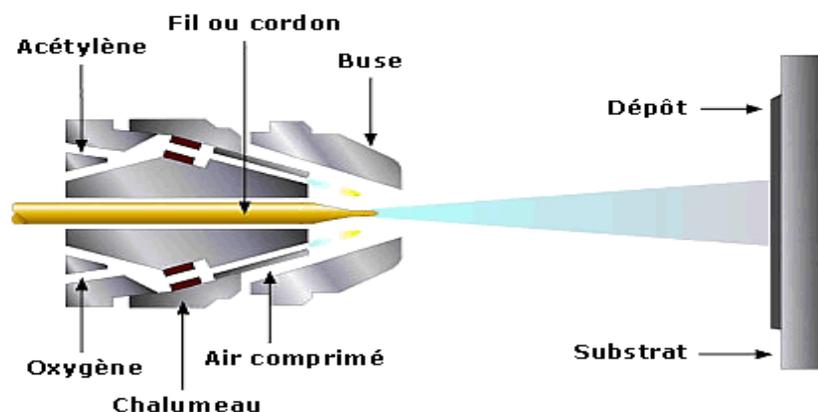


Figure1.3 Principe de la projection à flamme par fil

Contrairement au procédé flamme-poudre, la flamme ne sert en projection flamme-fil qu'à fondre le métal d'apport, introduit sous forme de fil, de cordon, ou de baguette, en son centre. Une fois fondu, le matériau d'apport est projeté sur le substrat par un courant d'air comprimé. Les pistolets de projection flamme-fil se composent de deux parties :

- une partie chalumeau dans laquelle le matériau d'apport est fondu et pulvérisé ;
- une partie entraînement de fil.

La partie chalumeau comprend un mélangeur de gaz, une buse à gaz, une buse à air. Elle est alimentée par les mêmes gaz que ceux utilisés en projection poudre (oxygène + gaz combustible), auxquels s'ajoute l'air comprimé servant à la pulvérisation du matériau

Chapitre 1

d'apport fondu. Des buses à gaz différentes permettent l'utilisation de gaz tels qu'acétylène, et le propane. De même, des rallonges, à jet droit ou à jet dévié, autorisent les dépôts dans des alésages ou dans des zones difficilement accessibles. La partie entraînement de fil peut être animée soit par une turbine à air, soit par un moteur électrique. Le système d'entraînement par moteur électrique permet une régularité parfaite de l'avance du fil, en particulier grâce à un couple moteur constant, quelles que soient les variations de traction du fil en amont du pistolet. L'avantage du système d'avance par turbine est le poids et le coût inférieurs de l'appareil. Ces appareils sont utilisés manuellement ou sur machines entièrement automatisées.

L'installation d'une projection flamme fil comprend :

- un dévidoir sur lequel sont posées les couronnes de fil, ou un système de déroulement du fil à partir de fûts, suivant le conditionnement du matériau d'apport
- un redresseur de fil (suivant la nature des fils utilisés)
- un pistolet manuel ou automatique suivant le mode de travail
- un tableau de réglage des pressions et débits des gaz ou une armoire de commande avec cycles de fonctionnement automatiques (allumage, contrôle de présence de flamme, contrôle des débits de gaz par débitmètres massiques, avance et arrêt du fil, mise en veilleuse, extinction, asservissements des animations pistolet pièce...).

La vitesse des particules est d'environ 150 m/s et la distance entre buse et substrat est comprise entre 100 et 200 mm Les épaisseurs déposées peuvent aller de quelques dixièmes de millimètre à quelques millimètres, à des taux horaires très variables suivant les matériaux, les diamètres de fil utilisés, et les propriétés de dépôts recherchées : de 1 kg/h, pour certaines céramiques préparées sous forme de cordon souple ou de baguette, à plus de 30 kg/h pour des fils anticorrosion tels que le zinc. Cette technique permet de projeter des métaux (Zn, Al, Cu, Sn, Ni, Mo), des aciers et des alliages à base de Zn, Cu et de Ni sous forme de fils et quelques céramiques (Al_2O_3 , $Al_2O_3 - TiO_2$, ZrO_2 avec stabilisants) sous forme de cordons ou de baguette [2] [4]

1.5 Projection par arc électrique entre deux fils

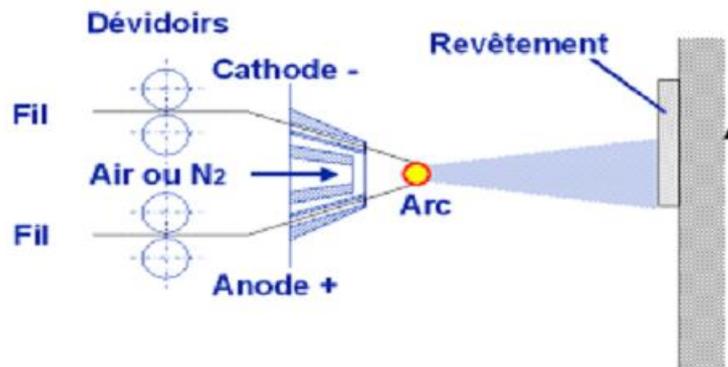


Figure 1.4 : Principe de fonctionnement d'un pistolet arc électrique

La projection à l'arc est le premier procédé ayant utilisé l'énergie d'une décharge électrique. Il consiste en un arc électrique créé entre deux fils consommables et un jet de gaz comprimé qui sert à pulvériser et à projeter le métal fondu en fines gouttelettes sur le substrat.

L'équipement consiste en un pistolet de projection, un système d'avancement des fils, un générateur de courant asservi par une régulation automatique et une source de gaz comprimé (Généralement de l'air mais l'utilisation d'un gaz neutre est possible). Les fils sont amenés dans la zone de fusion du pistolet à travers des électrodes guides qui assurent leur bon positionnement et le transfert du courant. L'arc électrique est généré entre les deux fils en contact et permet de les fondre. La température dans la zone de fusion peut être de l'ordre de 6000 K. Le métal fondu est pulvérisé grâce au jet de gaz comprimé et projeté sur le substrat. Les épaisseurs des dépôts varient de 0.2 à 3 mm avec un taux de porosité de 5 à 10 % et une adhérence de 20 à 40 MPa. La technique est simple et peu coûteuse et permet de déposer la matière avec un débit important (de 5 à 30 kg/h). L'utilisation d'un gaz neutre diminue sensiblement la présence d'oxydes dans le dépôt. Des modifications du pistolet et l'emploi d'un second jet de gaz ont permis de concentrer le flux de matière atomisée et de diminuer la porosité des couches. [3,4]

1.6 La projection plasma

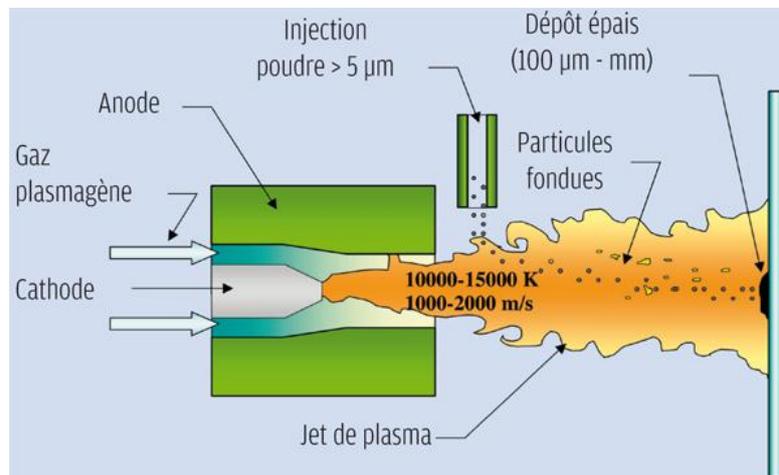


Figure 1.5: Principe de fonctionnement d'une torche plasma

Un plasma est un gaz ionisé constitué de molécules, d'atomes, d'ions et d'électrons, l'ensemble étant électriquement neutre.

Un plasma Ar/H₂ sera ainsi constitué des espèces suivantes : Ar, H, H⁺, Ar⁺, e⁻. Pour générer un plasma, les trois éléments fondamentaux sont

- une source de puissance (générateur à courant continu)
- une décharge ionisant le gaz (générateur haute fréquence ou haute tension)
- un couplage assurant le contact entre deux électrodes via le gaz plasma.

Pour la projection thermique, deux propriétés conditionnent vitesse et température des particules projetées:

- la conductivité thermique qui détermine les transferts plasma particules et donc l'état de fusion des particules lors de leur impact sur le substrat
- la viscosité qui permet de diminuer les entrées d'air dans le jet plasma, d'augmenter la longueur du jet et d'éviter les réactions chimiques des particules (oxydation en particulier).

La projection plasma est un procédé complexe par le nombre important de paramètres liés et intervenant simultanément sur la qualité finale du revêtement. Pour obtenir un revêtement

dense et adhérent, les particules doivent avoir une vitesse suffisante lors de l'impact afin de s'étaler et de couler sur les irrégularités du substrat ou sur les particules précédemment projetés. [3]

1.7 Projection hypersonique

Ce type de projection tient son nom de la vitesse de sortie des gaz qui se situe entre Mach 1 et Mach 2. On distingue deux procédés de ce type :

- la projection hypersonique à tir discontinu
- la projection hypersonique à tir continu.

1.7.1 Projection hypersonique a tir discontinu

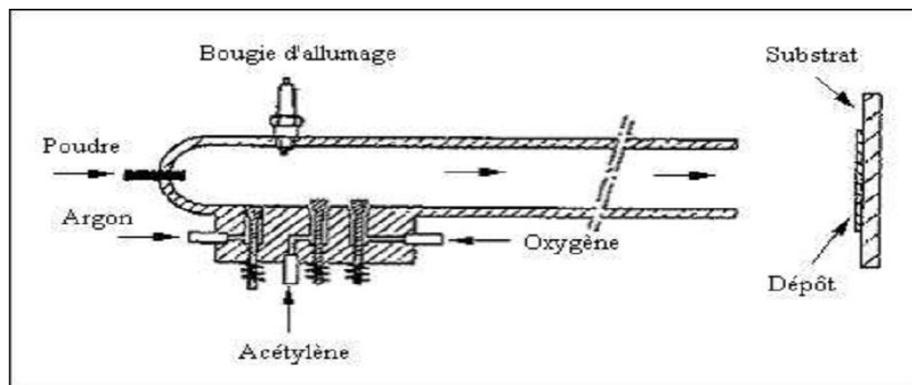


Figure 1.6 Schéma de principe d'un canon à détonation

Cette technique de projection consiste à introduire le matériau d'apport (sous forme de poudre) dans un tube appelé *canon à détonation* en même temps que le gaz de combustion (oxygène, acétylène). Ce mélange explose grâce à une étincelle, à la fréquence de 8 allumages par seconde. La poudre est ainsi chauffée et éjectée à très grande vitesse (950 m/s) par l'onde de choc créée. Le régime de projection est donc discontinu. Entre chaque tir, un balayage avec un gaz neutre est pratiqué. Ce type d'installation permet d'obtenir des dépôts de caractéristiques remarquables du point de vue de la compacité (porosité inférieure à 1 %), de l'adhérence (souvent supérieure à 80 MPa) et de la rugosité ($Ra = \pm 3 \text{ mm}$), à des taux horaires de dépôts compris entre 3 et 5 kg/h. Les épaisseurs de dépôts sont en général limitées à 0,2 mm. Les matériaux les plus fréquemment utilisés sont les carbures de Cr ou de W avec liant métallique Ni ou Co, l'alumine, l'oxyde de chrome. Ce type de matériel n'est utilisé que pour les travaux de sous-traitance, principalement en raison des contraintes de mise en œuvre

(dimension du canon, bruit...), dans les domaines de l'aéronautique, la sidérurgie, la chimie ou le textile. [4]

1.7.2 Projection hypersonique à tir continu

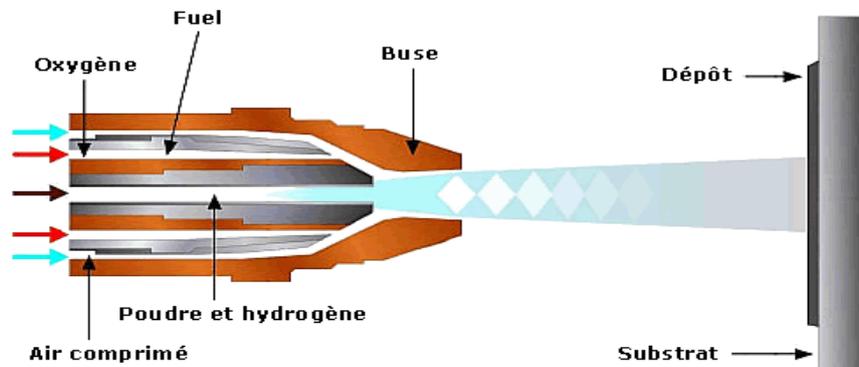


Figure 1.7: Principe de la projection thermique par HVOF

Cette variante des procédés flamme classiques réside dans la vitesse très élevée acquise par les particules projetées grâce aux importantes pressions régnant dans la chambre de combustion. Deux procédés sont développés, leur différence tenant essentiellement à des critères d'ordre économique :

- Le procédé **HVOF**: High Velocity Oxygen Fuel;
- le procédé **HVAF** : High Velocity Air Fuel.

