

UNIVERSITE SAAD DAHLAB - BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Science des matériaux

Thème

**ETUDE DES PROPRIETES STRUCTURALES, MECANQUES, ET
TRIBOLOGIQUES DES REVÊTEMENTS DE TRIBALOY[®]-400
ÉLABORÉS À LA FLAMME SUPERSONIQUE "HVOF"**

Par

BADAOUI Ouassila

Devant le jury composé de

M^f M. Hadji
M^f A. KELLOU
M^f A. BRAHIMI
M^f T. SAHRAOUI

Professeur, U. de Blida
Maître de Conférence, USTHB
Chargé de cours, U. de Blida
Maître de Conférence, U. de Blida

Président
Examineur
Examineur
Rapporteur

Blida, Juin 2006

RESUME

Les revêtements de tribaloy[®]-400 sont largement utilisés pour les pièces de turbine à gaz dans les domaines aéronautique et aérospatial. Les dépôts élaborés par projection thermique ont une excellente résistance à l'usure, une bonne résistance à la corrosion et une résistance moyenne à l'oxydation à haute température. En particulier, ils sont très utiles pour les pièces dont la lubrification est insuffisante ou inexistante. Dans le présent travail nous nous proposons d'élaborer par projection thermique à la flamme supersonique HVOF des revêtements de tribaloy[®]-400 de caractériser leur microstructure et de discuter les corrélations avec les propriétés mécaniques et tribologiques.

Les microstructures des dépôts ont été examinées par microscopie optique et microscopie électronique. Le taux de porosité et l'épaisseur des revêtements ont été déterminés par un logiciel de traitement d'image "Scion image". La diffraction par rayon X a été effectuée pour analyser les transformations de phases dans le matériau après la projection. Une analyse chimique par spectroscopie dispersive en énergie (SDE) a été effectuée avant et après projection.

Pour évaluer la tenue à l'usure des dépôts on a procédé à des essais de roulement de type Amsler A135. Des méthodes d'essais non destructives CND (courant de Foucault et les ultrasons) ont été employées pour la caractérisation de la qualité de surface et l'adhérence des revêtements.

Les résultats du présent travail nous ont mené à dire que la projection thermique à la flamme supersonique a permis d'obtenir des dépôts denses et durs avec des taux de porosité relativement faible

ABSTRACT

HVOF tribaloy[®]-400 coatings are widely used in gas turbine part repair, in aeronautics and aerospace industries.

The produced Coatings produced have an excellent wear and corrosion resistance. They are very useful when lubrication is not sufficient or inexistent. The present work proposes to elaborate T-400 coatings using high velocity oxy fuel thermal spraying process, to characterize their macrostructures and to discuss the correlation with the mechanical properties and tribological properties.

The microstructures of coatings were analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and optical microscopy. Porosity of coatings was determined by Scion Image computer program. X-ray diffraction has been performed to analyze the phase transformation and identify phase composition of coating after spraying. Wear evaluation by Amsler machine. Non destructive testing (NDT) methods (eddy current, ultrasound) were used to adhesion and surface quality characterisation. Chemical analysis used to identify the chemical composition of coating. It was shown that the high velocity oxy fuel thermal spraying HVOF exhibit a good properties.

ملخص

عملية التلبس بالخليط المعدني التريبيلوي-400 هي عملية واسعة الاستعمال و بالأخص في تلبس قطع التوربينة الغازية- محرك ذو دولاب يدار بالغاز- المستخدمة في مجالات الطيران الجوي و الفضائي, إذا ما قمنا بهذه العملية باستخدام تقنية القذف الحراري فإننا نتحصل علي طبقات تلبس تتميز بمقاومة عالية ضد التلف الناتج عن الانزلاق و ضد التآكل و كذا مقاومة متوسطة ضد الأكسدة عند درجات الحرارة العالية. إن هذا النوع من التلبس يطبق بالخصوص علي القطع ذات التشحيم و التزبييت الناقص أو المنعدم. في عملنا هذا نحن بصدد القيام بتلبس عينات بالخليط المعدني التريبيلوي-400 مستخدمين في ذلك تقنية القذف الحراري ذو الشعلة ذات السرعة الفائقة الصوت, وبعدها دراسة البنية المجهرية لطبقات التلبس المتحصل عليها مع مناقشة مدي تأثير هذه البنية علي الخصائص الميكانيكية و التريبولوجية.

قمنا باستعمال المجهر الضوئي و الالكتروني و جهاز الأشعة السينية و التحليل الكيميائي و نظام لمعالجة الصور وكذلك طرق للمراقبة بدون إتلاف(تيار فوكو و الموجات فوق الصوتية) لتقييم الالتحام و حالة السطح مع تقييم للمقاومة ضد التلف بجهاز أمسلر.

من خلال هذا العمل تحصلنا على نتائج جد مرضية جعلتنا نستنتج مدى أهمية تقنية القذف الحراري ذو الشعلة ذات السرعة الفائقة الصوت في عملية التلبس بالخليط المعدني التريبيلوي-400 .

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Monsieur **T.SAHRAOUI**, qui a bien voulu diriger mon travail, qu'il veuille trouver ici l'assurance de ma profonde gratitude pour son aide précieuse qu'il m'a apportée tout au long de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à monsieur le professeur **M. HADJI**, Qu'il trouve ici l'expression de ma très vive gratitude pour m'avoir fait l'honneur, de participer au jury et d'en assurer la présidence.

Je prie Monsieur **A.KELLOU**, maître de conférence à l'USTHB, d'accepter mes sentiments respectueux et reconnaissants pour avoir bien voulu faire partie du jury.

Mes remerciements vont aussi à **A.BRAHIMI**, chargé de cours à l'université de Blida, qui a eu l'amabilité d'accepter d'être membre de jury, qu'il trouve ici l'expression de mes sincères reconnaissances.

A tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cet humble travail, un grand merci.

TABLE DES MATIERES

RESUME

REMERCIEMENTS

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

INTRODUCTION.....	12
1. LA PROJECTION THERMIQUE.....	14
1.1 Introduction	14
1.2 Principe général	16
1.2.1 Les matériaux	17
1.2.2 La chaleur	17
1.2.3 La vitesse	18
1.2.4 Le substrat (Nature, rugosité, température)	18
1.3 Caractéristiques générales des dépôts.....	18
1.3.1 Structure métallurgique.....	18
1.3.2 Adhérence.....	19
1.4 Présentation des différents procédés.....	19
1.4.1 Place de la projection thermique dans les traitements de surfaces	19
1.4.2 procédé existants.....	21
1.4.2.1 Projection à flamme.....	22
1.4.2.1.1 Projection flamme poudre	22
1.4.2.1.2 Projection à flamme fils, cordons ou baguettes.....	26
1.4.2.2 Projection thermique à l'arc électrique.....	27
1.4.2.2.1 Pistolet à Arc électrique entre deux fils	27
1.4.2.2.2 Pistolet plasma	28
1.4.3 Les différents procédés de type HVOF.....	29
1.4.3.1 Les procédés à détonation.....	29
1.4.3.2 Les procédés à déflagration	30
1.4.4 Les poudres et leurs applications	33

1.4.4.1. Revêtement contre l'usure.....	33
1.4.4.2. Revêtement contre la corrosion.....	33
1.4.4.3. Les poudres à base de superalliages.....	34
1.4.4.3.1 Les poudres a base de cobalt.....	34
2. LA TRIBOLOGIE.....	36
2.1 Introduction.....	36
2.2 La tribologie	36
2.2.1 Le frottement	38
2.2.1.1 Le frottement statique	38
2.2.1.2 Le frottement dynamique.....	39
2.2.2 L'usure	41
2.2.2.1 L'usure par adhérence	42
2.2.2.2 L'usure par abrasion.....	42
2.2.2.3 L'usure par fatigue	44
2.2.2.4 L'usure par érosion.....	45
2.2.2.5 L'usure par fretting.....	45
2.2.2.6 L'usure tribochimique	45
2.2.3 La lubrification.....	46
3. LE CONTROLE NON DESTRUCTIF.....	48
3.1 Définition	48
3.2 Contrôle non destructif par courant de Foucault.....	49
3.2.1 Principe.....	49
3.2.2 Les lois de Maxwell	49
3.2.3 La repartition et la profondeur des courants de Foucault	50
3.2.4 Principaux paramètres d'influence.....	53
3.2.5 Avantages, inconvénients et domaines d'application	54
3.3 Contrôle non destructif par ultrason.....	55
3.3.1 Types d'ondes.....	55
3.3.1.1 Les ondes longitudinales.....	55
3.3.1.2 Les ondes transversales.....	56
3.3.1.3 Les ondes de surfaces	56

3.3.2 Impédance acoustique	57
3.3.2.1 Réflexion et transmission sous incidence normales.....	57
3.2.2 Réflexion et transmission sous incidence oblique phénomène.....	58
3.3.3 Atténuation des ondes ultrasonores	59
3.3.3.1 L'absorption	59
3.3.3.2 La diffusion.....	60
3.3.4 Techniques de contrôle ultrasonore.....	60
3.3.4.1 Contrôle par contact.....	61
3.3.4.2 Contrôle en immersion.....	61
4. PARTIE EXPERIMENTALE.....	62
4.1 Introduction	62
4.2 Elaboration du revêtement.....	62
4.2.1 Choix des substrats.....	62
4.2.2 Préparation des substrats.....	65
4.2.2.1 Nettoyage des substrats.....	65
4.2.2.2. Sablage des échantillons.....	65
4.2.3 Poudre utilisées pour la projection.....	66
4.2.3.1 Etuvage et mélange des poudres.....	66
4.2.4 Elaboration des revêtements à la flamme supersonique HVOF.....	67
4.3 Techniques d'analyse et de caractérisation des dépôts	69
4.3.1 Préparation métallographie.....	69
4.3.2 Diffraction des rayons X.....	69
4.3.3 Microscopie optique et analyse d'image	70
4.3.3.1 Calcul d'épaisseur	74
4.3.4 Microscopie électronique à balayage.....	76
4.3.5 Micro dureté.....	76
4.3.6 Adhérence	76
4.3.7 Essais de frottement et d'usure des dépôts.....	77
4.3.8 Contrôle non destructif.....	79
4.3.8.1 contrôles non destructifs par courant de Foucault.....	79
4.3.8.2 Contrôle non destructif par ultrason.....	79
5. RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	82

5.1 Caractérisations chimiques et microstructurales.....	82
5.1.1 Le tribaloy [®] -400	82
5.1.2 Analyse chimique	83
5.1.3 Analyse diffractométrique.....	85
5.1.4 Analyse Microstructurale.....	87
5.1.5 Microdureté.....	91
5.1.6 Porosité.....	91
5.1.7 Adhérence de dépôt.....	91
5.2. Essais sur le tribomètre.....	93
5.3 Contrôle non destructif	97
5.3.1 Contrôle non destructif par courant de Foucault.....	97
5.3.2 Contrôle non destructif par ultrason	99
CONCLUSION.....	102
REFERENCES.....	
APPENDICES ET NOMENCLATURES.....	