L'HVOF utilise la combustion de deux gaz, d'une part O₂ et d'autre part le propane, le propylène, le tétrène ou hydrogène (figure 12) [Fig.1.7]. L'HVAF utilise quant à lui un mélange kérosène air comprimé pour la combustion. Les gaz de combustion pénètrent dans la chambre de combustion puis sont éjectés du pistolet sous l'effet de la pression élevée (5 à 7 bar). La poudre est injectée à l'aide d'un gaz neutre dans la flamme où elle est fondue et accélérée dans la tuyère à une vitesse proche de la vitesse hypersonique (figure 13). Il convient de noter que la présence d'une flamme pilote (hydrogène-oxygène) est nécessaire à l'allumage de la flamme principale. [4]

1.8 Préparation de la surface à revêtir

La préparation de surface comprend trois étapes principales :

- **Le nettoyage de la pièce traitée** qui est nécessaire pour l'élimination de toute matière contaminant (graisse, huile, poussières, polymères) réalisée par immersion, par pulvérisation, par ultrasons voir par élévation de température. Les nettoyeurs peuvent être des solvants
- **La création de rugosité** en surface de la pièce traitée afin de permettre aux particules de s'ancrer dans les irrégularités de surface ainsi créées et d'assurer un bon accrochage mécanique. C'est un facteur prépondérant dans la bonne tenue des dépôts. Cette création de rugosité peut être effectuée de deux manières :
 - ❖ Par sablage (au corindon ou à la grenaille métallique) permettant un nettoyage complémentaire de la pièce (enlèvement de peintures, d'oxydes...) et l'obtention d'une rugosité de surface comprise entre 6 à 10 mm environ (qualité SA3).
 - ❖ Par tournage avec création d'un profil rainuré de profondeur 0,5 mm environ. Cette méthode est réservée en général aux dépôts les plus épais, le tournage étant suivi d'un sablage complémentaire. Il convient de noter qu'une attention particulière doit être portée aux raccordements « partie rechargée/partie non traitée » qui sont généralement réalisés à l'aide de profils chanfreinés ou rayonnés.
- **Le masquage des zones non rechargées** les produits les plus courants sont des adhésifs ou des caches métalliques (en général réservés aux pièces de série). Les élastomères souples présentent l'avantage de pouvoir servir à la fois au sablage et à la projection et de permettre un masquage précis.

1.8.1 Les techniques de préparation

Les techniques de préparation mécaniques sont les plus utilisées en projection thermique, elles sont également les plus simples à mettre en œuvre. Donc parmi ses techniques utilisées on peut citer :

a. Le grenailage ou sablage

Le sablage est le terme impropre donné au "traitement par impacts", plus généralement appelé grenailage par les professionnels. C'est un procédé de traitement d'une surface par des projectiles petits et nombreux, destinés à induire des modifications physiques, chimiques ou mécaniques au sujettile. La technique employée consiste à utiliser, soit un vecteur gazeux (généralement l'air comprimé), soit une force centrifuge (turbine) pour projeter à grande vitesse des grains (projectiles) qui viennent percuter de façon répétée la surface des pièces (subjectiles).

Le "grenailage" met en œuvre des projectiles extrêmement variés, différentes méthodes de projection et de nombreux paramètres qui influencent le résultat. Il reste à ce jour la seule solution efficace



Figure 1.8: Grenailleuse

b. Le brossage et polissage

Les techniques de brossage et de polissage. Ces techniques sont mal adaptées à la projection thermique. En effet, le brossage ne procure pas un état de surface suffisamment propre et une rugosité suffisamment élevée. Le polissage, permet une décontamination de la surface et la création, d'une rugosité contrôlée. Cependant, les surfaces polies sont très réactives notamment vis-à-vis de l'oxygène et se couvrent d'une couche de passivation qui limite l'adhérence. De plus, des pièces à revêtir de grande taille se prêtent mal au polissage de leur surface.

c. filetages grossiers

Il est utilisé généralement pour les surfaces cylindriques pour mettre en œuvre le procédé de projection à froid après l'usinage de préparation, il faut augmenter la surface décrochage en usinant une passe à avance rapide avec de 0.7 mm par tour et une profondeur de coupe de

0.35 mm on obtient un état de surface adéquat ne pas utiliser de lubrifiant cette technique n'est pas recommandée pour des revêtements minces

d. Le préchauffage

Comme nous avons vu précédemment, suivant la différence de température entre le métal d'apport et celle du support, on obtiendra un accrochage plus ou moins important. Raison pour laquelle, un léger préchauffage de la pièce à traiter, est toujours conseillé afin d'augmenter le pouvoir d'adhérence. Il devient indispensable pour les revêtements à partir de poudre et surtout pour les matières plastiques qui ne sont pas conductrices de chaleur.

Le préchauffage peut aussi être employé pour la dessiccation de certaines pièces poreuses, imprégnées en profondeur d'eau ou de graisse ou d'huile, que le nettoyage n'a pas atteinte. Il permettra de faire sortir les liquides absorbés, afin que la métallisation adhère efficacement.

1.9 Structure et caractéristiques des dépôts

Les dépôts formés par projection thermique sont obtenus par empilements successifs de gouttelettes de matériau fondu ou à l'état pâteux. La structure ainsi formée est du type lamellaire. Afin de réaliser un bon accrochage mécanique, la surface des pièces à revêtir est préalablement préparée pour en augmenter la rugosité et permettre aux particules de s'ancrer dans les irrégularités de surface. La formation du dépôt présente deux étapes caractéristiques :

- l'écrasement de chaque gouttelette
- la formation d'une couche de matériau, résultant de la cinématique liée au process (mouvements relatifs torche/pièce).

Ce mécanisme d'écrasement est un mécanisme complexe dépendant d'une part des caractéristiques des particules elles-mêmes (vitesse, composition chimique, température, degré de fusion), et d'autre part de celles du substrat (nature, rugosité, température). Les expérimentations récentes montrent qu'en dessous d'une température appelée température de transition la structure obtenue est du type « fragmentée ». Ce phénomène est attribué à un temps de germination plus important quand l'interface particule/substrat est maintenue à une certaine température.

L'état liquide est ainsi conservé pendant toute la durée de l'impact. D'autres facteurs, tels que la mouillabilité et la conductibilité thermique du matériau de base, influent également sur cette structure. La vitesse de refroidissement des particules au contact du métal de base est généralement supérieure à 106 K/s, le temps de solidification étant compris entre 0,5 et 2,5 ms. La formation d'un dépôt résulte de la combinaison du phénomène d'écrasement et de

Chapitre 1

solidification rapide de particules fondues sur le substrat et du balayage de la surface à traiter. La réaction chimique des particules avec les gaz environnants et les transferts de chaleur avec le substrat (ou la couche précédemment déposée) vont affecter la qualité du dépôt, et en particulier le taux de porosité, le taux d'impuretés, les contraintes résiduelles et la structure métallurgique

1.10 Traitement des dépôts après la projection

Les dépôts projetés thermiquement ont beaucoup de défauts (porosité, faible adhérence, phases métastables, rugosité de surface...) qui peuvent être améliorés par des post-traitements :

- Traitement thermique qui inclut le chauffage au four, traitement laser et qui sert surtout à éliminer les phases métastables et améliorer les propriétés mécaniques
- Traitement mécanique, rectification et finition de la surface des dépôts.
- Imprégnation avec les composés organiques et inorganiques.

1.11 Contrôles des dépôts

Les contrôles des dépôts, hormis les contrôles dimensionnels, sont tous des tests destructifs. Ils peuvent être réalisés sur prélèvement d'échantillons de production ou sur éprouvette témoin, traitée simultanément aux pièces de production. Les contrôles sont de deux types :

- les contrôles métallurgiques, effectués sur coupes micrographiques (structure des dépôts, porosité, dureté...) ou sur éprouvettes (essais d'adhérence, de pliage...).
- les contrôles fonctionnels effectués sur machines de test (frottement, corrosion, résistance à l'usure, tenue aux chocs thermiques...). Le tableau 8 regroupe les différents contrôles réalisés en projection thermique et les normes correspondantes

1.12 Adhérence

L'adhésion assure la formation et la cohésion de l'interface entre deux solides (le dépôt et le substrat). Elle est induite par les forces d'attraction entre les matériaux. Les mécanismes d'adhésion peuvent être de plusieurs types :

- **Mécanique** : l'adhésion est assurée par un ancrage mécanique du matériau qui pénètre dans les microcavités et irrégularités de surface du substrat avant la solidification. Il a été prouvé expérimentalement par un exemple simple qu'un matériau poli présente un degré plus faible d'adhésion qu'un matériau sablé. Un bon ancrage mécanique nécessite un

choix judicieux de la rugosité de surface et dépend à la fois de l'adhésif et de la mouillabilité du substrat ainsi que de la surface de contact entre le substrat et l'adhésif. Une bonne affinité dépôt/surface du substrat limite donc la formation de défauts liés à de l'air piégé et la propagation des fissures ;

- **Chimique** : il s'agit d'une adhésion "chimique" allant jusqu'à la formation de véritable liaisons résultant d'interactions intermoléculaires ou interatomiques (par exemple de type covalente ou ionique) à l'interface. Toutes ces différentes formes de liaisons contribuent à la bonne adhérence du système substrat/ dépôt. Ce mécanisme est également observé dans le cas d'un traitement thermique à haute température lors de l'élaboration du revêtement ou dans le cas d'une réaction exothermique qui peut favoriser la formation de liaisons métallurgiques à l'interface. Néanmoins, l'accrochage avec le substrat peut être favorisé si celui-ci a été préalablement préparé. Une préparation non satisfaisante peut être pénalisante pour l'adhésion du revêtement sur son substrat. En effet, la nature, la température et la préparation de surface du substrat agissent notamment sur les transferts thermiques à travers une modification des propriétés mécaniques du substrat...etc.

Le substrat doit donc être préalablement traité pour adapter sa rugosité, de façon à créer des points d'ancrage mécanique pour les particules projetées. Il est néanmoins nécessaire de ne pas créer une rugosité trop importante, qui diminuerait les vitesses de refroidissement et d'étalement des particules en augmentant localement la résistance thermique de contact.

1.13 Conditions pour l'obtention d'un bon dépôt

L'obtention d'un revêtement dense et adhérent exige que

- une fraction importante des particules injectées soient dans un état liquide ou semi pâteux lorsqu'elles atteignent le substrat ou les particules précédemment déposées ;
- les particules fondues aient une vitesse suffisante pour s'étaler et couler sur les irrégularités du substrat ou sur les particules précédemment déposées
- une forte adhérence inter particules et particule-substrat soit établie
- une sous-couche d'accrochage est souvent projetée avant la projection du dépôt pour permettre une adhésion du revêtement sur le substrat

Une attention toute particulière doit évidemment être portée à la fusion des particules.

Cette fusion dépendra :

- du niveau de température de la flamme, fonction du mélange de gaz employé

- de la quantité de chaleur disponible dans cette flamme
- du point d'injection de la poudre dans la flamme ; de la vitesse d'injection des particules

1.14 Conclusion

La projection thermique est une technique de revêtement de surface offrant une très grande flexibilité au niveau des types de matériaux appliqués. Ceci permet d'accroître les propriétés de surface de différentes façons, et d'adresser une multitude de problématiques industrielles. Il est également possible de combiné divers types de matériaux ensemble pour obtenir des propriétés complémentaires, comme, par exemple, un revêtement anti usure et autolubrifiant.

Les applications de la projection thermique sont très variées revêtement contre l'usure, protection contre la corrosion et la chaleur, revêtement à propriétés électriques, réparation de surfaces endommagées... Et ces procédés sont utilisés dans de nombreux secteurs : mécanique (rouleaux de laminoirs, guides fils, pompes, pistons...), aéronautique (aubes de turbine, blindage, barrière thermique...), biomédical (prothèses, couches biocompatibles...), industrie nucléaire (protection contre la corrosion et l'usure, réacteurs chimiques...).

CHAPITRE 2

PHENOMENE ET ESSAIS DE FATIGUE

2.1 Introduction

De nombreux accidents (catastrophe aérienne, arrêt brutale d'une chaîne de production...etc.) qui ont conduit à des dégâts importants, humains et matériels, ont comme premier responsable, le phénomène de fatigue des matériaux. ce phénomène est très discret. L'expérience montre que si l'amplitude et le nombre de sollicitations périodiques sont suffisants, il en résulte une fissuration progressive puis une rupture par fatigue. Généralement, celle-ci se produit brutalement, sans allongement précurseur, et la cassure présente deux zones distinctes : une zone lisse, qui est la cassure de fatigue proprement dite, sur laquelle on peut observer des lignes d'arrêt successives, et une zone d'arrachement, à nerf ou à grain, qui correspond à la rupture finale instantanée. Cette rupture peut survenir pour des contraintes appliquées bien inférieures à la charge de rupture statique et même à la limite d'élasticité apparente. Si le terme fatigue a été consacré par l'usage pour désigner la cause de cette défaillance en service, on a appelé endurance l'aptitude à résister à la fatigue.



Figure 2.1 rupture par fatigue

2.2. Définition

On appelle fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés du matériau, consécutive à l'application de cycles d'effort. La répétition de ces cycles peut conduire à la rupture des pièces

2.3 Objet des essais de fatigue

L'objet des essais de fatigue est de déterminer le comportement mécanique d'éprouvettes, de pièces ou d'ensembles mécaniques, sous des sollicitations de contraintes périodiques, analogues à celles qui se produisent dans la pratique.

Chapitre 2

Les essais sur pièces ou structures mécaniques correspondent généralement à l'un des trois objectifs :

- vérifier la conformité d'un produit à une norme ou à un cahier des charges.
- valider ou optimiser un nouveau produit.
- rechercher des solutions constructives à la suite de l'avarie d'un composant en service.

Dans les trois cas, il s'agit, le plus souvent, de contrôler que la pièce ou la structure peut subir sans fissuration ni rupture un nombre de cycles fixé, d'amplitude de contrainte donnée.

La difficulté de la mise en œuvre des essais correspondant à ces trois cas, concerne :

- le mode de sollicitation : points d'application et direction des efforts ou des déplacements
- le niveau de l'amplitude de sollicitation qui doit être représentatif des sollicitations rencontrées en service. [6]

2.4 Classification des essais de fatigue

On peut distinguer d'abord deux grandes catégories d'essais de fatigue, les essais sous amplitude de charge constante et les essais sous amplitude de charge variable ou à programme de charge tendant à simuler les sollicitations en service. Dans le premier cas, celui des essais sous amplitude de charge constante, on peut distinguer les essais d'endurance, cherchant à déterminer la limite de fatigue ou la durée de vie à la rupture, des essais de fissuration, cherchant à mesurer la vitesse de propagation des fissures de fatigue.

On peut également distinguer le domaine de l'endurance ou des grandes durées de vie, ou fatigue vibratoire, du domaine de la fatigue oligocyclique, correspondant à des nombres de cycles à rupture, faibles par suite d'une déformation plastique généralisée ou localisée (entaille) de la pièce ou de l'éprouvette (fatigue plastique).

Par ailleurs, on peut distinguer les essais à charge imposée, comme par exemple les essais de flexion rotative sur éprouvette cantilever où la charge est appliquée par un poids, des essais à déplacement imposé, comme par exemple les essais de flexion plane d'une éprouvette à l'aide d'une bielle et d'un excentrique.

en général les essais de fatigue à grand nombre de cycles sont des essais à charge imposée, tandis que les essais de fatigue plastique sont des essais à déformation imposée, la machine étant asservie à la mesure de la déformation cyclique de l'éprouvette par un extensomètre [6]

2.5 Classification des modes de sollicitation

On peut classer, pratiquement, les sollicitations cycliques selon la nature des efforts exercés par les machines sur les pièces ou les éprouvettes. On distingue ainsi :

- les essais de flexion plane où toutes les fibres à la même distance de la fibre neutre sont simultanément dans le même état de traction ou de compression
- les essais de flexion rotative où toutes les fibres (sauf la fibre neutre) sont successivement tendues puis comprimées, la valeur de la contrainte exercée sur chaque fibre variant linéairement, dans le domaine élastique, avec sa distance à la surface où la fibre externe supporte la contrainte maximale
- les essais sous efforts axiaux, traction ou compression, ou, en l'absence de discontinuité géométrique, la contrainte est constante dans toute section droite.
- les essais de torsion alternée.
- les essais sous contraintes combinées, statiques et cycliques, torsion et flexion, traction et torsion, etc.

Des machines d'essais de types différents permettent d'effectuer ces divers essais. [6]

2.5.1 Classification des sollicitations

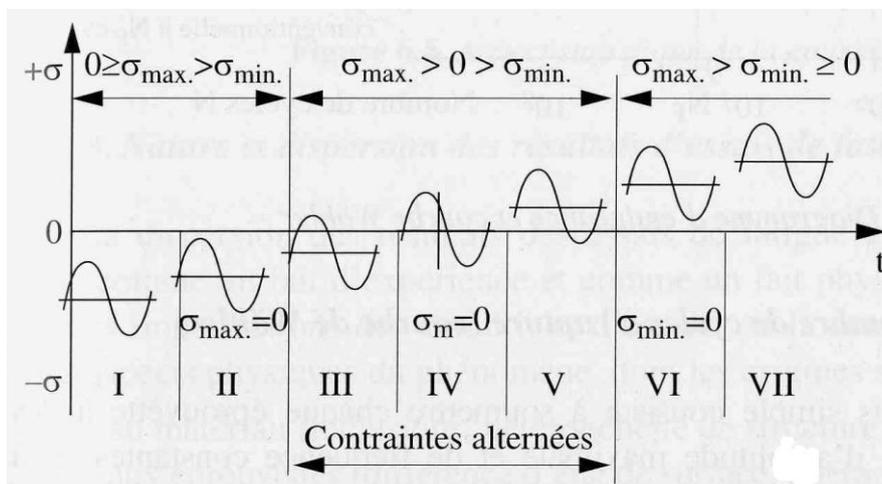


Figure 2.2 représente les différentes charges cycliques

Les contraintes périodiques qui existent en service sont en général sinusoïdales et, selon la valeur de la contrainte statique que l'on superpose, on distingue :

- Les contraintes statiques ondulées de (compression ou traction)

- Les contraintes statiques répéter de (compression ou traction)
- Les contraintes statiques asymétrique (compression ou traction)
- Les contraintes symétriques [7]

2.5.2 Définitions d'un cycle de contrainte

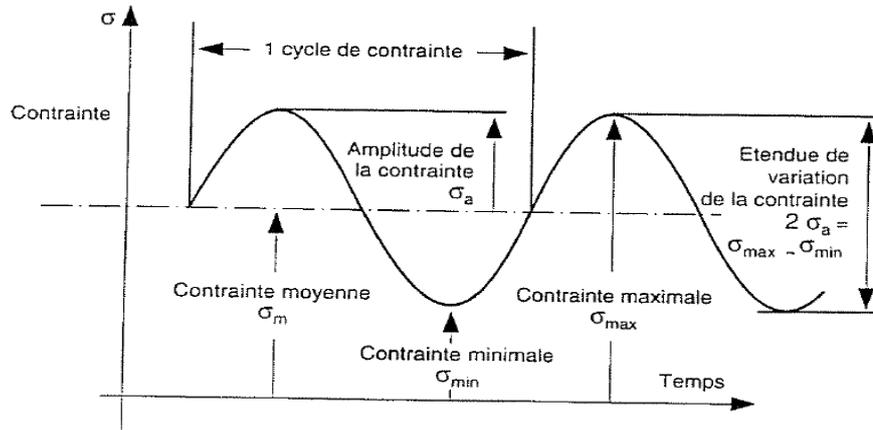


Figure 2.3 chargement de fatigue

Un cycle de fatigue est définie comme étant la plus petite partie de facteur contraintes temps qui se répète périodiquement les grands caractéristique de cycle et [7] [9]

- La valeur de contrainte maximum σ_{max}
- la valeur de contrainte minimum σ_{min}
- la valeur de la contrainte moyenne $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$
- la valeur de la contrainte dynamique $\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$
- le rapport de la contrainte $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$

2.6 Essais de fatigue flexion rotative

Dans le cas de flexion rotative, l'éprouvette est soumise à un effort F de flexion au même temps elle tourne au tour de son axe. Pour un tour de rotation se qui équivalent à un cycle, chaque point de la section et par suite chaque fibre de la poutre subi une traction quant le point et en haut (+y) et une compression en bas (- y). La sollicitation engendrée est une sollicitation sinusoïdale symétrique de type Figure2 .4

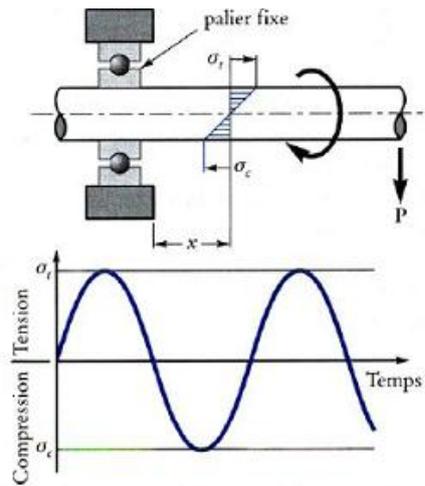


Figure 2.4 schéma explicatif de l'essai de fatigue par flexion rotative.

Les essais de flexion rotative nous permettent de réaliser des essais pour lesquels la contrainte moyenne appliquée est nulle. la figure suivante montre un exemple d'une machine d'essai de fatigue en flexion rotative.

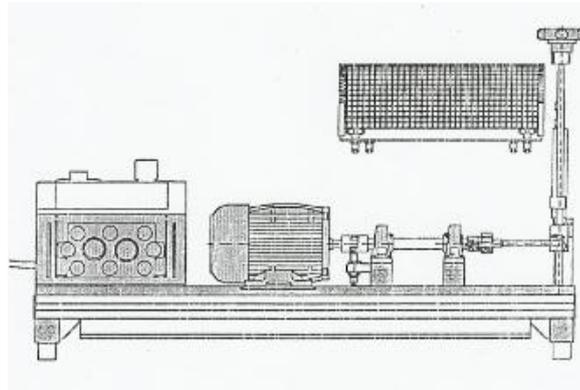


Figure 2.5 Schéma de machine de fatigue de flexion rotative.

2.6.1 Calcul de la contrainte en cas de flexion rotative

La contrainte normale agissant sur une fibre longitudinale à une distance c du point d'application de la force et à une hauteur y de l'axe neutre d'une poutre cylindrique est donnée par la relation ci-dessous:

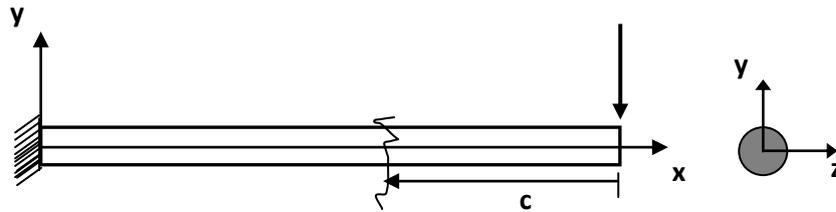


Figure 2.6 Schéma équivalent en RDM

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} \quad (1) \quad \text{Avec} \quad M = F \cdot c \quad (2)$$

$$I = (\pi d^4)/64 \quad (3)$$

M : moment de flexion.

I : le moment d'inertie de la surface de la poutre cylindrique.

En remplaçant les valeurs de (2) et (3) dans l'équation (1) on trouve :

$$\sigma = \frac{F \cdot c \cdot y}{\pi d^4 / 64} \quad (4)$$

En cas d'essai de fatigue en flexion rotative la contrainte engendrée est donc cyclique prenant les valeurs de :

$$\sigma_{\max, \min} = \frac{F \cdot c \cdot y}{\pi d^4 / 64} \quad (5)$$

Pour déterminer la contrainte maximale dans l'éprouvette ou nous estimons que la rupture aura lieu on considère le moment de flexion maximum à la distance $c = a$ et le fibre extérieure ou la contrainte de flexion prend son maximum $y = d/2$.

$$\sigma_a = \frac{32 \cdot F \cdot a}{\pi d^3} \quad (6)$$



Figure 2.7: Eprouvette sous une charge.

2.6.2 Dispersion des résultats

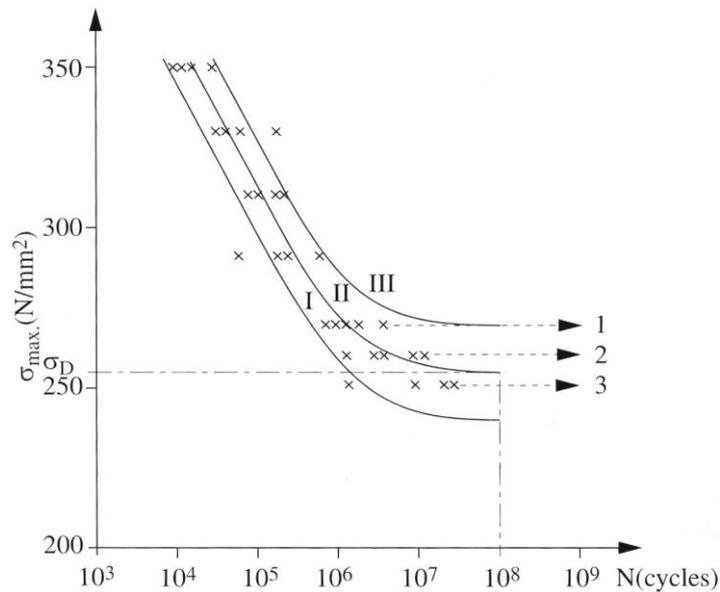


Figure 2.8 représente dispersion des résultats des mesures de fatigue

Les essais de fatigue présentent une dispersion importante, c'est-à-dire qu'il y a rupture, pour un même niveau de charge, à un nombre de cycles variable selon les éprouvettes, en raison :

- Du matériau (inclusions, hétérogénéités de structure...)
- Des éprouvettes (état de surface variable, tolérance dimensionnelles...)
- Des conditions d'essai (centrage des éprouvettes, fréquence des cycles, état d'environnement...)