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure	Page
Figure 1.1 Schoop et sa première installation de projection thermique En 1914	14
Figure 1.2 Repères historiques de la projection thermique	15
Figure 1.3 Principe de la projection thermique	16
Figure 1.4 Place de la projection thermique dans les traitements de surface	20
Figure 1.5 Principaux constituants d'une installation technique	22
Figure 1.6 Schéma de principe d'un pistolet flamme poudre	23
Figure 1.7 Pistolet à poudre subsonique	24
Figure 1.8 Schéma de principe d'un pistolet HVOF	25
Figure 1.9 Schéma de principe d'un canon à détonation	26
Figure 1.10 section du pistolet a projection a flamme pour Cordon fils et baguette	27
Figure 1.11 Schéma de principe d'un dispositif de projection à l'arc électrique	28
Figure 1.12 Coupe d'une torche à plasma	28
Figure 2.1 Schéma décrivant les relations entre le frottement, l'usure et la lubrification	37
Figure 2.2 Grandeurs associées au frottement	39
Figure 2.3 Surface apparente et surface réelle de contact	40
Figure 2.4 Formation d'un fragment d'usure par adhérence	42
Figure 2.5 Représentation schématique de l'usure abrasive à 2 corps et à 3.	43
Figure 2.6 Micro-labourage et micro-coupe	43
Figure 2.7 Usure par fatigue	44
Figure 2.8 Mécanismes de l'usure tribochimique	46
Figure 3.1 principe de la ditection par courant de Foucault	50
Figure 3.2 répartition des courant de Foucault	51
Figure 3.3 Profondeur de pénétration conventionnelle des courants	

de Foucault dans divers matériaux	52
Figure 3.4 Onde longitudinale	56
Figure 3.5 Onde transversale	56
Figure 3.6 Propagation d'une onde ultrasonore plane normalement à la surface de séparation de deux milieux d'impédance acoustique Z_1 et Z_2 [8]	58
Figure 3.7 Double réflexion et réfraction des ultrasons à la frontière entre deux milieux, avec conversion de mode	59
Figure 4.1 Forme d'échantillon.	65
Figure 4.2 Revêtements à la flamme supersonique HVOF de type CDS (sulzer-Metco)	67
Figure 4.3 Représentation schématique de l'installation HVOF-gaz naturel.	68
Figure 4.4 Image réelle	71
Figure 4.5a Image numérique (différents niveaux de gris)	71
Figure 4.5b représentation topologique.	72
Figure 4.6a Binarisation de l'image.	72
Figure: 4.6b Filtrage morphologique	73
Figure 4.7 Analyse morphologique	73
Figure 4.8 Segment de revêtement.	75
Figure 4.9 Un micromètre étalon.	75
Figure 4.10 L'indentation interfaciale	76
Figure 4.11 Tribomètre Amsler-A135.	77
Figure 4.12 Schéma du frottement des disques (test Amsler)	78
Figure 4.13 Chaîne de mesure ultrasonore	80
Figure 4.14 Illustration de la cuve	81
Figure 5.1 Photo MEB de la poudre T [©] -400 (Amdry 19155).	83
Figure 5.2 Analyse SDE de l'alliage T [©] -400. a) Poudre, b) Revêtement	84
Figure 5.3 Analyse diffractométrique du tribaloy [©] -400 a) poudre, b) revêtement avec phases en latte de $\text{Co}_3\text{Mo}_2\text{Si}$, c) revêtement avec phases en latte $\text{Co}_3\text{Mo}_2\text{Cr}$	86

Figure 5.4	Structure du revêtement tribaloy [®] -400 (section transversale).	87
Figure 5.5	Photo MEB de l'interface dépôt/substrat, a) 304L, b) 7075.	89
Figure 5.6	Dépôts T [®] -400/substrat, a) 304L, b) 25CD4 c) 7075	90
Figure 5.7	Indentation interfaciale	92
Figure 5.8	Evolution du moment de frottement en fonction de la distance parcourue sous une charge 245N.	93
Figure 5.9	Micrographie de la trace d'usure (beurrage) de revêtement.	95
Figure 5.10	Micrographie de la couche noirâtre.	95
Figure 5.11	La variation de l'impédance de l'échantillon substrat en acier ordinaire 25CD4.	97
Figure 5.12	La variation de l'impédance de l'échantillon substrat en acier inoxydable 304L.	98
Figure 5.13	La variation de l'impédance de l'échantillon substrat en alliage d'aluminium 7075.	98
Figure 5.14	Echogramme de l'échantillon substrat acier inoxydable 304L	99
Figure 5.15	Echogramme de l'échantillon substrat en alliage d'aluminium 7075.	100
Figure 5.16	Echogramme de l'échantillon substrat acier ordinaire 25CD4	100
Tableau 4.1	Composition chimique de : a) L'acier 25CD4, b) L'acier 304L, c) L'alliage 7075.	63
Tableau 4.2	Propriétés physiques et mécaniques de : a. L'acier 25CD4, b. L'acier 304L ,c. L'alliage 7075.	63 66 66
Tableau 4.3	Paramètres de sablage utilisés.	74
Tableau 4.4	Composition chimique de la poudre T [®] -400.	78
Tableau 4.5	Nombre des porosités et leurs surfaces.	
Tableau 4.6	Composition de l'alliage de cuivre utilisé pour contre-échantillons.	88
Tableau 5.1	Caractéristiques des revêtements élaborés	

INTRODUCTION

En matière de protection des matériaux, on demande le plus souvent aux pièces de résister à des sollicitations impliquant simultanément plusieurs phénomènes, par exemple : abrasion, érosion, frottement, chocs, corrosion, stabilité chimique,...etc. Pour l'amélioration du comportement des matériaux la tendance est donc, d'une part, d'adapter des solutions faisant intervenir des techniques de traitements de surface adéquats et d'autre part, de recourir à la protection des matériaux par des revêtements durs et réfractaires.

Les traitements de surface répondent à des besoins réels d'amélioration des performances des matériaux. Leur fonction étant d'améliorer la tenue du matériau vis-à-vis des sollicitations externes, tout en préservant ses propriétés volumiques.

Dans ce contexte, ils existent divers procédés (le dépôt électrolytique, le dépôt physique ou chimique en phase vapeur (PVD et CVD) et la projection thermique) et matériaux d'apport (Les dépôts céramiques, les dépôts métalliques, les dépôts plastiques, les dépôts autolubrifiants....etc.). Le choix d'un type de dépôts dépend essentiellement des conditions de travail.

Le développement des dépôts autolubrifiants pourrait être une réponse à la demande croissante de l'industrie des applications où la lubrification d'huile est limitée ou totalement empêchée, par exemple dans le glissement sec ou en conditions à hautes températures. Parmi les dépôts autolubrifiants on trouve les revêtements de tribaloy[®]-400 qui sont largement utilisés pour les pièces de turbine à gaz dans les domaines aéronautique et aérospatiale.

Dans le présent travail, nous nous proposons d'élaborer par projection thermique à la flamme supersonique HVOF des revêtements de T[©]-400, de caractériser leurs-microstructure et de discuter les corrélations avec les propriétés mécaniques et tribologiques. Le présent travail se présente en 5 chapitres. Dans le premier chapitre, nous décrivons les différents procédés de la projection thermique, les différents procédés de type HVOF, la poudre T[©]-400 et son application. Le deuxième chapitre décrit les principes de frottement de l'usure et la lubrification. Le troisième chapitre décrit le contrôle non destructif (courant de Foucault et ultrason). Dans le 4^{eme} chapitre nous présentons l'ensemble des techniques expérimentales utilisées dans nos travaux. Les résultats illustrés par différentes figures et tableaux son interprétés dans le 5^{eme} chapitre. En fin ce travail se termine par une conclusion générale.

CHAPITRE 1

LA PROJECTION THERMIQUE

1.1 Introduction

La projection thermique a été inventée en 1909 par Schoop qui observa une incrustation de plomb consécutive au mur en ciment et qui eut l'idée d'utiliser un chalumeau oxy-acétylique pour projeter un métal en fusion. Il a tout d'abord déposé des matériaux à bas point de fusion comme le plomb, en pulvérisant, à l'aide d'un fluide chauffé, du métal fondue, mais les difficultés étaient considérables. L'appareil utilisé était intransportable et souvent le métal se refroidissait au cours de la pulvérisation et n'était plus dans l'état physique voulu pour former un revêtement lors de son impact, pour cela il a amélioré le procédé en projetant le métal sous forme de poudre, à travers une flamme, malheureusement il n'était pas facile d'obtenir un revêtement et un débit de poudre régulier, c'est pourquoi dès 1913 le docteur SCHOOP remplaça la poudre par un fil métallique entraîné par deux molettes[1,2,3].