Ainsi, pour un nombre de cycles fixe, on peut déterminer la probabilité de rupture en fonction de la contrainte. Ces courbes sont généralement des sigmoïdes normales. Dans ces conditions, l'analyse de statistique de la fatigue permet d'estimer les paramètres de la courbe de réponse μ , amplitude de la contrainte pour laquelle la probabilité de rupture est de 0,5 et s l'écart-type de la dispersion en contrainte. En déterminant ces courbes pour un nombre de cycles variables, il est possible de définir la courbe d'équiprobabilité de rupture en fonction du nombre de cycles. En général, chaque courbe d'équiprobabilité de rupture possède une asymptote. En particulier, la courbe d'équiprobabilité 0,5 tend vers la limite d'endurance σ_D . Cette limite est inaccessible en pratique et on la remplace par une limite d'endurance conventionnelle pour un nombre de cycles donnés (10⁷, 10⁸...). A cette valeur est associé un écart type s de la zone d'endurance, écart-type de la courbe de réponse en contrainte. [6,7]

2.6.3 Courbe de Wöhler

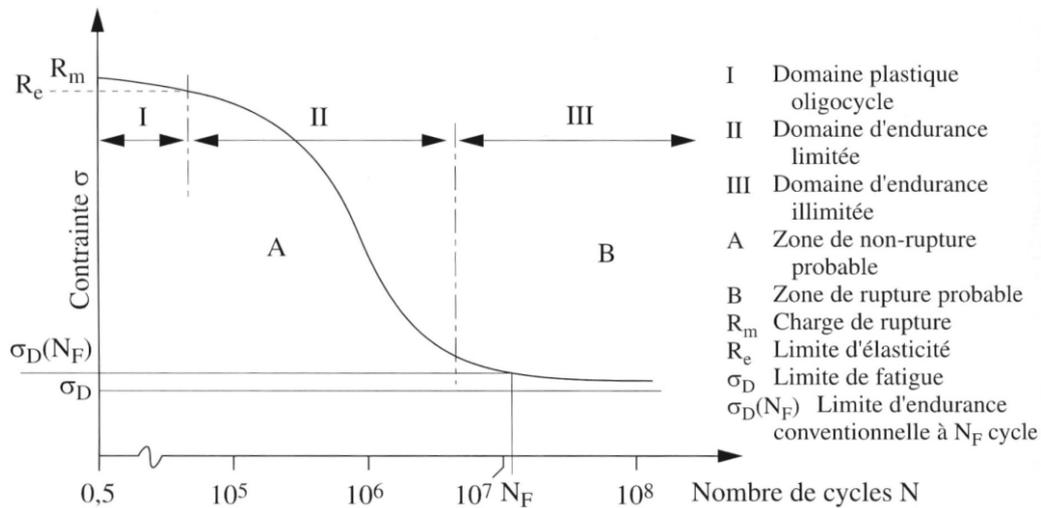


Figure 2.9 représente une courbe de Wöhler

On distingue 3 zones

- La zone de fatigue oligocyclique
- La zone d'endurance limitée
- La zone d'endurance illimitée

a. La zone de fatigue oligocyclique

Sous forte contrainte, $\sigma > R_e$, la rupture survient après un petit nombre de cycles et est précédée d'une déformation plastique notable, on cherche à connaître le comportement dans cette zone dans les cas où le matériau est soumis au moins temporairement à des contraintes très élevées

b. La zone d'endurance limitée

C'est le cas le plus fréquent dans les problèmes de fatigue. La rupture apparaît après un nombre limité de cycles sans être accompagnée de déformations plastiques mesurables les contraintes appliquées sont largement inférieures à la limite d'élasticité du matériau

c. La zone d'endurance illimitée

C'est presque une zone de sécurité, la rupture se produit pour un nombre très élevé de cycles, ($10^8, 10^9 \dots$) généralement supérieur à la durée de vie envisagée de la pièce.

Dans de nombreux cas, on peut tracer une asymptote à cette partie de courbe. Elle correspond à la limite d'endurance ou de fatigue σ_D , (généralement vrai pour les aciers, rare pour l'aluminium où il n'y a pas d'asymptote).

2.6.4 Représentations mathématiques de la courbe

Diverses expressions analytiques ont été proposées pour représenter les courbes de Wohler dans les domaines d'endurance limitée ou dans le domaine d'endurance lorsque sont connues pour un matériau ou une pièce données ces équations permettent de déterminer le nombre de cycles à la rupture en fonction de la contrainte

Parmi toutes les formules qui relient la contrainte alternée appliquée en essais σ_a au nombre de cycles à la rupture n et la limite d'endurance σ_D nous retiendrons celle qui représente le meilleur résultat d'essais de fatigue, à savoir

2.6.4.1 Modèle de Wöhler

Wöhler a proposé en 1870 de modéliser la courbe expérimentale qu'il a obtenue par une droite horizontale prolongée au-delà de la limite d'endurance, dans une échelle semi-logarithmique.

$$\begin{aligned} \text{pour } S \geq E & \quad \log N = A.S + B \\ \text{pour } S < E & \quad \text{asymptote horizontale} \end{aligned}$$

A et B sont des constantes à déterminer expérimentalement

$E = \sigma_D$ est la limite d'endurance, $S = \sigma_a$ est la contrainte alternée.

2.6.4.2 Modèle de Basquin

Basquin a proposé en 1910 de modéliser la courbe de Wöhler par une droite dans une échelle logarithmique. Cette droite est prolongée au-delà de la limite d'endurance du matériau par une droite horizontale.

$$\begin{aligned} \text{pour } S \geq E & \quad \log N = A.\log S + B \\ \text{pour } S < E & \quad \text{asymptote horizontale} \end{aligned}$$

A et B sont des constantes à déterminer expérimentalement

$E = \sigma_D$ est la limite d'endurance, $S = \sigma_a$ est la contrainte alternée.

2.6.4.3 Modèle de Bastenaire

Bastenaire a proposé en 1963 de modéliser la courbe de Wöhler par une courbe présentant une asymptote horizontale dans une échelle logarithmique. C'est le modèle recommandé par la norme française NF A03-405. Cependant son utilisation peut s'avérer délicate. Son équation est la suivante :

$$N = A \frac{\exp\left(-\frac{S-E}{B}\right)^c}{S-E}$$

A et B sont des constantes à déterminer expérimentalement ; la constante c vaut 1, 2 ou 3 suivant le nombre de points d'inflexions que les résultats expérimentaux permettent manifestement d'identifier et $E = \sigma_D$ est la limite d'endurance, $S = \sigma_a$ est la contrainte alternée
[6 ,7 ,9]

2.7 Le mécanisme de la rupture par fatigue

Pour la majorité des applications, les contraintes dans la structure varient dans le temps

En intensité est en direction la Rupture origine habituellement sera à la surface de la pièce est la Rupture se produit après un certain temps de fonctionnement, du point de vue macroscopique on ne peut le distinguer qu'après une rupture subite. Ceci dépend du type du matériau et des caractéristiques de sollicitation qu'il subit en passant par les étapes suivantes:

- Période d'amorçage.
- Période de propagation.
- Rupture brutale.

2.7.1 Période d'amorçage

Généralement, l'amorçage des fissures se produit à la surface s'il n'y a pas de défauts internes importants, la mobilité des dislocations en surface étant plus rapide qu'au cœur de la pièce. En plus, la surface des pièces est soumise à l'agressivité de l'environnement.

La fatigue des matériaux ductiles est représentée par la formation de lignes et de bandes de glissement ainsi que des plans de glissement qui n'atteignent pas la surface et des plans de glissements qui dépassent la surface appelés respectivement intrusion et extrusion. On appel

ce phénomène : le mécanisme d'intrusion et d'extrusion qui conduit finalement à l'apparition de microfissures.

La fatigue des matériaux durs n'est pas représentée par la formation de bandes de glissement mais par la création de microfissures qui se développent le long des plans de contrainte de tension.

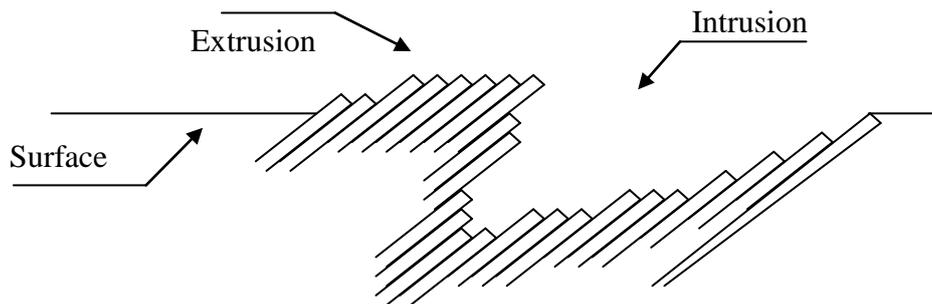


Figure 2.10 Formation d'intrusion et d'extrusion.

2.7.2 Période de propagation :

La période d'amorçage est suivie par la période de propagation causée par la formation des microfissures.

Cette période comprend deux étapes :

- La première étape ou stade I est la propagation interne des microfissures créées dans la période d'amorçage.

- La deuxième étape ou stade II est la propagation d'une des microfissures qui deviendra la fissure qui mènera éventuellement à une rupture brutale.

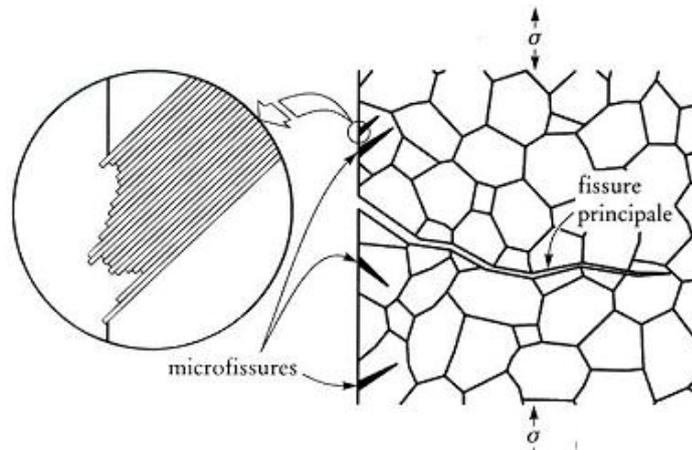


Figure 2.11 Période de propagation.

Stade I

Dans cette étape, les microfissures suivent les bandes de glissement là où elles sont nées et leurs vitesses de propagation qui est très faible implique que leurs longueurs ne passent que par quelques grains seulement (Généralement cette propagation est transgranulaire).

Ce stade est caractérisé par son faciès qui a l'air d'une rupture fragile avec des stries orientées comme celle d'un processus de cisaillement. Bien que la surface du faciès est petite par rapport à la surface totale de rupture, ce stade joue un rôle très important dans la durée de vie de la pièce surtout quand la vitesse de propagation de la microfissure est de quelques Angströms par cycle.

Stade II

Après le stade I et à l'intérieur de la pièce, l'une des microfissures suit le plan de contrainte de tension maximale. Généralement la fissuration dans ce stade est dite: Transcristalline.

Au début, la vitesse de propagation est faible (Quelques Angströms par cycle), elle augmente progressivement jusqu'à atteindre les μm par cycle.

Ce stade est très important, car c'est durant cette étape qu'on peut surveiller et contrôler la pièce en suivant la longueur de la fissure. Cela nous permet d'agir soit par un remplacement complet de la pièce ou par sa réparation pour éviter la dégradation des équipements.

Dans certain cas comme pour les pièces avec des défauts internes ont passe directement a l'étape II sans préalable.

2.7.3 Rupture brutale

La rupture brutale se produit quand la pièce ne peut plus supporter les sollicitations appliquées.

La propagation de la fissure est très rapide et agressive. Ce type de rupture peut causer des dégâts considérables

2. 8 Les faciès caractéristique des ruptures en fatigue

L'expertise d'une rupture est une étape très importante durant l'inspection d'un accident. Elle permet de caractériser les pièces endommagées ainsi que leurs causes de rupture. Cette action nous permettra d'identifier le type de rupture et décider des précautions qu'il faudra prendre afin d'éviter des dégâts importants.

La rupture par fatigue est caractérisée par trois zones :

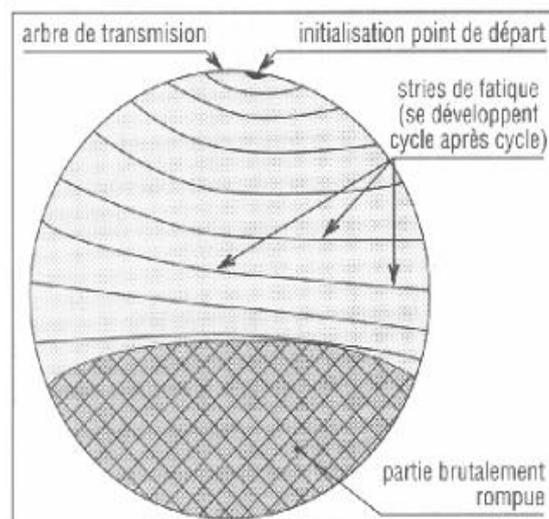


Figure 2.13 Faciès de rupture

Zone 1 : elle correspond à la période d'amorçage.