Figure 1.1: Schoop et sa première installation de projection thermique en 1914 [4]

A partir de 1914 cette technique se développe sous le nom de « schoopage » et consiste principalement à projeter du zinc et l'aluminium, matériaux aisément fusible [1], par manque de matière première spécifique et des challenges technologique, le procédé est resté stagnant jusqu'à la deuxième guerre mondiale, la figure 1.1 montre schoop et sa première installation de projection thermique.

Le procédé s'est considérablement développé au début des 1950 pour des besoins militaires, et ne cesse de croître et de trouver une place indispensable dans de nouvelles applications [4,5,6].

Les propriétés particulières de ce type de revêtement s'avèrent intéressantes et l'utilisation de la projection thermique se développe de plus en plus. La figure 1.2, présente quelques repères historiques dans l'évolution de la technologie [2].

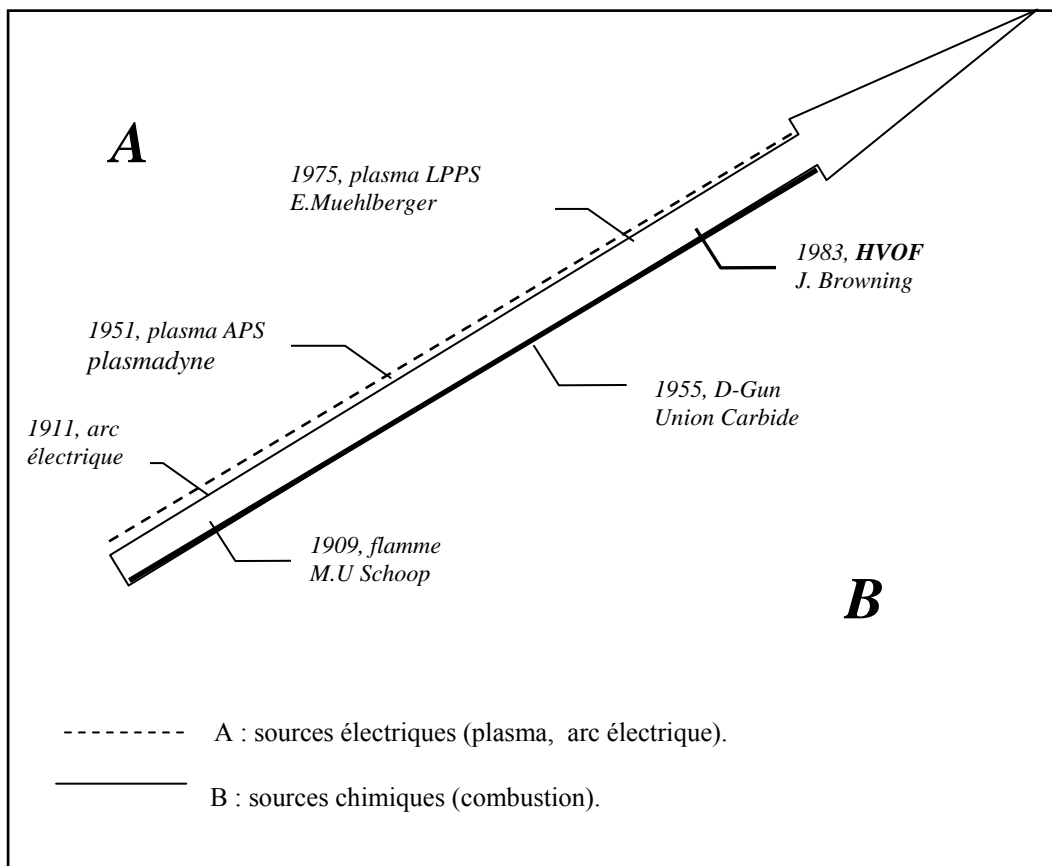


Figure 1.2: Repères historiques de la projection thermique [2]

1.2 Principe général

Le procédé consiste à fondre et à accélérer un matériau métallique ou non celui-ci prend alors la forme de particule pâteuse ou liquide à fin qu'il puisse s'étaler sur un substrat et y former un dépôt par empilements successifs [1], le temps d'étalement de la matière fondue sur la surface varie de 1 à 3 μs et le temps de solidification est de quelques dizaines de μs . En générale, la phase de solidification débute avant la fin de la phase d'étalement, les particules impactent sur des lamelles déjà solidifiées, le temps entre 2 impacts au même point étant d'environ une centaine de μs [7].

La source d'énergie doit donc être puissante pour fournir l'énergie nécessaire à la fusion rapide du matériau (transfert thermique) et délivrer un effet gazeux susceptible de véhiculer les particules (transfert cinétique) [1] comme la montre la figure 1.3.

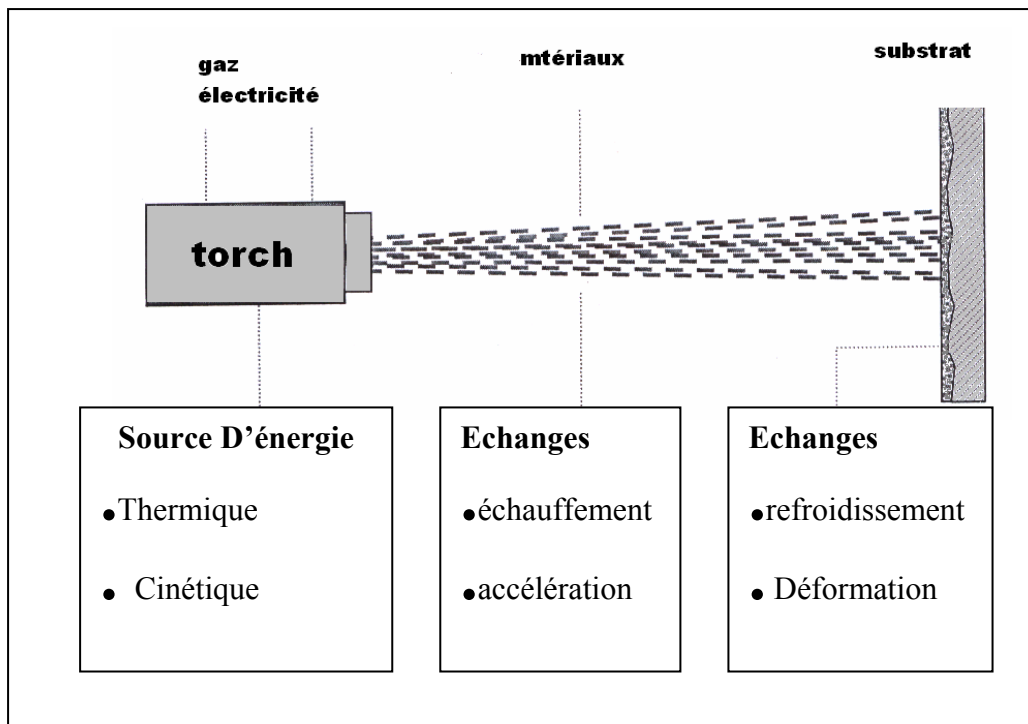


Figure 1.3 Principe de la projection thermique [2]

La morphologie et les propriétés des dépôts dépend de :

- la nature de matériaux à projeter
- la source de chaleurs
- l'atmosphère environnant
- le substrat à revêtir

1.2.1 Les matériaux

Les matériaux projetables comprennent tout les types et tous les mélanges de céramique, carbures, plastique, et métaux.

C'est l'immense variété des matériaux projetable qui fait de la projection thermique la technologie la plus souple et la plus diversifiée de tous les procédés de traitements de surface.

Le matériaux projeté doit pouvoir fondre sans se décomposer (la différence entre la température de fusion et la température de décomposition ou même de sublimation doit être supérieure ou égale 200°C), il est introduit dans la source de chaleur sous forme de fil, de poudre ou encore de fil creux garnis de poudre [6,7].

1.2.2 La chaleur

La chaleur nécessaire à la fusion des matériaux sera fournie soit par la combustion ou la détonation d'un mélange comburant (oxygène ou air) et combustible (gaz ou kérozen) ou par un arc électrique.

Une attention toute particulière doit évidemment être portée à la fusion des particules cette fusion dépendra [6,7] :

- 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 ;
- du temps de séjour de la particule dans la flamme ;

1.2.3 La vitesse

La vitesse est l'autre facteur tout à fait essentiel aux propriétés du revêtement obtenu [6,7].

1-2-4 Le substrat (nature, rugosité, température)

Les propriétés des revêtements dépendent aussi des microstructures obtenues, des contraintes résiduelles produites lors de la projection et de la porosité du dépôt. Cependant le système de revêtement / substrat est un matériau composite dont les propriétés dépendent aussi de la structure et des propriétés à l'interface présentés [6,7].

1.3 Caractéristiques générales des dépôts

1.3.1 Structure métallurgique

Les dépôts sont généralement stratifiés, s'ils ne sont pas traités a posteriori. Ils sont poreux, la porosité provenant soit de microcavités dues à un- empilage imparfait des gouttelettes, soit de gaz enfermés pendant la solidification. Le taux de porosité varie de moins de 1 % à 25 % suivant les procédés et les matériaux utilisés. Les dépôts comportent des inclusions telles que des oxydes ou encore d'autres matériaux provenant des chalumeaux eux-mêmes, des particules infondues ou partiellement fondues n'ayant pas subi un cycle thermique complet (en raison de leur taille ou de leur cheminement dans la source de chaleur).[5]

En raison de la très grande vitesse de refroidissement des particules au contact du substrat, leur structure métallurgique est du type trempée, généralement à phase unique. Ceci permet d'expliquer que la structure d'origine du matériau peut se trouver modifiée après dépôt.