Zone 2 : elle correspond à la période de propagation.

Zone 3 : elle correspond rupture brutale.

De manière générale, pour un matériau de faibles ou moyennes caractéristiques, une faible section de rupture finale indique un niveau de sollicitation proche de la limite d'endurance. Par contre, une importante section de rupture finale va induire de profondes modifications. Dans la plupart du temps, l'examen macroscopique permet de détecter la zone d'amorçage, le sens de propagation et la nature du chargement. [6,7]

2.9 Dommages cumulatifs

Dans la réalité et en pratique, les pièces sont soumises à des contraintes variables et non à des sollicitations de fatigue d'amplitude constante. D'après la règle de Palmgren-Miner, qui est basée sur l'hypothèse que le dommage total accumulé par une pièce soumise à des sollicitations de contraintes variables s'obtient en additionnant linéairement les dommages correspondant à chaque sollicitation de contrainte individuelle :

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_k}{N_k} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$

D étant le dommage cumulatif n_i étant le nombre de cycles de sollicitation de contrainte d'amplitude constante N_i étant le nombre total de cycles à la rupture sous sollicitation de contrainte d'amplitude constante

CHAPITRE 3

PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la partie expérimentale de notre travail, les étapes de la réalisation de ce travail sont bien détaillé tel, que le découpage des éprouvettes et la préparation de leurs surface, la préparation des poudres ainsi que la technique de réalisation des revêtements par projection thermique.

Les différents moyens et techniques expérimentaux utilisés dans cette étude sont décrits

3.2 Substrat

Le matériau utilisé dans cette étude comme substrat est un acier de construction faiblement allié au chrome molybdène pour trempe et revenu. Bonne trempabilité à l'huile, bonne résistance aux surcharges à l'état traité.

le nom commercial populaire (Désignation 42CD4) Cette acier est choisie parce que il 'ytrès employé en mécanique, pour des pièces de moyennes à fortes sections : arbres, essieux, crémaillères, vilebrequins, bielles, engrenages.

Compositions chimique en % :

C	Cr	Mo	S	Mn	P	Si
0,38-0,45	0,90-1,20	0,15-0,30	$\leq 0,035$	0,60-0,90	$\leq 0,035$	0,4 max

Tableau 3.1 : représente la composition chimique d'acier 42cd4

3.3 Fabrications des éprouvettes

3.3.1 Découpage

La barre à été découpé à l'aide d'un scie semi-automatique



Figure 3.1 scie semi-automatique

3.3.2 Tour parallèle

L'usinage des éprouvettes a été fait à l'aide d'un tour parallèle d'axe au niveau d'atelier



Figure 3.2. tour parallèle

Plusieurs échantillons ont été utilisés dans le cadre de notre étude afin de réaliser la caractérisation métallurgique et de fatigue

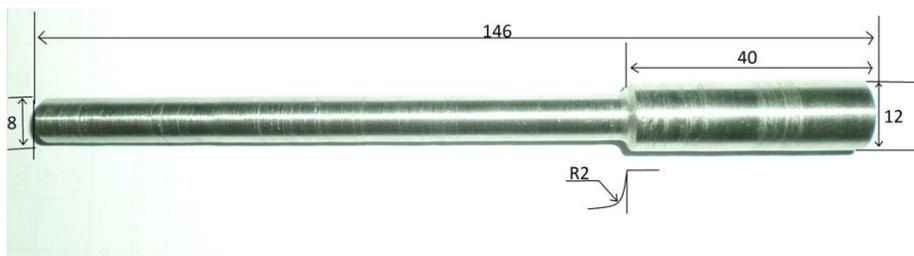


Figure 3.3 La forme de l'éprouvette de fatigue

3.4. Préparation des poudres

La poudre utilisée, ($1009+30\%Wc17Co$) dans le cadre de ce projet a été préparée à partir de deux poudres sélectionnées parmi celles disponibles au laboratoire LTSM, et ce pour leurs propriétés très intéressantes qu'elles disposent en terme de résistance à l'usure et à l'érosion. Aussi, on a utilisé une poudre qui est très utilisée en industrie (proxon 21031)

- Poudre nommée sous proxone 21031 selon désignation du producteur CastolinEutectic

Exemple d'applications : turbine à vapeur, turbine à gaz

Chapitre 3

- Poudre d'un alliage de carbures de tungstène avec 17% de cobalt
30% (WC17Co)+ 70% (10009 euttaloy)selon désignation du producteur
CastollinEutectic

Exemple d'applications : industrie militaire, les grandes machines

poudre	référence	Composition chimique	caractéristiques
Proxon	21031	(Ni-Al-Cr-Fer-Mo)	Résistances à la corrosion ahaut température 900 C°
sous couche d'accrochage	51000	(Ni-Al)	Lient de revêtement avec le substrat
10009 +30% wc17co	1009+30% wc17co	10009euttaloy : (Ni-Cr-B-SI-Fer)	-excellente résistance à l'abrasion et à l'érosion -Bonne résistance à la corrosion

Tableau 3.2 propriétés des poudres utilisé

Le poids des poudres a été mesuré à l'aide d'une balance électronique de marque OHAUS et de précision à 0.1 mg



Figure 3.4 Balance électronique

3.5 Préparation des éprouvettes

La préparation des éprouvettes a été faite avec un tour parallèle (tournage), elle consiste à une zone d'accrochage sous forme de filetage de profondeur de 0.2 mm plus une zone de rechargement sur une distance de 30 mm (Fig3.5).

Eprouvettes	filère d'accrochage (mm)	Profondeur de la zone de rechargement (mm)	Largeur de la zone de projection
Profondeur 0.3	0.2	0.3	30 mm
Profondeur 0.6	0.2	0.6	30 mm
Profondeur 0.9	0.2	0.9	30 mm

Tableau 3.3 préparation des éprouvettes

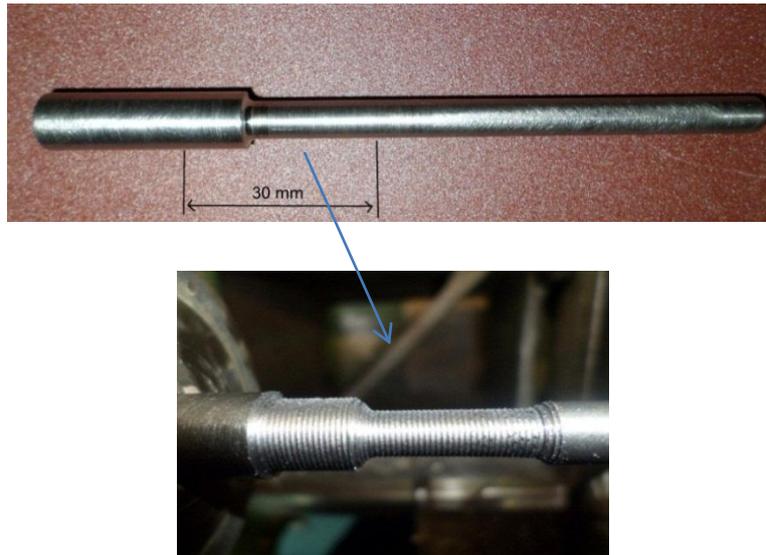


Figure 3.5 endroit de préparations

- Le nettoyage des pièces avant projection est nécessaire pour l'élimination de toute matière contaminante (graisse, huile, poussières, ...), dans notre cas on a utilisé pour le nettoyage de surfaces un solvant (diluant).
- Un près chauffage de pièce à été appliqué avant projection avec la torche à environ de 250 C°.

3.6 Projections thermique avec torche castodynDS 8000 :



Figure 3.6 torche castodyn ds8000

L'équipement de projection thermique oxyacétylénique castodynds 8000 il est conçu pour l'utilisation simple et rationnelle il permet de projeter grands catégorie d'alliages métalliques des cermets, des céramique et des plastiques.

Avantages

- Le pistolet est léger, robuste, mise en œuvre très pratique
- la sécurité et la facilité de réglage

Les essais préliminaires ont été faits avec une poudre 19300. Il s'agissait plutôt de nous familiariser à la technique de projection et en même temps de vérifier si on pouvait déposer un revêtement sur une pièce cylindrique.

Avant le montage de pièce l'endroit de travail a été bien nettoyé ainsi que tous les équipements utilisés lors de la projection d'abord à l'air comprimé puis avec un solvant de nettoyage.

Il est clair que le procédé de déposition lui-même n'aide pas à déposer facilement un revêtement uniforme sans déformation des éprouvettes, pour éviter ces derniers nous avons utilisé une pointe de centrage.

3.7 Usinage et rectifications des éprouvettes avec revêtements

Après la projection thermique le revêtement est étalé sur toute l'éprouvette et donc nécessite de faire un chariotage pour le dépôt 21031 et la rectification pour le dépôt 1009+30%WC17Co car sa dureté est élevée.

Le temps de rectification d'une seule éprouvette avec un dépôt 1009+30%WC17Co est environ de deux à trois heures.



Figure 3.7 Rectifieuse

3.8 Mesured'épaisseur

Après projection thermique, les mesures d'épaisseur ont été prises avec l'appareil à ultrasons le Positest DFT montré à la figure.



Figure 3.8 appareil de mesure des couches de revêtement

3.9 Le calcul de rugosité

La rugosité est une grandeur permettant de caractériser l'état micro géométrique d'une surface. Nous avons calculé la rugosité de chaque éprouvette à l'aide d'un rugosimètre



Figure 3.9Rugosimètre.

3.10 Machine d'essais de fatigue

Les essais de fatigue en flexion rotative ont été effectués au niveau du laboratoire de fiabilité des équipements pétrolier et matériaux à l'université M'Hamed Bougara. Cette machine tourne avec une vitesse de rotation constante de 2800 tours/min, sa fréquence est 50HZ et sa charge maximale de 300 N.



Régulateur de charge



Détecteur du nombre de cycle



L'emplacement de l'éprouvette



Figure 3.10 machine de fatigue série WP 140

3.11 Étude métallographique

3.11.1 Découpage par Micro tronçonneuse

On a utilisé un micro tronçonneuse de marque isomet 1000(voir figure 3.11) pour découper des petits échantillons pour l'enrober



Figure 3.11 micro tronçonneuse

L'étude métallographique sert à préparer nos échantillons afin de visualiser la microstructure au microscope optique.

3.11.2 Enrobeuse

L'enrobeuse permet d'enrober les échantillons dans une résine thermodurcissable afin de mieux les manipuler durant l'opération de polissage. La figure montre une photo de l'enrobeuse de marque STRUERS utilisée.



Figure 3.12 Enrobeuse

3.11.3 Polisseuse

La polisseuse a pour but d'éliminer l'irrégularité de surface et donne une surface plus ou moins lisse, étape préliminaire avant le polissage final à la pâte de diamant. La polisseuse utilisée est montrée dans la figure 3.13.



Figure 3.13 polisseuse

3.11.4 Polisseuse de finition

Afin de donner à nos échantillons un effet miroir, on utilise une polisseuse de finition avec une pâte diamantée de 1.0 μm et 0.05 μm . La figure 3.14 montre la polisseuse de finition utilisée dans le laboratoire aéronautique.



Figure 3.14 Polisseuse de finition

3.11.5 Séchoir

Après utilisation de la polisseuse de finition la poudre d'alumine s'accroche au-dessus de l'échantillon, alors faut un rinçage et pour le sécher on a utilisé un séchoir ordinaire (voir figure 3.15)



Figure 3.15 Séchoir

3.11.6 Microscope optique

Le microscope qui se trouve dans notre laboratoire est équipé de quatre objectifs d'agrandissement de 20X jusqu'à 100X, un oculaire de 10X (alors si on est en train de voir avec un objectif de 20X accouplé à l'oculaire de 10X alors l'agrandissement de la microstructure est de 200X). La figure montre le microscope optique de marque Carl Zeiss à plateau inversé. Il est équipé d'un appareil photo numérique afin de photographier les microstructures obtenues.



Figure 3.16 microscope optique

3.12 L'essai de micro dureté

Les mesure été effectués au niveau de La base centrale logistique BCL-BLIDA benimered. L'essai de la micro dureté permet de mesurer la dureté des couches minces ou superficielles, les couches déposées par projection thermique.dans notre cas les profils de la micro dureté sont pris sur une coupe transversale sous une charge 100 g



Figure 3.17 Microduromètre

3.13L'essai de dureté

La dureté est un paramètre permettant de caractériser les matériaux. Il existe plusieurs manières de déterminer la dureté d'un matériau dont certaines font l'objet d'une norme précise. Dans notre cas l'essai de la dureté a été effectué avec un duromètre au niveau de laboratoire LTSM Blida.



Figure 3.18 duromètre

3.14 La macrographie

Nous avons effectué la macrographie à l'aide d'un appareil à photo



Figure 3.19 appareil a photo numérique

Chapitre 4

Résultats et Interprétations

4.1 Introductions

Dans ce chapitre nous présenterons les principaux résultats obtenus dans cette étude. Les commentaires et les interprétations seront donnés pour chaque étape.

4.2 Projections thermique

Les paramètres de projection utilisés lors de la projection thermique par la Castodyn8000 sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Paramètres	Poudres 21031	Poudre 1009+30%wc17co
Pression d'oxygène	0.4 bar	0.4 bar
Pression d'acétylène	0.7 bar	0.7 bar
Distance de projections	15 cm	10 cm
Vitesse de rotation de pièce	630 tr/ min	630 tr/ min

Tableau 4.1 Paramètres de la projection

Après plusieurs essais préliminaires, nous avons réussi à projeter des dépôts des alliages de deux poudres 21031 Proxone et un mélange de 10009+30 %WC 17Co sur des éprouvettes de fatigue. L'image ci-dessous montre une éprouvette finie après projection et usinage de finition.

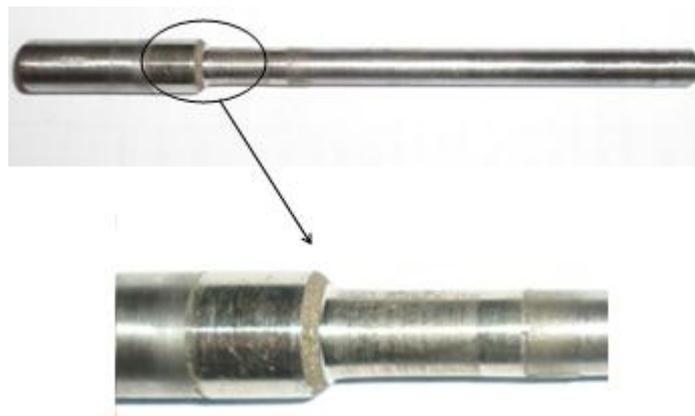


Figure 4.1 : Eprouvette de fatigue avec revêtement après usinage

Nous avons constaté que l'usinage de finition a été facile par un outil en carbure pour les dépôts de 21031, alors il a été très difficile pour le deuxième dépôt (10009+30 %WC 17Co) où

Chapitre 4

nous étions obligé de passer à la rectification cylindrique, ce que donne une indication sur la dureté



Figure 4.2 Eprouvettes projetés avec la poudre 21031



Figure 4.3 Eprouvettes projetés avec la poudre 1009+30% WC17Co

4.2.1 Propriétés d'éprouvettes projetées :

Après projection thermique et usinage de finition nous avons mesuré les diamètres finals au fond d'entaille et les épaisseurs des revêtements, les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

- Poudre 21031

Profondeur	0.3		0.6		0.9	
Eprouvettes	1	2	1	2	1	2
Epaisseur revêtements (µm)	404	510	688.66	642	672	862.16
Diamètre avec revêtements (mm)	8.2	8.4	8.2	8.3	7.95	8.4

Tableau 4.2 Diamètre avec revêtements et épaisseurs des dépôts 21031

- Poudre 1009 + 30% WC17Co

Profondeur	0.3		0.6	0.9		
Eprouvettes	1	2	1	1	2	3
Epaisseur revêtements + sous couche (µm)	403.16	446	469	411.83	661	580
Diamètre avec revêtements (mm)	8.2	8.5	8.2	8	7.95	8.1

Tableau 4.3 Diamètre avec revêtements et épaisseurs des dépôts 1009+30%(WC17Co).

Les épaisseurs moyennes des revêtements ont été calculées à partir de 6 mesures d'épaisseur effectuées dans des zones différentes de l'éprouvette et cela pour chaque dépôt.

4.3 Etude métallographique

Après une bonne préparation métallographie, nous avons passé à l'observation au microscope optique. Les micrographies optiques obtenues pour les deux revêtements, et ce à différentes échelles sont présentées ci-dessous.

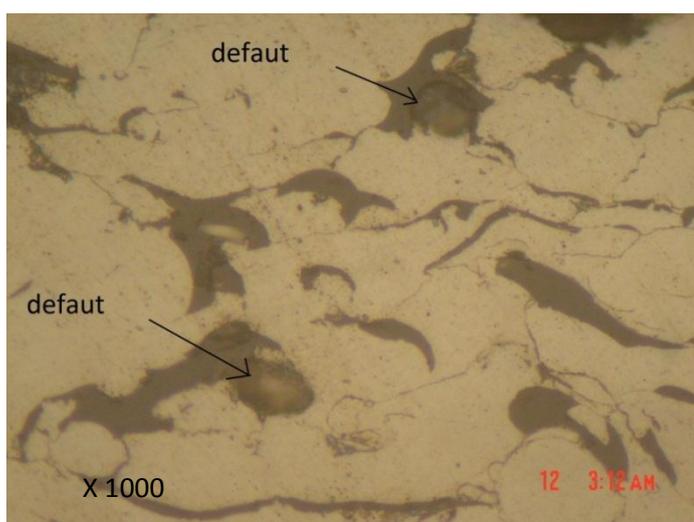
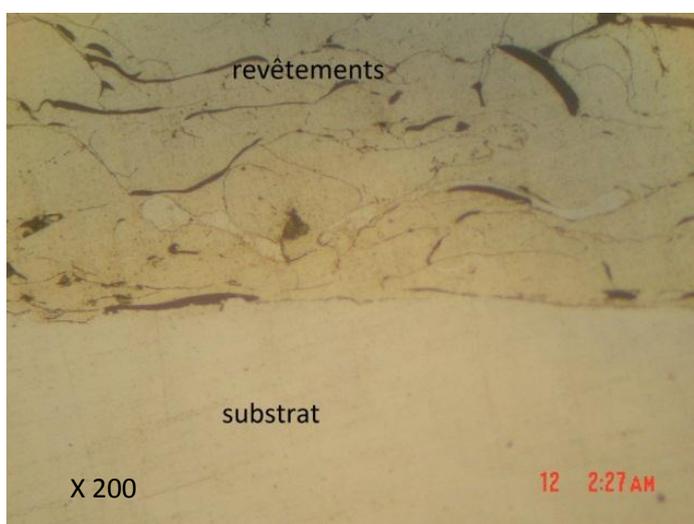
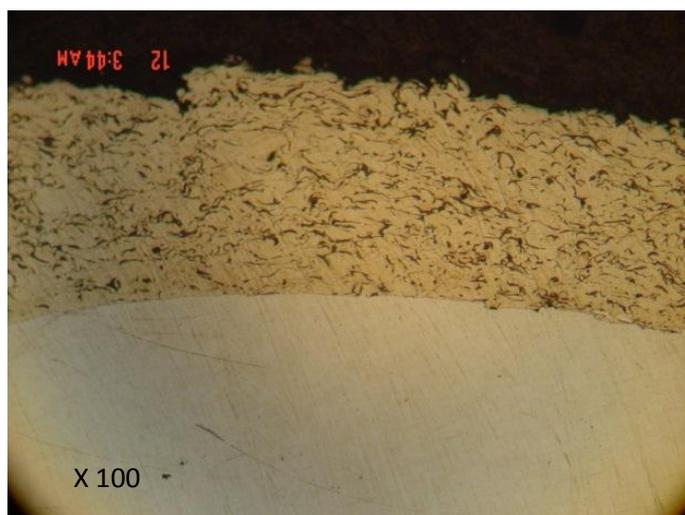


Figure 4.4 dépôts 21031

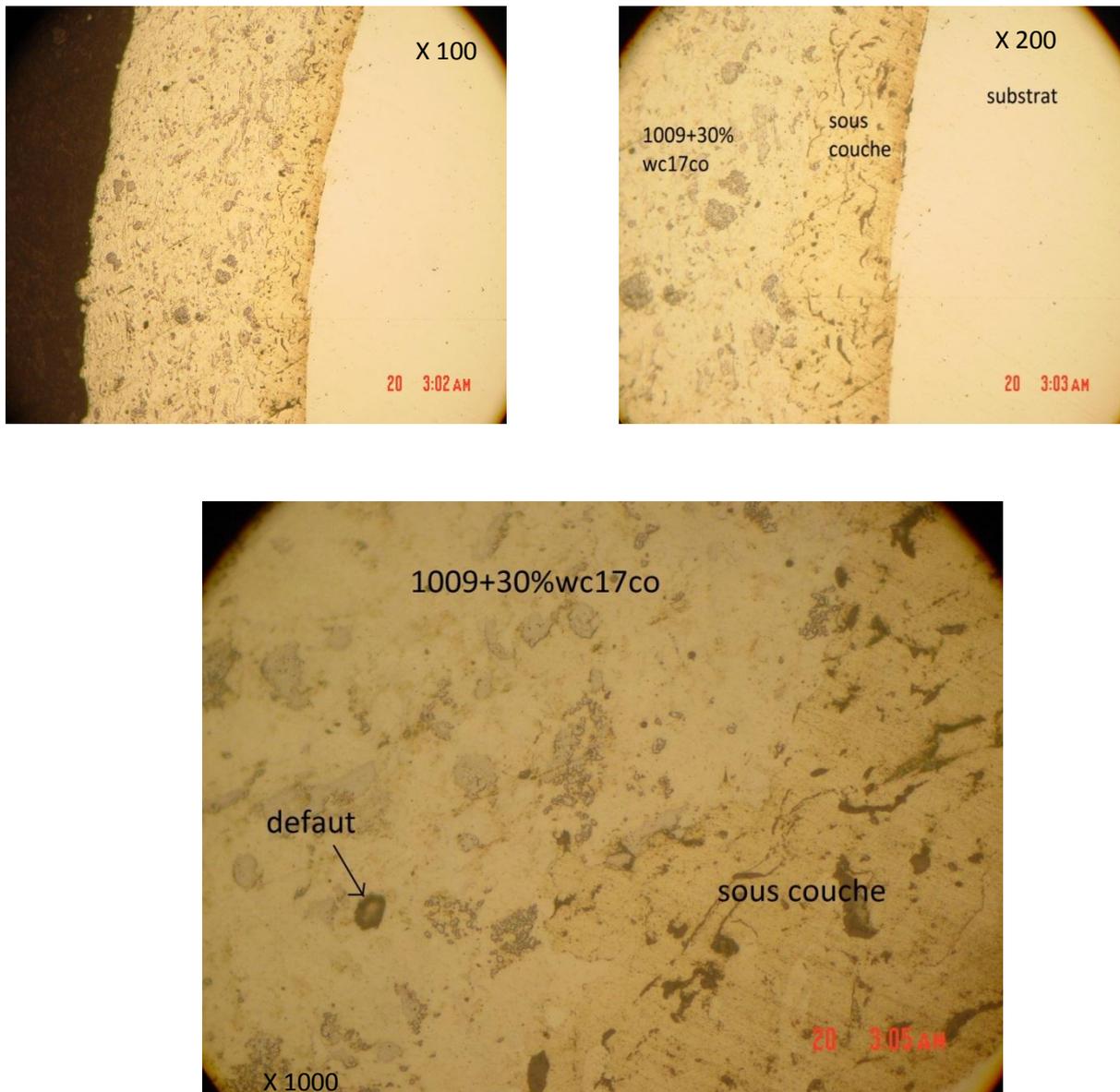


Figure 4.5 dépôts 1009 + 30% WC17Co

D'après ces micrographies:

- Un bon encrage mécanique des revêtements sur le substrat, tel que nous n'avons pas constaté la présence des défauts ni des porosités, ni les délaminages à cet endroit, ce qui est un indice de bonne adhésion des revêtements.
- La répartition de deux types de dépôts le long des substrats semble être homogène et l'épaisseur est presque uniforme.
- On remarque la présence de certains défauts dans deux dépôts que nous considérons à des oxydes liés aux conditions de projections.
- les revêtements sont constituées des lamelles qui se superposent les unes sur les autres.

4.4. Micro dureté

Les mesures de micro dureté Vickers HV ont été effectuées sur une coupe transversale sous une charge 100 g. Pour avoir un bon profil de la micro dureté nous avons pris sept points pour le dépôt 21031 et neuf points pour le dépôt 1009+30% WC17Co avec un pas de 5 centièmes de mm (50µm) en allant du substrat vers le dépôt, Les résultats sont présentés dans les Figures 4.7 et 4.8.