Enfin, lors des projections réalisées dans l'air, les particules et le substrat sont soumis au phénomène d'oxydation. Il n'est ainsi pas rare de constater une augmentation du taux d'oxygène pendant la projection [5,6].

1.3.2 Adhérence

Les dépôts adhèrent au substrat par un phénomène mécanique. Suivant les procédés et les matériaux, l'adhérence varie de 20 à 115 MPa. Dans les cas où elle s'avère insuffisante (cas des projections d'oxydes par exemple), on utilise des sous-couches d'accrochage, parmi lesquelles on peut citer l'aluminium de nickel, le molybdène, ou encore les alliages du type NiCr (80/20) ou MCrAlY (M désignant Ni, Co ou NiCo)[5].

1.4 Présentation des différents procédés

1.4.1 Place de la projection thermique dans les traitements de surface

Les techniques de traitements de surface se répartissent en quatre familles [5] :

- les revêtements par voie sèche ou humide ;
- les traitements de conversion (réaction superficielle entre le matériau d'apport et le substrat) ;
- les traitements de diffusion (le matériau d'apport diffuse dans le substrat) ;
- les transformations structurales (modification de la structure métallurgique du substrat).

La figure 1.4 présente les principales techniques utilisées en traitement de surface.

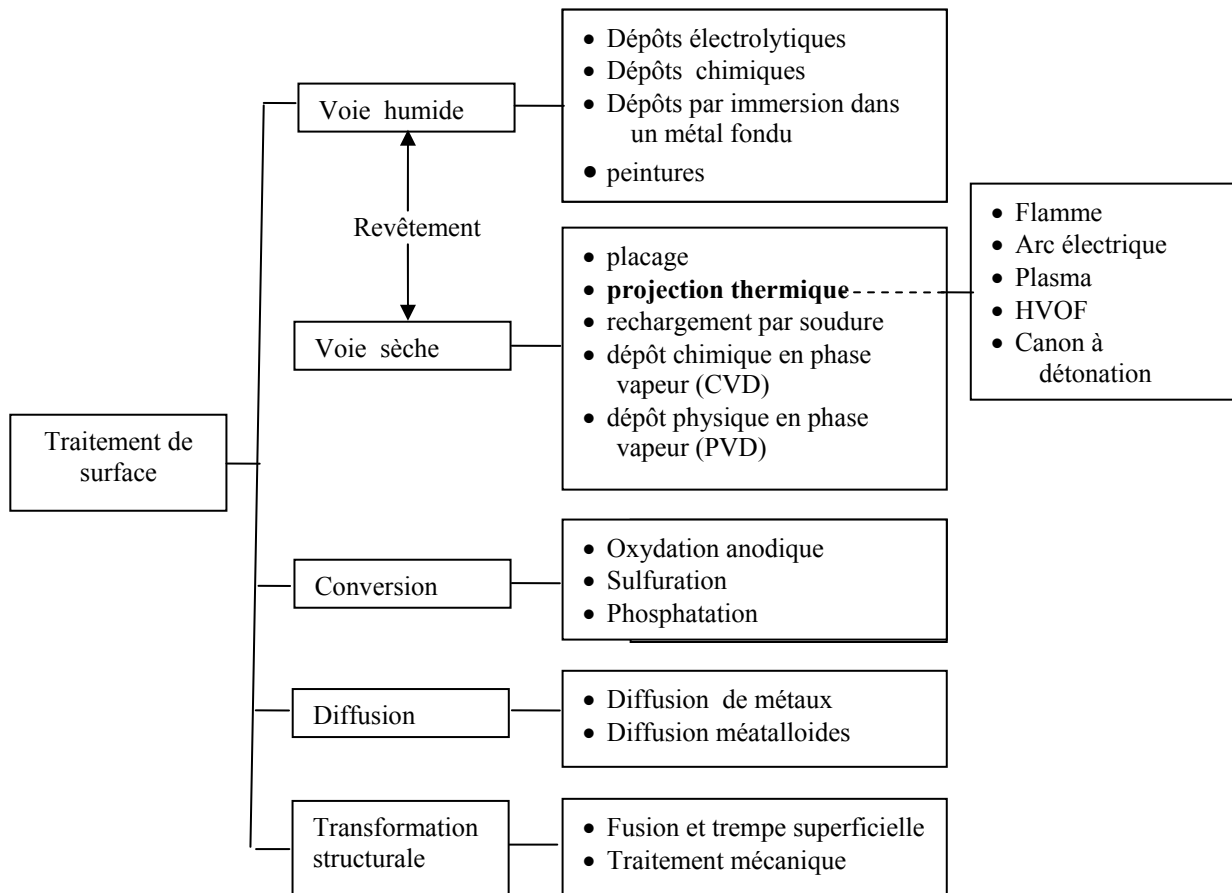


Figure 1.4: Place de la projection thermique dans les traitements de surface [5]

Le choix d'un procédé est directement issu d'un certain nombre de facteurs parmi lesquels on peut citer :

- les conditions en service de la pièce traitée ;
- la forme de la pièce ;
- la nature du matériau de base ;
- la nature du matériau d'apport le plus performant.

14.2 Procédés existants

Les procédés de projection thermique commercialisés peuvent être divisés en deux catégories suivant la source d'énergie utilisée.

La première catégorie concerne la projection à la flamme. Elle regroupe les procédés suivants [1,3] :

- Projection à la flamme fil ;
- Projection à la flamme supersonique ;

La deuxième catégorie concerne la projection à l'arc électrique. Elle regroupe les procédés suivants :

- Projection à l'arc électrique fil ;
- Projection au plasma d'arc soufflé ;
- Projection au plasma d'arc transféré ;

Les constituants principaux d'une installation de projection thermique sont similaires pour l'ensemble des procédés, leur degré de sophistication et de coût étant toutefois variables (figure 1.5).

Les constituants de base sont :

- Une source de chaleur (gaz, générateurs électriques)
- un chalumeau dans lequel sont réalisées les opérations de fusion du matériau projeté, et d'acquisition d'énergie cinétique par les particules ;
- un dispositif de régulation et de contrôle de l'énergie calorifique (simples débitmètres pour une installation de base de projection flamme, ou armoire automatique, par exemple) ;
- un dispositif d'alimentation en produit d'apport [5].

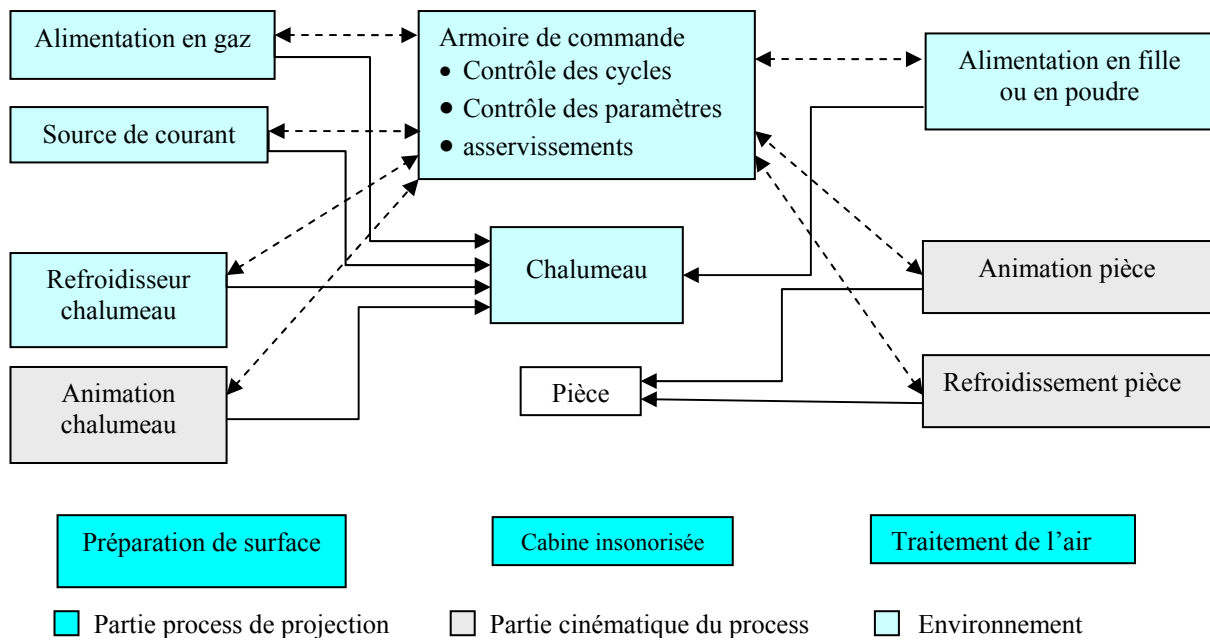


Figure 1.5: Principaux constituants d'une installation technique [5].

1.4.2.1 Projection à flamme

Le procédé de projection par flamme est basé sur la combustion d'un carburant sous forme gazeuse avec l'oxygène de l'air. Les matériaux utilisés sont les métaux ou alliages métalliques sous forme de fils, cordons ou de poudre (matériaux qui ne se subliment pas à 2760° C peuvent être projetés à la flamme). [8].

1.4.2.1.1 Projection flamme poudre

Dans la technologie dite flamme poudre, le matériau est introduit sous forme de poudre dans la flamme diffusante qui le véhicule jusqu'au substrat (figure 1.6). Les températures de la flamme sont de l'ordre de 3000 °C, et donc les températures atteintes par les particules à projeter ne dépassent pas environ 2000 °C [9].

La vitesse des particules projetées par la flamme est faible (-50m/s) et c'est pourquoi elles sont souvent accélérées avec de l'air. La distance entre la buse et le substrat est comprise entre 100 et 200 mm afin que les particules de poudre aient un temps de séjour suffisamment-

long pour être fondues. Ce procédé permet d'obtenir des dépôts de quelques dixièmes à quelques centièmes de millimètre d'épaisseur, à des taux horaires de dépôt d'environ 2 à 3kg/h, sans échauffement important du substrat ($T < 250^{\circ}\text{C}$) [5,9].

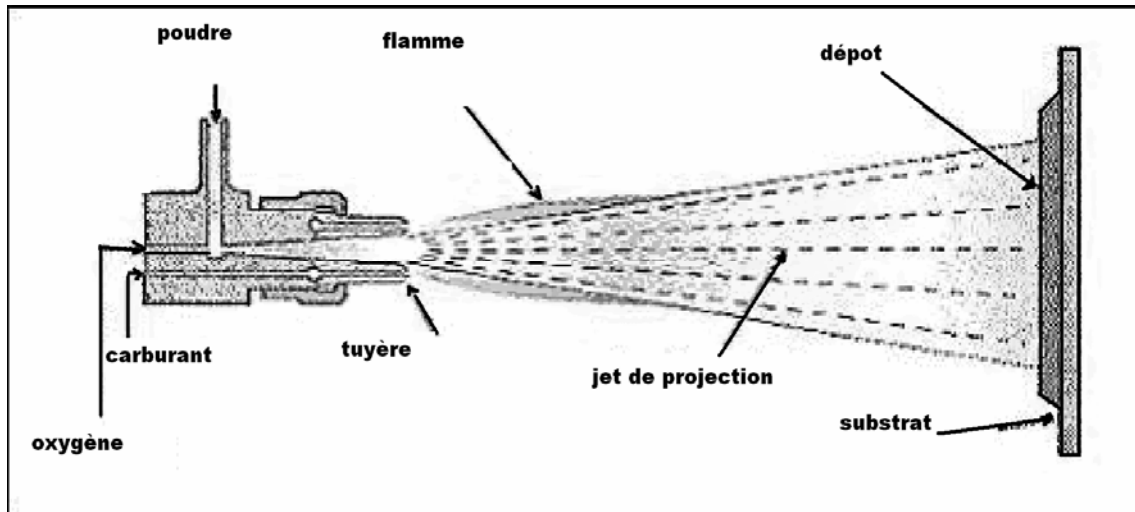


Figure 1.6: Schéma de principe d'un pistolet flamme poudre [9]

Dans ce groupe, nous trouvons trois types de matériels, les torches à gaz, les pistolets à poudre subsonique, les pistolets à poudre hypersonique. Les installations nécessaires sont en générale simples mais elles peuvent nécessiter un automatisme poussé, ou la distribution de la poudre est précise et équivalente à ceux utilisés en projection plasma [10].

a. Torche à gaz

Il s'agit de chalumeau oxy-gaz (en général oxyacétylénique) utilisé en soudure autogène équipé d'un petit récipient contenant les poudres [8,10].

La distance de la buse au support est très faible (quelques millimètres) ce qui permet à la flamme d'assurer la fusion de la poudre et le chauffage du support.

Les matériaux d'apports sont des alliages dits auto fusible à base de Nickel ou de Cobalt avec les éléments d'additions tel que le chrome, le tungstène, le bore et le silicium [5].

b. Pistolet à poudre subsonique

Ces pistolets utilisent un mélange oxyacétylénique. La poudre est stockée dans un réservoir qui peut être intégré au pistolet ou indépendant, et dans ce cas relié au pistolet par un tuyau flexible. La poudre est donc entraînée jusque dans la flamme par sa mise en suspension dans l'un des gaz. La figure 1.7 illustre ce principe de fonctionnement [5] [8] [9]. Leur utilisation est centrée sur les matériaux de type auto-fusible ou auto-adhérent.

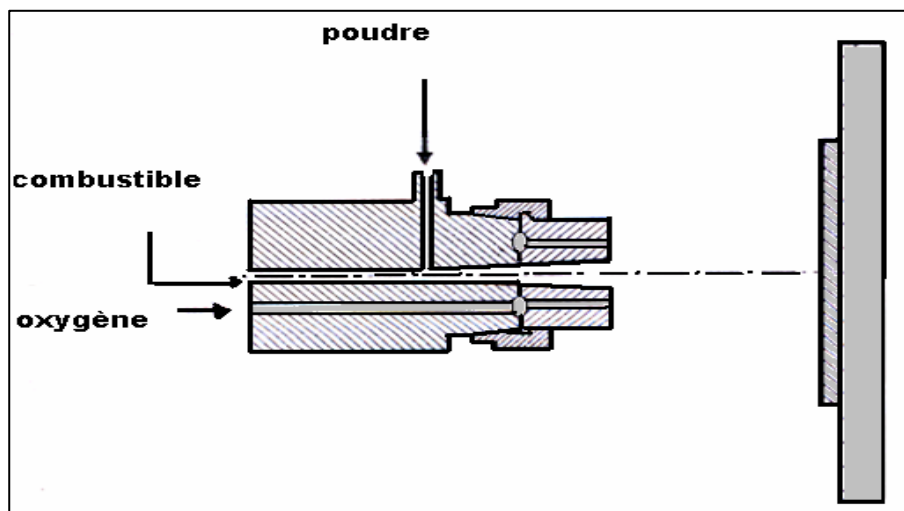


Figure 1.7: Pistolet à poudre subsonique [5]

On le trouve dans toutes les industries pour résoudre les problèmes de réparation et quelques fois traiter des pièces neuves, sollicitées en abrasion, corrosion, usure, isolation thermique [5].

c. Pistolet à poudre supersonique

c.1HVOF

La projection à la flamme supersonique utilise également une torche à flamme mais la géométrie spéciale de la tuyère et l'ajout d'une chambre de combustion (où règne une pression de 0,5 à 0,7MPa), suivie d'une tuyère convergente-divergente, permet à la flamme

d'atteindre des vitesses supersoniques. Le matériau à projeter se présente généralement sous forme de poudre. Il est injecté à l'aide d'un gaz neutre dans la flamme où il est fondu et accéléré dans la tuyère à une vitesse de 300 - 600 m/s. (figure 1.8) [4,5,9,11] .

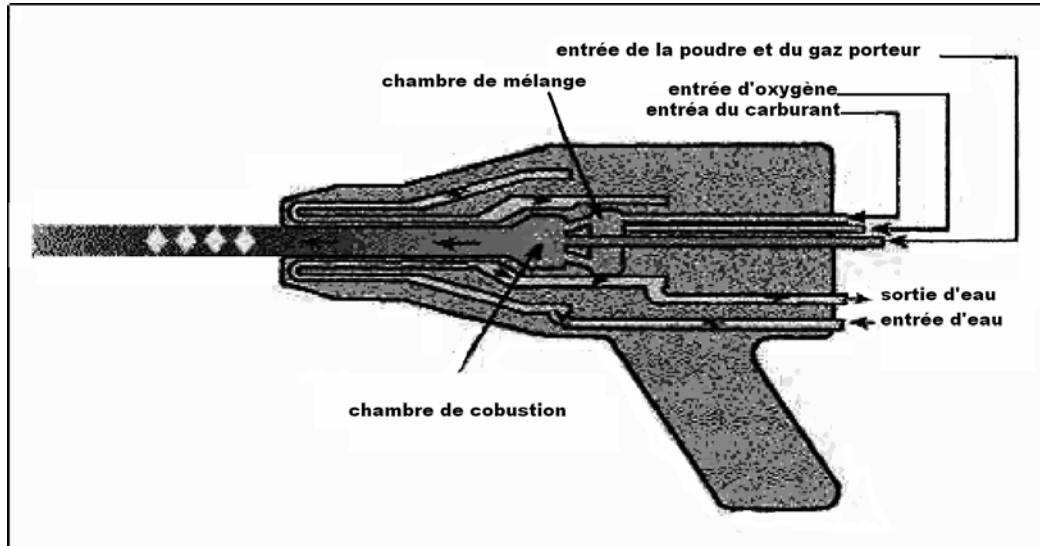


Figure 1.8: Schéma de principe d'un pistolet HVOF [9]

Pendant leur temps de séjour très court (quelques dixièmes de millisecondes) dans la flamme, les particules sont généralement chauffées à l'état pâteux, l'énergie cinétique (vitesse > 300 m/s) acquise permettant cependant la réalisation de dépôts caractérisés par une faible porosité (< 2%), une bonne adhérence (70-100 MPa) et une faible rugosité de surface [12,13].

Les principales applications de ce procédé sont la projection de cermets (WC-Co, Cr₃C₇-Co ou NiCr), de métaux, d'alliages et d'alliages auto fusibles [9,14,15].

c.2 Canon à détonation

Cette technique de projection consiste à introduire le matériau d'apport sous forme de poudre, dans un tube fermé à une extrémité, en même temps que les gaz de combustion (généralement oxygène et acétylène). La poudre est chauffée et éjectée à très grande vitesse-

(950m/s) par l'onde de choc qui se propage dans le tube avec une surpression de l'ordre de 2 MPa (figure 1.9). Le régime de projection est discontinu [9].