❖ 1^{er} échantillon dépôts 21031 :

Endroits de l’empreinte	Diamètre de l’empreinte (µm)	Dureté Vickers
Substrat	21	420.5
Substrat	22	388.3
Substrat	23	350.5
Interfaces	24	321.9
Dépôt 21031	23	350.5
Dépôt 21031	22.5	369.9
Dépôt 21031	22.8	359

❖ 2eme échantillon 1009 + 30% WC17Co

Endroits de l’empreinte	Diamètre de l’empreinte (µm)	Dureté Vickers
Substrat	21.1	416.5
Substrat	21	420
Substrat	23	350.5
Interface	23.1	350.8

Chapitre 4

Sous couche 51000	26	274.7
Sous couche 51000	25.4	289
Dépôt 1009 + 30% WC17Co	16	724
Dépôts 1009 + 30% WC17Co	15	824.2
Dépôts 1009 + 30% WC17Co	15.4	792.2

Tableau 4.4 Microdureté des revêtements

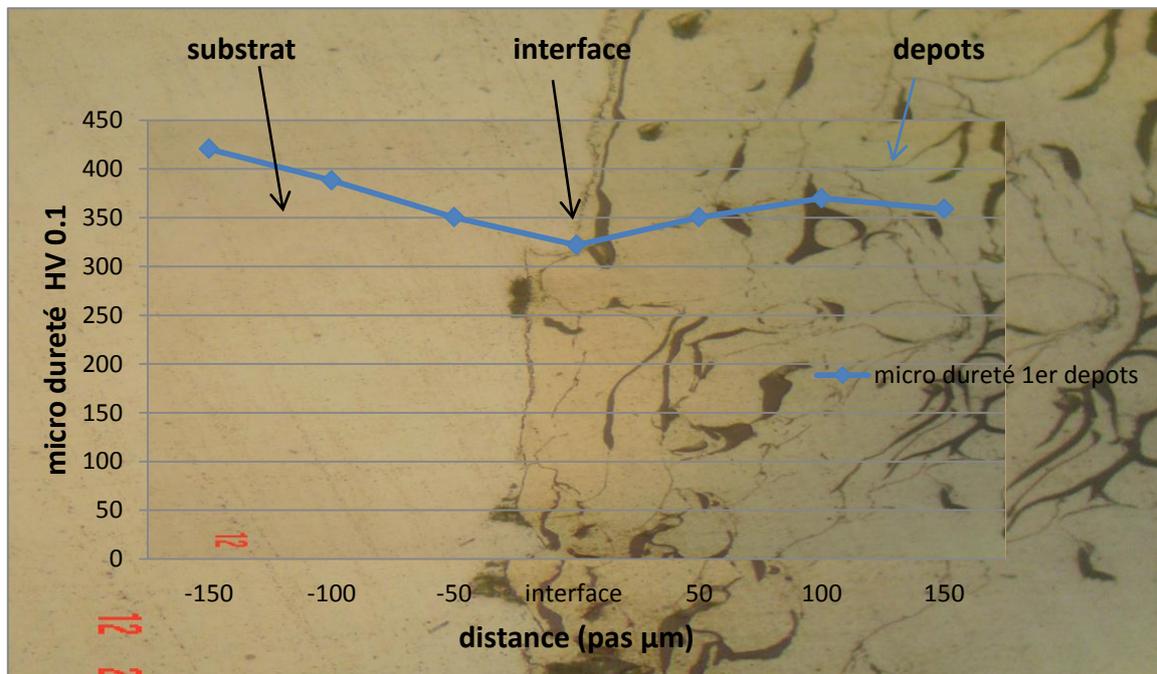


Figure 4.6 Courbe de Micro dureté de revêtements 21031

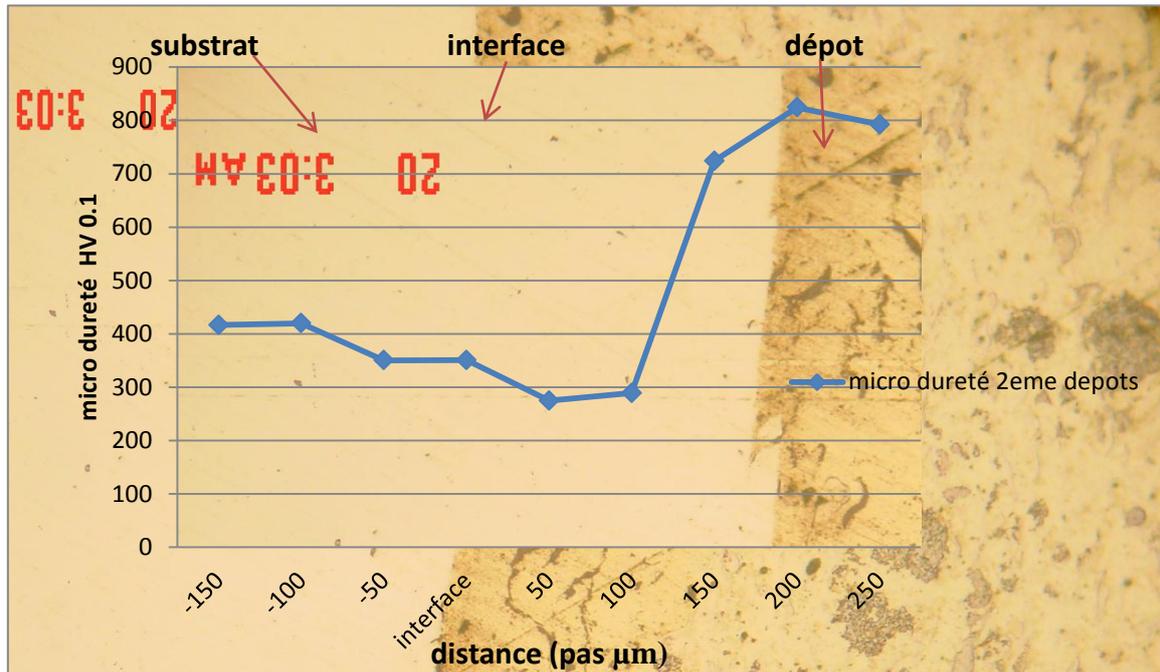


Figure 4.7 courbe de Micro dureté de dépôts 1009+30%wc17co

D'après ces résultats :

- On constate dans le même dépôt des variations de la dureté relativement à l'endroit les phases en présence, au substrat la dureté est vers 400 Hv, pour la couche d'accrochage est proche de 300 Hv et ce pour les deux revêtements, alors que dans les revêtements proprement dites, la dureté est de 350 Hv dans le premier et vers 800Hv dans le deuxième.
- Le revêtement 1009+30%WC17Co présente une dureté très élevée par rapport à la 21023
- On remarque aussi que la dureté du substrat diminue à l'interface, ce qui due à affectation par l'apport de chaleur lors de la projection thermique.

4.5 Résultats de la rugosité (Ra)

Les tests de rugosités des revêtements ont été effectués sur 2 endroits différents pour chaque éprouvette, la rugosité est pris en calculant la moyenne, les résultats sont représentés dans le tableau si dessous :

❖ Dépôts 21031

Profondeur	0.3		0.6		0.9	
éprouvettes	1	2	1	2	1	2
Rugosité	4.01	2.89	2.03	2.37	1.51	2.8

❖ Dépôts 1009+30%wc17co

Profondeur	0.3		0.6	0.9		
éprouvettes	1	2	1	1	2	3
Rugosité	20	6.96	2.44	0.85	3.55	>20

Tableau 4.5 Résultats des essais rugosité

4.6 La dureté superficielle HS 30N

Les résultats d'essais de dureté superficielle de deuxième dépôt sont donnés dans le tableau suivant :

Profondeur	0.9		
Eprouvettes	1	2	3
Eprouvettes avec revêtements 1009+30% WC17Co	47.4	48	50.3

Tableau 4.6 Dureté du dépôt 1009+30% WC17Co

4.7 Comportement en fatigue

Selon l'équation (6) chapitre 2, la contrainte alternée en cas fatigue en flexion rotative est

$$\sigma_a = \frac{32.F.a}{\pi d^3}$$

Dans notre cas, selon la machine d'essai sur laquelle nous avons réalisé nos essais de fatigue, les paramètres $a = 105 \text{ mm}$

Pour étudier le comportement en fatigue des revêtements que nous avons réalisés, et comme nous disposons un nombre limité des éprouvettes, nous avons sollicitées tous nos éprouvettes à la même contrainte alternée que nous avons fixé à 330 MPa. La détermination du nombre de cycle après rupture nous a permet de faire les comparaisons et de tirer les conclusions.

Les conditions d'essais de fatigue ainsi les résultats obtenus pour les éprouvettes brutes et les éprouvettes avec revêtements sont représentés ci-dessous, avec :

F : La force appliquée [Newton].

σ_a : La contrainte appliquée = 330 MPa

N : Le nombre de cycle.

Prf. Profondeur de rechargement

Chapitre 4

Dépôts	Prof. (mm)	Eprouvette Numéro	Diamètre (mm)	Force applique (N)	N	Temps	Rugosité
Brute	Brute	Brute	7.9	150	$20,0228 \cdot 10^4$	1h6min	2.06
21031	0.3	1	8.2	170	$6,6980 \cdot 10^4$	22min19s	4.01
	0.3	2	8.4	182.8	$7,9708 \cdot 10^4$	26min34s	2.89
	0.6	1	8.2	170	$1,8309 \cdot 10^4$	6min6s	2.03
	0.6	2	8.3	176	$4,284 \cdot 10^4$	14min14s	2.37
	0.9	1	7.95	155	$3,6806 \cdot 10^4$	12min17s	1.51
	0.9	2	8.4	182	$2,71 \cdot 10^4$	9min1s	2.8

Tableau 4.7 résultat d'essais de fatigue pour le dépôt 21031

Dépôts	Prof (mm)	Eprouvette Numéro	Diamètre (mm)	Force applique (N)	N	Temps	Rugosité
1009	0.3	1	8.2	170	$1,3534 \cdot 10^4$	4min25s	20
+ 30%	0.3	2	8.5	189	$4,4907 \cdot 10^4$	14min48s	6.96
WC17Co	0.9	1	8	165	$1,1139 \cdot 10^4$	3min35s	0.85
	0.9	2	7.95	155	$0,7410 \cdot 10^4$	2min23s	3.55
	0.9	3	8.1	167	$0,4249 \cdot 10^4$	1min20s	>20

Tableau 4.8 Résultat d'essais de fatigue pour les dépôts 1009 + 30% WC17Co

La durée de vie des revêtements en fonction de la profondeur de rechargement est présentée dans les figures ci-dessous :

❖ Poudre 21031 :

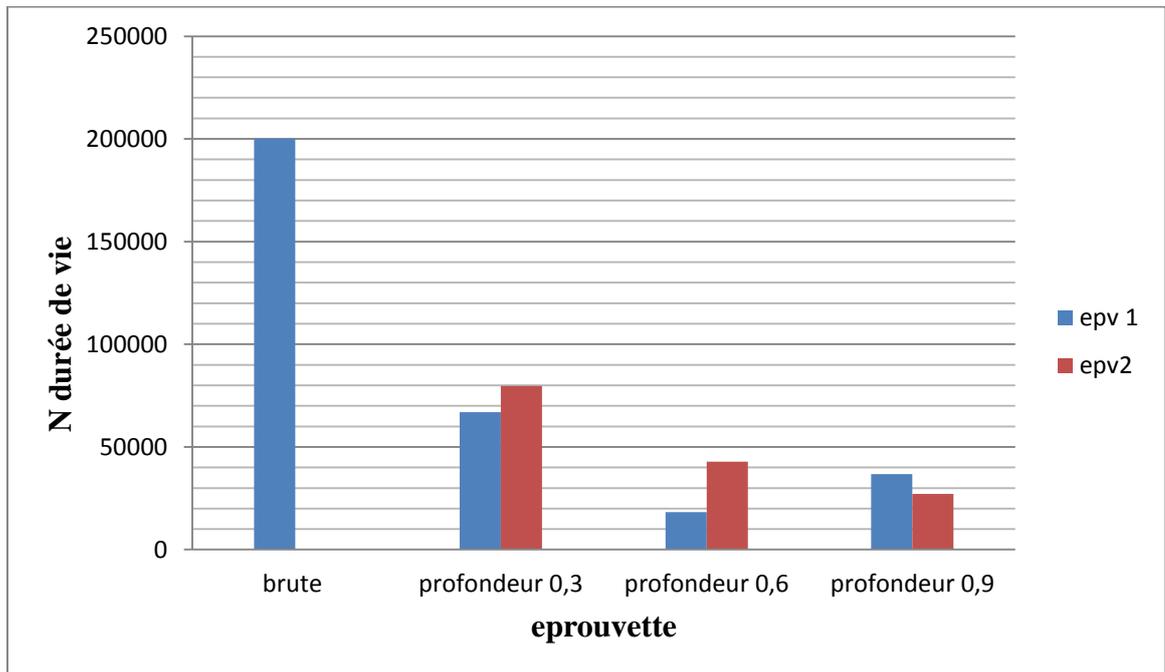


Figure 4.8 histogramme la durée de vie des éprouvettes avec revêtements 21031

D'après cette histogramme on constate que :

- L'éprouvette brute (sans revêtement) présente une durée vie très supérieur par rapport aux éprouvettes avec revêtements.
- La durée de vie diminue lorsque la profondeur de rechargement et l'épaisseur augmente
- On comparaison avec les résultats de rugosité du tableau 4.7, la durée de vie diminue avec l'augmentation de la rugosité.