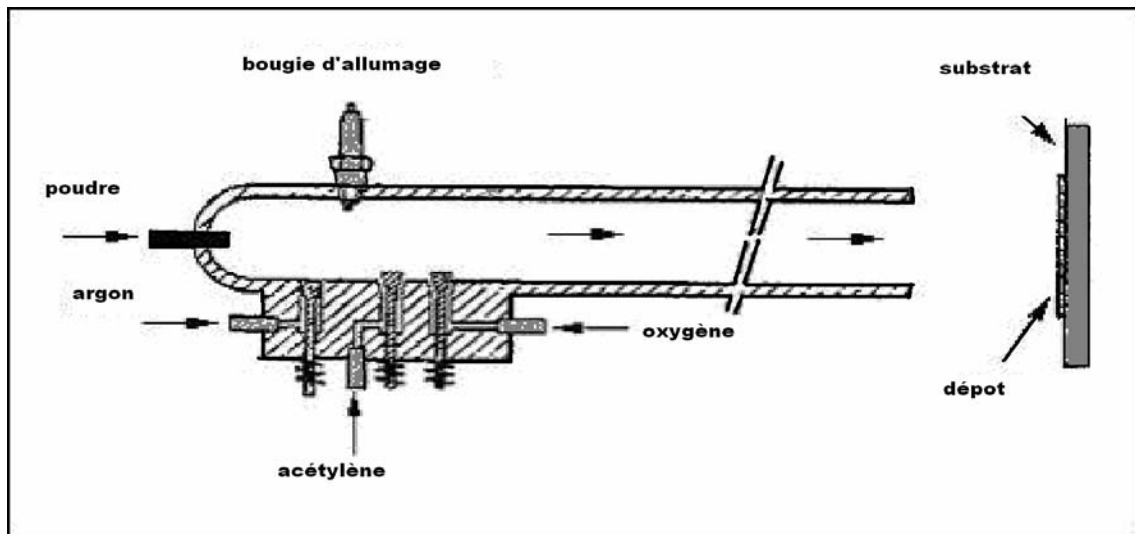


Figure 1.9: Schéma de principe d'un canon à détonation [5,9]

Les revêtements par canon à détonation sont réservés aux pièces techniques nécessitant une qualité de dépôt optimale. Une des principales applications de cette technique est la protection de rouleaux d'imprimerie par le cermet WC-Co et le revêtement de têtes e foreuses [5] [9].

1.4.2.1.2 Projection à flamme fils, cordons ou baguettes

Il existe également un procédé appelé «projection flamme-fil» où le matériau d'apport est sous forme de fil, de baguette ou de cordon.

Le matériel peut être soit manuel ou automatisé. Le matériau est projeté après avoir été fondu par les flammes sortant des trous de la buse à gaz, est soufflé par de l'air sous pression qui le propulse sur un substrat, après l'avoir dispersé en fines particules (figure 1.10) [5,9,10].

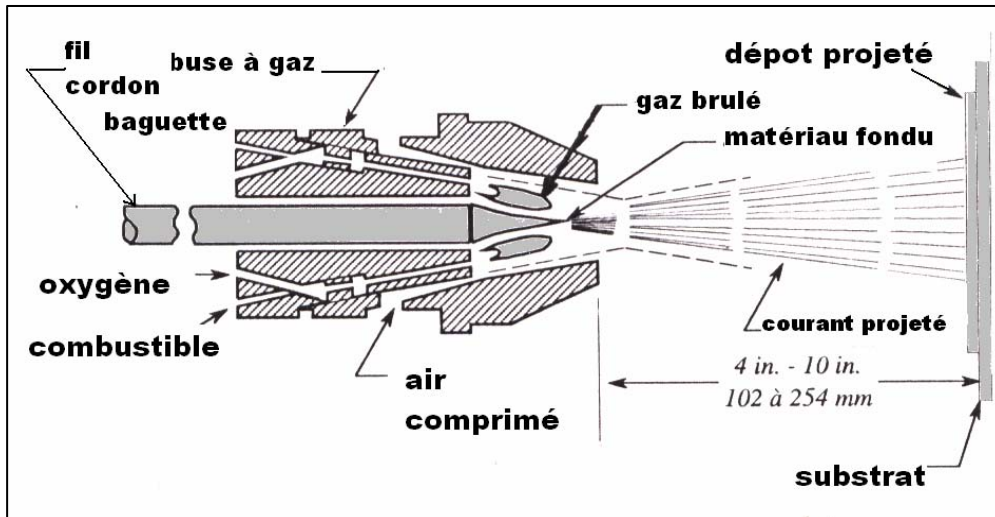


Figure 1.10: section du pistolet a projection a flamme pour Cordon fils et baguette [10]

1.4.2.2 Projection thermique à l'arc électrique

L'arc électrique est une source d'énergie qui permet à la projection thermique d'augmenter de façon notable sa panoplie de procédé. On trouve deux familles de matériels qui utilisent cette énergie [5].

- Le pistolet à arc électrique entre deux fils.
- Le pistolet plasma.

1.4.2.2.1 Pistolet à Arc électrique entre deux fils

Le principe consiste à faire éclater un arc électrique entre deux fils ductiles consommables et à atomiser le matériau aussi fondu par un jet de gaz comprimé (généralement de l'air) qui le projette sur le substrat (figure 1.11). Les pistolets à arc sont essentiellement constitués de deux parties :

- la première sert à l'entraînement des fils ;
- la seconde assure la fusion et la projection du métal fondu [9];

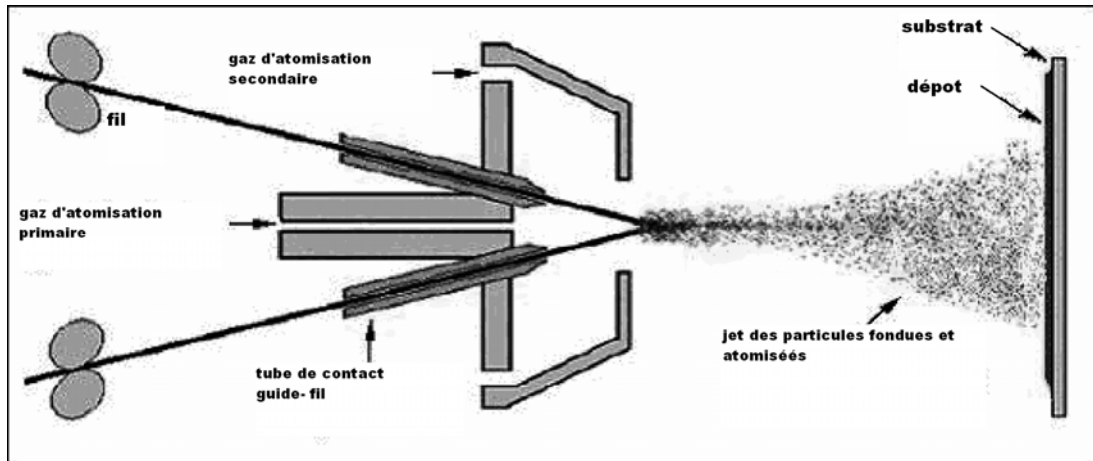


Figure 1.11: Schéma de principe d'un dispositif de projection à l'arc électrique [9]

1.4.2.2.2 Pistolet plasma

Le pistolet plasma utilise la décharge électrique d'un arc électrique capable de conduire des courants très intenses entre deux électrodes sous une faible tension comme le montre la figure 1.12 [9].

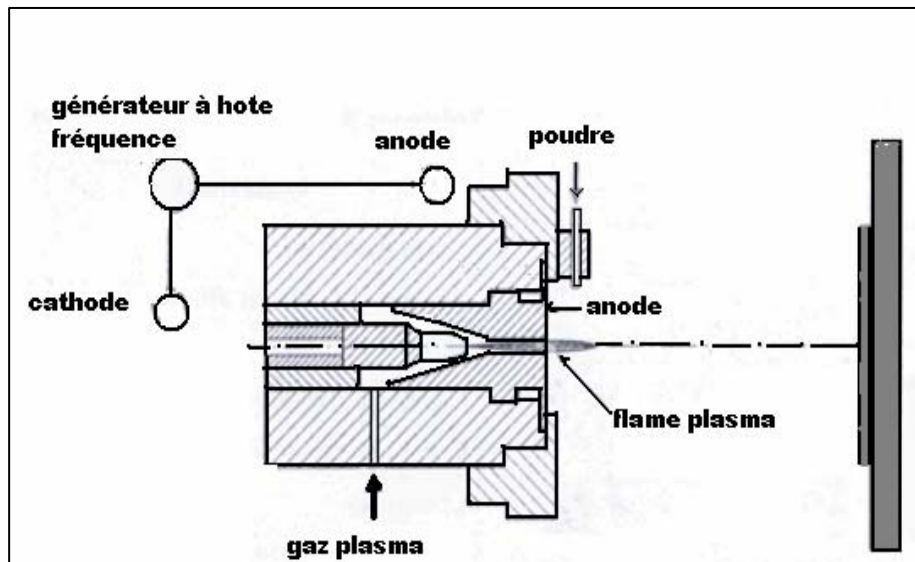


Figure 1.12 Coupe d'une torche à plasma [5]

Le pistolet à plasma est un appareil dans lequel on injecte un mélange de gaz à travers un arc électrique confiné par des parois froides. Il comporte généralement une électrode négative (cathode) en tungstène et une électrode positive (anode) en cuivre, toutes deux refroidies par une circulation d'eau, sous pression.

Le gaz est injecté autour de la cathode, traverse l'arc électrique et s'échappe par la tuyère anodique. Les pistolets utilisent des gaz plasmagènes comme l'argon, l'azote avec l'addition d'hydrogène ou d'hélium.

Les dépôts réalisés avec cette technique ont de nombreuses applications : barrières thermiques, protection contre l'oxydation et la corrosion, résistance au frottement et à l'usure, revêtements conducteurs électriques et isolants, implants médicaux, etc.... [5,6,8].

1.4.3 Les différents procédés de type HVOF

Le premier appareil de type HVOF a été développé en 1982 par Browning sous le nom de Jet Kote. Depuis son apparition, plusieurs fabricants ont proposés plusieurs modèles : Diamond Jet, CDS, Top Gun, JP-5000, etc. [2].

Les procédés HVOF diffèrent plus ou moins en fonction du procédé d'injection de la poudre, de la composition du combustible utilisé, de la méthode de refroidissement et des géométries des chambres de combustion et de buse. Une distinction majeure peut être faite au niveau des phénomènes de combustion impliqués, c'est à dire la détonation et la déflagration peuvent être classifiées par la conception de leur chambre de combustion, selon que la flamme est stabilisée dans la chambre de combustion (CSCP : chamber-stabilized combustion processes) ou dans la buse (NSCP : nozzle-stabilized combustion processes) [2].

1.4.3.1 Les procédés à détonation

Ces procédés sont souvent regroupés sous le terme de *D-GUN* (canon à détonation) selon la dénomination d'origine de la société Union Carbide, parce qu'ils utilisent le phénomène de détonation pour la combustion. Le gaz combustible et l'oxygène sont mélangés avec les poudres uniformément dispersées et périodiquement injectées dans-

le canon à la pression atmosphérique. Le mélange est ensuite enflammé par une bougie électrique et la pression augmente par l'effet de la combustion. L'onde de détonation (le front de la flamme) ainsi créée se déplace à une vitesse supersonique [2,16].

Le front de la flamme se propage et brûle le mélange à une vitesse telle que la pression dans le canon ne peut pas se décharger lors de la propagation. Alors le phénomène de détonation se produit. Il consiste en une forte hausse de pression provoquée par l'augmentation très rapide de la température des gaz brûlés. Les produits de combustion et la poudre sont alors éjectés à grande vitesse vers la sortie du canon. Ensuite un jet d'azote évacue les restes des gaz brûlés le long du canon et prépare le cycle suivant. Par exemple, la combustion stœchiométrique de l'hydrogène dans l'oxygène amène les gaz à une température de 3583°K une pression de 18 atm et une vitesse de 2816 m/sec [2].

Dans ce procédé, on utilise souvent l'acétylène, l'hydrogène ou un mélange de propane et de butane comme gaz combustible, et l'air, l'azote, l'hélium ou l'argon comme gaz diluant. Le canon a généralement une longueur de 600 à 800 mm et un diamètre de 21 à 25 mm. Le nombre de détonation est de 200 à 800 par minute.

Ce procédé est surtout utilisé pour la projection thermique des poudres de cermets de carbures. Depuis son apparition, la qualité des dépôts de carbures obtenue par ce procédé est son principal atout par rapport aux procédés HVOF et plasma. Il est ainsi possible de projeter des poudres d'alliages et de céramiques à bas point de fusion. Cependant, ce système est normalement utilisé de manière immobile ce qui présente un inconvénient pour la projection sur des formes complexes [2].

1.4.3.2 Les procédés à déflagration

La déflagration est un processus de combustion qui implique une conduction et une diffusion entre la couche de mélange non enflammé. La vitesse de déflagration dépend donc de la conductivité thermique et de la diffusion des gaz. L'onde de combustion se déplace à une vitesse subsonique beaucoup plus faible que celle de détonation.

Tous les procédés de type HVOF développés depuis le début des années 1980 se classent dans cette catégorie. Toutefois on peut distinguer entre deux types [2].

a. Les procédés à la flamme stabilisée dans la chambre de combustion (CSCP)

Ces procédés présentent une chambre de combustion relativement large par rapport au diamètre de la buse. Le mélange combustible-comburant est brûlé par diffusion et la flamme formée est suffisamment stabilisée dans la chambre de combustion. Une grande chambre de combustion permet d'augmenter la pression de combustion et la vitesse des gaz. Cette possibilité dépend très finement des propriétés physico-chimiques des combustibles, en particulier de son point d'ébullition et de sa stabilité chimique.

Un inconvénient principal de ce type de procédé est la perte d'énergie thermique au niveau de parois de la chambre de combustion. Cette perte de chaleur est souvent supérieure à 20% environ de l'énergie thermique obtenue par la combustion. Il est donc nécessaire d'équiper le chalumeau d'une longue buse pour avoir un échange thermique suffisant entre les gaz et les particules. De plus, le système peut être relativement compliqué à fabriquer. Les systèmes typiques appartenant à ce type sont les procédés *Jet Kote* et *JP-5000*.

b. Les procédés à flamme stabilisée dans la buse (NSCP)

Ces procédés ont généralement une chambre de combustion beaucoup plus petite que celle des procédés à flamme stabilisée dans la chambre de combustion.

La chambre est normalement une petite zone de section constante ou convergente qui est directement liée à la buse. La flamme est donc stabilisée dans la buse [2].

Pour ce type de procédé, une certaine limite de pression est imposée par la géométrie interne. Par contre la perte d'énergie thermique est faible par rapport aux autres procédés.

Les principaux avantages de ce type de procédés sont la simplicité de la structure et le bon rendement thermique. Les systèmes typiques de ce type sont les procédés : *CDS*, *Diamond Jet* et *Top Gun*. Dans notre présente étude, on a utilisé le procédé *CDS*.

b.1 Le procédé CDS

Ce système possède une petite chambre de combustion de section convergente qui est reliée directement à une buse de section constante de diamètre 8mm. Trois types de buses sont disponibles (3, 4 et 5 pouces). Pour chacune d'elles, une partie divergente d'environ 20 mm de long se situe en sortie. L'angle du divergent est très faible ($<1^\circ$). Les pertes poudres sont injectées dans la chambre de combustion axialement par rapport à la buse de projection.

b.2 le procédé de Diamond jet

Les gaz sont introduits prémélangés dans la zone de combustion et les gaz brûlés sont guidés par une enveloppe d'air comprimé formée entre l'injecteur de poudre et la buse externe. L'air introduit joue aussi un rôle de refroidissement pour l'injecteur de poudre et les buses de gaz. La flamme a une température relativement basse à cause de l'utilisation de l'air en forte quantité. Ce système n'a pas réellement de buse de projection qui permette un échange thermique important entre les gaz et les particules. Il est donc difficile de fondre certaines poudres, en particulier les poudres à haut point de fusion et celle de granulométrie élevée (typiquement supérieure à $50\mu\text{m}$) [2].

b.3 Le procédé Top Gun

Ce système possède en particulier une chambre de mélange des gaz qui permet la combustion de gaz prémélangés. La chambre de combustion est un tube de section constante relié à la buse de diamètre par l'intermédiaire d'un tube de section convergente.

Les gaz pré mélangés sont stabilisés en passant par les voies qui mènent à la chambre. Ce système peut être considéré comme un procédé intermédiaire entre les procédés à flamme stabilisée dans la chambre et dans la buse, mais il est évident que la flamme dans la chambre de combustion n'est pas stable et qu'elle est plutôt stabilisée dans la buse.

Se système peut avoir une pression de combustion plus élevée et en revanche une perte de chaleur plus importante que les autres systèmes de cette catégorie [2]

1.4.4. Les poudres et leurs applications

L'utilisation industrielle de dépôt fonctionnels par projection thermique a trouvé naturellement sa place dans de nombreux secteurs : aéronautique, défense, textile, mécaniques, électrique, biologiques, esthétiques,... [2].

Elle résultent des poudres employées et des procédés et paramètre sélectionnés. Pour bien définir la sélection d'une poudre pour son application et ses propriétés fonctionnelles, les principales application peuvent se classé comme suite :

1.4.4.1. Revêtement contre l'usure

Cette classe compris les matériaux ayant de bonnes résistances

- à l'abrasion.
- à la fatigue.
- à l'érosion.
- au frottement.

1.4.4.2. Revêtement contre la corrosion

Ces revêtements sont utilisés dans les industries chimique, alimentaire, en immersion dans l'eau de mer, pour la protection contre les atmosphères oxydantes et gaz corrosif, contre la chaleur, comme des revêtements abradables, etc....

Les méthodes de fabrication des poudres influent beaucoup sur la qualité de dépôt, il existe plusieurs méthodes de fabrication.

- Les poudres mélangées.
- Les poudres fondues et concassées.
- Les poudres enrobées.
- Les poudres frittées et concassées.
- Les poudres agglomérées et frittées.

La poudre utilisé dans notre travail est le tribaloy[®]-400, pour cela nous abordons dans cette partie les caractéristiques des poudres de superalliage et spécifiquement les poudre à base de cobalt.

1.4.4.3. Les poudres à base de superalliages

Les poudres de superalliages utilisées pour le rechargement dur et les applications contre la corrosion et l'oxydation. Nous considérons dans ce paragraphe que la famille de la poudre utilisée dans nos travaux expérimentaux.

1.4.4.3.1 Les poudres a base de cobalt

a. Le system Co-Cr-W-C

L'alliage le plus connu dans ce système est le satellite N⁰6 dont la composition nominale est CO-28% Cr-4% W-1.1% C. Il s'agit d'un alliage eutectique contenant des carbures de type M_7C_3 de 16% à 17% en volume dans une matière de cobalt allie avec le chrome et le tungstène.

Dans ce système, la résistance à l'usure abrasive est obtenue par la présence des carbures, tan disque la résistance à la corrosion et la dureté à haute température sont obtenues par la matrice. Les propriétés d'usure de métal-à-métal sont aussi déterminées par la composition de la matrice.

Ce système contient généralement du chrome de 19% à 30%, du tungstène de 4 à 15% et du carbone de 0.25 à 3% en poids. Il contient souvent des éléments additionnels comme le fer, le nickel, le silicium, le bore, le molybdène, ou le manganèse.