❖ Comparaison des revêtements des deux poudres :

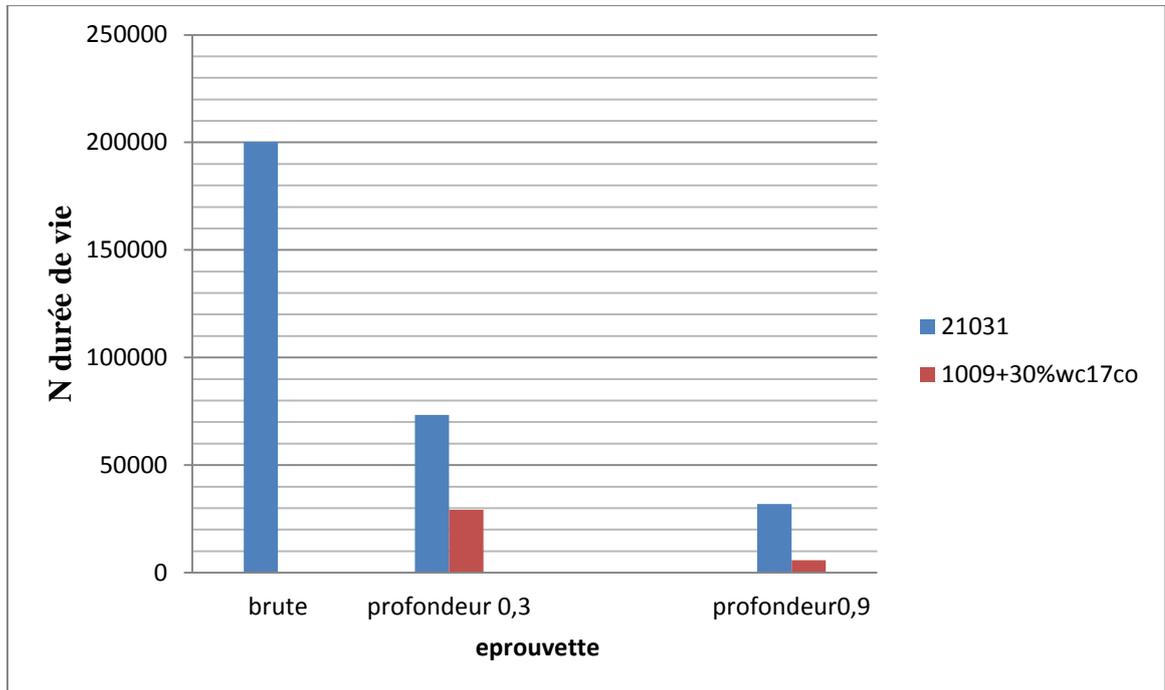


Figure 4.9 Durée de vie moyenne des éprouvettes avec revêtements

À partir de l'histogramme, il est intéressant de noter :

- Que la durée de vie des dépôts 21031 est supérieure à celles des dépôts 1009+30%WC17Co, cela est expliqué par la dureté importante des dépôts de la 1009+30%WC17Co avec les dépôts 21031
- On peut aussi noter que lorsqu'on augmente la profondeur de rechargement la durée de vie diminue cela est valable pour les deux dépôts.
- La pièce brute présente la meilleure durée de vie.

❖ **Histogramme des éprouvettes avec une profondeur 0.9 dépôts 1009+30%WC17Co**

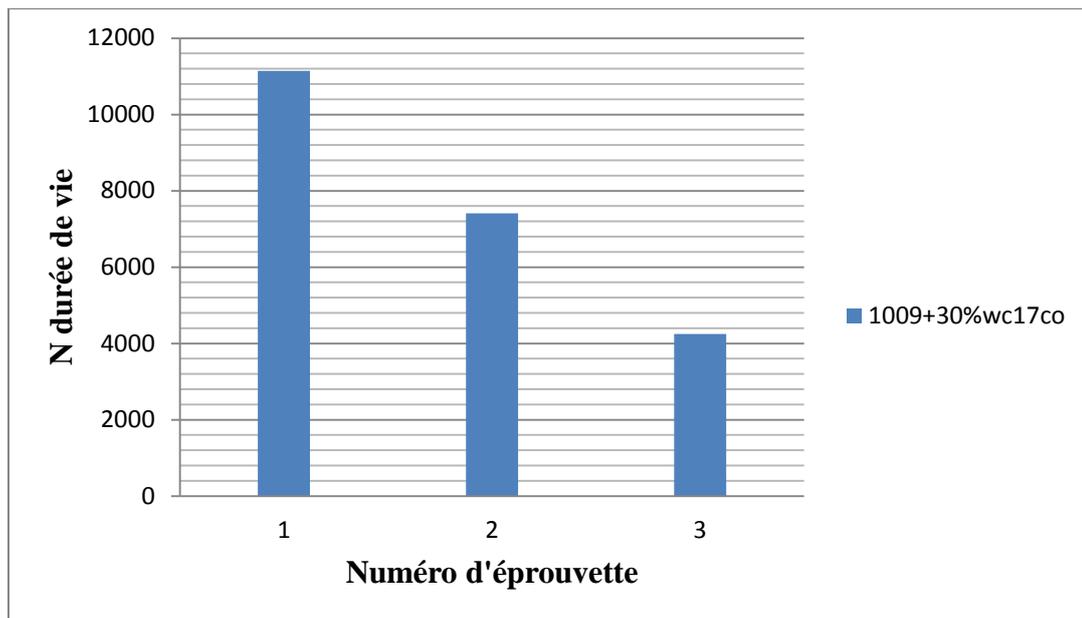


Figure 4.10 Durée de vie du dépôt 1009+30%WC17Co, Prf. 0.9

- D'après ce résultat, et en prenant en compte les résultats des tableaux 4.6 et 4.8 et en conclure que lorsque la rugosité et la dureté augmentent la durée de vie diminue.

4.8 Faciès de rupture :

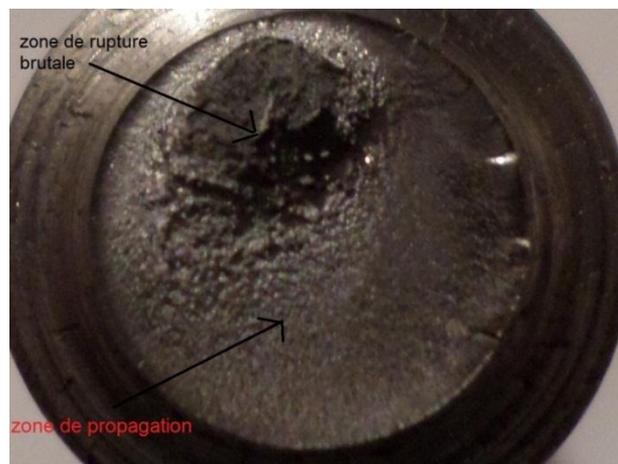


Figure 4.11 Rupture par fatigue de l'éprouvette brute

La fractographie macroscopique de faciès de rupture de l'éprouvette brute illustre bien les différentes zones de fatigue, à savoir, la zone de propagation progressive ainsi que la zone de rupture brutale.



Figure 4.12 rupture par fatigue d'une éprouvette avec revêtements 1009+30%WC17CO
Profondeur 0.3 mm

On a un amorçage multiple plusieurs zones d'initiations pour cette éprouvette la zone de rupture brutale et bien clair aspect a grain



Figure 4.13 rupture par fatigue d'une éprouvette avec revêtements 1009+30%~WC17CO
profondeur 0.9 mm

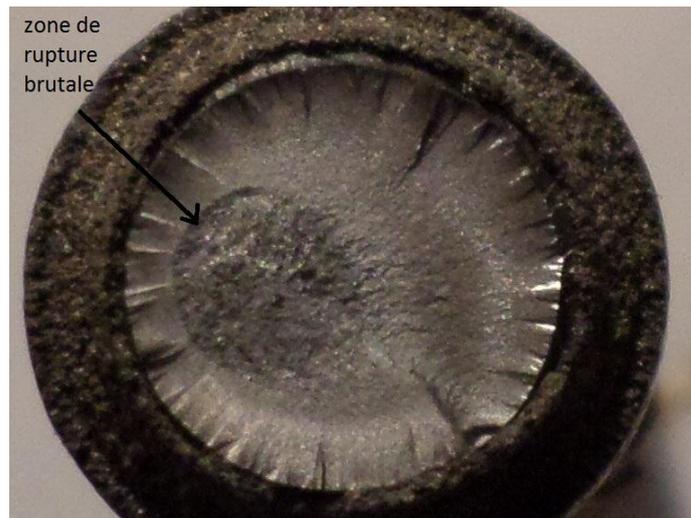


Figure 4.14 rupture par fatigue d'une éprouvette avec revêtements 21031 profondeur 0.3 mm

En remarque que la zone d'amorçage est multiple, plusieurs zone d'initiations et la zone de propagation a un aspect lisse et la zone de rupture brutale a un aspect a grain

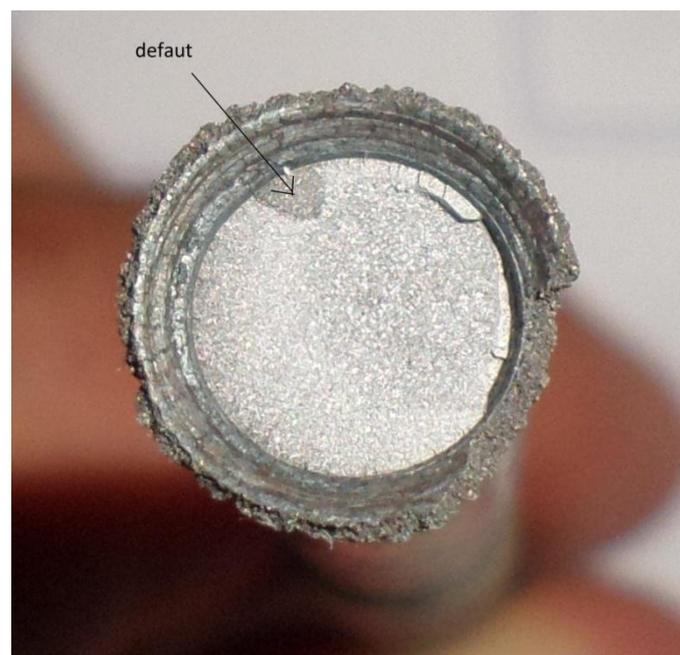


Figure 4.15 rupture par fatigue d'une éprouvette avec revêtement 21031 profondeur 0.6 mm

Le faciès de rupture de cette éprouvette (epv 1 avec revêtement 21031 profondeur 0.6) montre l'existence d'un défaut qui a accéléré l'amorçage et la rupture brutale suite de la concentration de contrainte autour du défaut ce qui concorde bien avec la durée de vie obtenue (4 fois moins que la celle sans défaut).



Figure 4.16 rupture par fatigue d'une éprouvette avec revêtements 21031 profondeur 0.9 mm

Conclusion générale

La projection thermique tient un rôle important dans les industries de la mécanique comme la plupart des procédés de traitement de surface. C'est un moyen d'améliorer les propriétés de surface des matériaux pour résister à un besoin spécifique comme par exemple la tenue à l'usure, à la corrosion et à l'érosion. Le comportement en fatigue de ces pièces et de ces structures après revêtement est mal connu et reste à déterminer.

Dans ce cadre, nous avons réalisé des revêtements par projection thermique à la flamme. Trois types de poudres largement utilisés dans l'industrie mécanique ont été projetés par la torche Castodyn DS8000 pour étudier leurs comportements en fatigue par des essais de fatigue en flexion rotative.

Les résultats de cette recherche ont montré que

- Les pièces avec revêtement ont des durées de vie inférieures à celles des pièces brutes.
- La durée de vie des dépôts 21031 est supérieure à celles des dépôts 1009+30%WC17Co.
- On peut aussi noter que lorsqu'on augmente la profondeur de rechargement la durée de vie diminue cela est valable pour les deux dépôts.
- La durée de vie diminue avec l'augmentation de la rugosité du revêtement.
- L'existence des défauts accélère l'amorçage et fait chuter la durée de vie.

Référence bibliographique

- [1] Verdy C., “Structures multicouches mises en forme par projection thermique: élaboration, caractérisation et applications”, Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Sévenans, Université de technologie de Belfort-Montbéliard, 1998
- [2] Lech Pawlowski, *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*, Wiley, 1st edition, Chichester, England,
- [3] Yamina MEBDOUA ; Etude Numérique des Phénomènes Thermiques Contrôlant la Solidification d'une Lamelle en Projection Thermique : Application à la Formation du dépôt (Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'université de LIMOGES) (août 2008).
- [4] A. PRONER ; M1645 revêtement par projection thermique (technique de l'ingénieur) 2005.
- [5] [CPRJ69] R. Cazaud, G. Pomey, P. Rabbe, and C. Janssen. La fatigue des métaux. Dunod, 1969. http://www.academia.edu/4553147/M%C3%A9thodes_de_caract%C3%A9risation_m%C3%A9canique_des_mat%C3%A9riaux
- [6] <https://www-techniques-ingenieur-fr.www.snd11.arn.dz/base-documentaire/materiaux-th11/essais-mecaniques-sur-les-metaux-et-alliages-42531210/essais-de-fatigue-m4170/>
- [7] « campus-douai.gemtech.fr/mod/resource/view.php?id=3544 » FATIGUE - ENDURANCE. Claude ROBIN. Ecole des Mines de Douai
- [8] Verdy C., “Structures multicouches mises en forme par projection thermique: élaboration, caractérisation et applications”, Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Sévenans, Université de technologie de Belfort-Montbéliard, 1998
- [9] <http://guillaume.speurt.free.fr/telechargements/Materiaux/MAT%20-%20Fatigue%20Des%20Materiaux%20%28Supmeca3%29.pdf>
- [10] Données Technologiques sur la fatigue Publications CETIM A. BRAND - J.F. FLAVENOT - R. GREGOIRE - C. TOURNIER 1992
- [11] <http://www.surfatec.org>.

[12] Comportement en fatigue de pièces épaisses en matériaux Composites École doctorale nO432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur Doctorat ParisTech T H È S E pour obtenir le grade de docteur délivré par l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris Spécialité « Sciences et Génie des Matériaux » par Nicolas REVEST le 14 novembre 2011