Une autre poudre courante sur le marché est l'alliage CO-25% Cr-10% Ni-7% W-0.5% C similaire au stellite N⁰6. Le dépôt de cette de cette poudres possède une bonne résistance à l'abrasion, au fretting et à l'érosion combinée à la cavitation jusqu'a 850⁰C, ainsi q'une excellente résistance à l'oxydation à haute température.

b. Le système Co-Mo-Cr-Si

Il y a deux alliages très connus dans ce système: le Tribaloy[®]-400 (Co-28%Mo-8% Cr-2% Si) et le Tribaloy-800 (Co-28% Mo-17% Cr-3% Si). Le Tribaloy[®]-400 contient une phase en lattes (lave phase) d'au moins 50% en volume dans une matrice de CoCrMo. La phase en lattes a une structure hexagonale similaire aux carbures de type M_7C_3 . Elle a une dureté de 1000 à 1300 HV un peu moins élevée que celle de carbures. Cet alliage est adhésif par contre il est moins abrasif [17,18].

Les alliages de ce système sont hyper eutectiques avec une température eutectique d'environ 1230⁰C et un point de fusion d'environ 1560⁰C pour la phase en lattes. La teneur en carbone doit être inférieure à 0.08% pour inhiber la formation des carbures de préférence à la phase en lattes.

L'élément d'addition Mo augmente la résistance à haute température de la matrice à base de cobalt, l'alliage Tribaloy[®]-400 peut être utilisé jusqu'à 760C°. Le Cr contenu dans la matrice à base de cobalt et dans la phase en latte contribue à l'augmentation de leur résistance à la corrosion. La structure cristalline de la matrice est stabilisée par les éléments d'addition Ni et Fe [19,20,21,22,23].

CHAPITRE 2

LA TRIBOLOGIE

2.1 Introduction

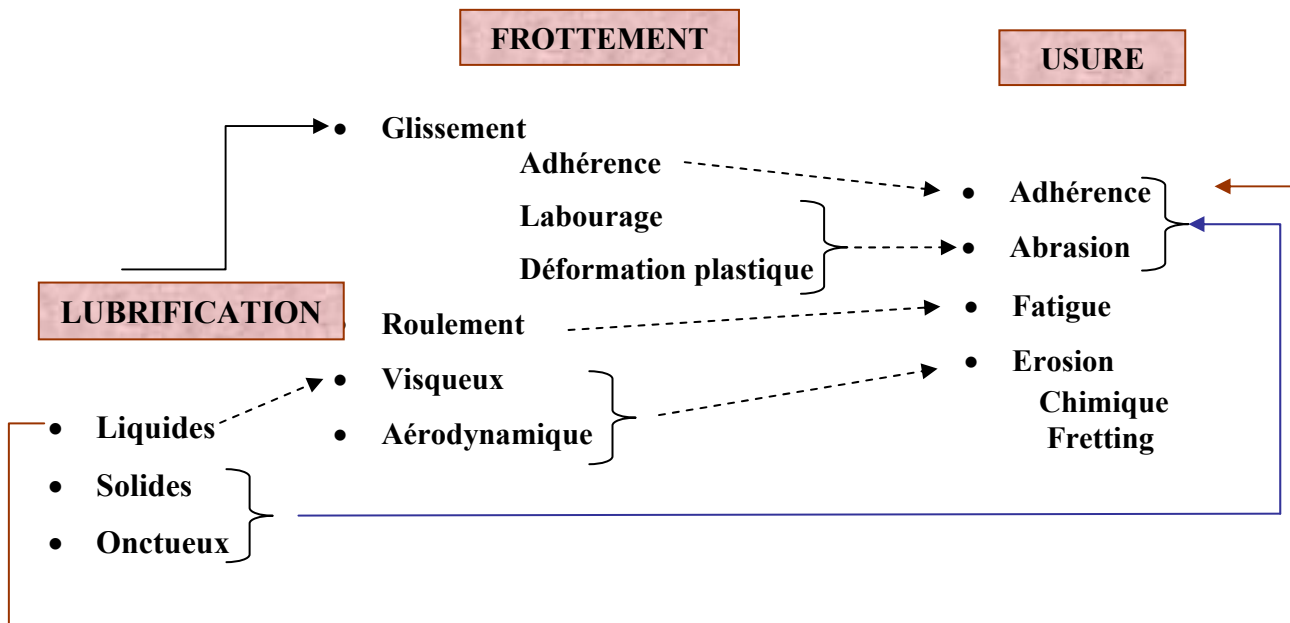
L'utilisation convenable de la tribologie conduit à minimiser les effets du frottement et de l'usure, celle-ci, par exemple, peut varier selon le choix des couples de matériaux quelques milligrammes de matières perdues dans un mécanisme suffisent à la rendre hors d'usage et occasionnent des frais de remplacement en pièce frottantes d'un avion militaire est approximativement équivalente au coût du carburant par heure de vol). Pour prendre un exemple plus familier, chacun d'entre nous connaît les inconvénients et les frais occasionnés par l'usure d'un appareil ménager si l'apparition des technologies modernes de fabrication et leur automatisation ont grandement modifié le visage de nos usines, c'est grâce au rôle de la tribologie, cela est également vrai pour exemple d'application concerne le développement récent du traitement des surfaces par des procédés très divers. Ils ont fortement réduit notre dépendance vis-à-vis de l'utilisation des matériaux nobles ou stratégiques par l'utilisation d'une couche très dure de quelques micromètres, résistant à l'usure [24].

2.2 La tribologie

Le terme tribologie vient des mots tribos, le frottement et logos, la loi, la connaissance en grec classique [25]. La tribologie est définie comme la technologie des surfaces qui interagissent dans un mouvement relatif.

Ce terme fut utilisé pour la première fois en 1960, un comité du gouvernement britannique et concerne en fait l'étude du frottement, de l'usure et de la lubrification, c'est un domaine multidisciplinaire dans l'importance est considérable pour la conservation de l'énergie et de la matière [26]. Frottement et usure se produisent à la surface entre deux

solides en contact. La lubrification permet de séparer les surfaces en contact par un film lubrifiant, et donc de limiter l'usure. La Figure 2.1 décrit schématiquement les relations qui existent entre les trois aspects de la tribologie [27].



Légende :

-----	Cause
-----	Diminue
-----	Élimine

Figure 2.1: Schéma décrivant les relations entre le frottement, l'usure et la lubrification [27]

L'analyse scientifique de la tribologie peut se structurer en trois grands domaines qui concernent :

- Les matériaux,
- Les surfaces et
- Les écoulements de la matière [24].

2.2.1 Le frottement

La force de frottement est une force de réaction, qui s'oppose toujours au mouvement relatif entre deux corps en contact (figure 2.2). Cette force augmente de zéro à un maximum avant le début du mouvement macroscopique : c'est la force de *frottement statique*. Après le début du mouvement, elle diminue jusqu'à une nouvelle valeur qui demeure constante tant que le mouvement persiste. C'est la force de *frottement dynamique*.

Le travail effectué par les forces de frottement a un triple effet : (1) de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur; (2) des déformations plastiques sont générées; (3) des particules solides sont arrachées sur les surfaces de contact. Dans les machines, la génération de chaleur et les déformations plastiques sont responsables des pertes de rendement, tandis que l'arrachement progressif des particules à la surface des pièces est la cause de *l'usure* [26].

2.2.1.1 Le frottement statique

Le frottement statique est caractérisé :

- La force l'on doit appliquer pour déplacer deux corps solide en contacte;
- La force nécessaire pour casser les jonctions adhésives à l'interface des deux corps solides [2].

$$\mu = F_F / F_N \quad (2.1)$$

Où α est l'angle de frottement

Quand on augmente l'angle d'un plan incliné, α est l'angle pour lequel un corps se déplace sur le plan incliné. La figure 2.2 montre le plan incliné avec :

F_F = force de frottement

F_N =force normale

M = masse du corps

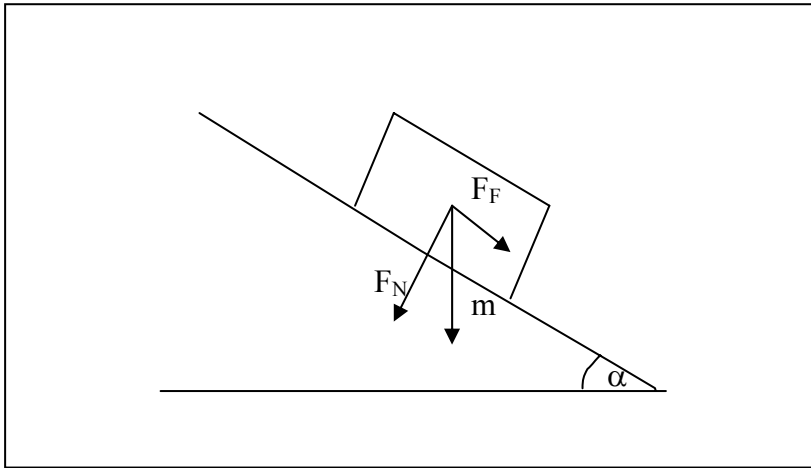


Figure 2.2: Grandeurs associées au frottement [2].

2.2.1.2 Le frottement dynamique

Ce type de frottement s'accompagne d'un glissement et d'un roulement. On utilise très souvent le coefficient de frottement pour exprimer les efforts de frottement entre deux corps. Il existe une différence entre le coefficient de frottement dynamique (état dynamique) et statique [2].

Avec F : la force tangentielle minimale pour déplacer l'objet;
 et F_N : la force normale.

Le coefficient de frottement dynamique μ_d peut être calculé de la façon suivante :

$$\mu_d = F_T / F_N \quad (2.2)$$

Qu'il soit statique ou dynamique le coefficient de frottement μ dépend de

- De facteurs mécaniques : force normale, vitesse de déplacement ;
- De facteurs chimiques : humidité, oxydants ;
- Des propriétés des matériaux : dureté, plasticité, énergie de surface

La rugosité des surfaces des corps qui conditionne la surface de contact réel: Contrairement à la surface de contact apparent, la surface de contact réelle est plus petite et dépend de la rugosité des surfaces des corps en contact (figure 2.3).

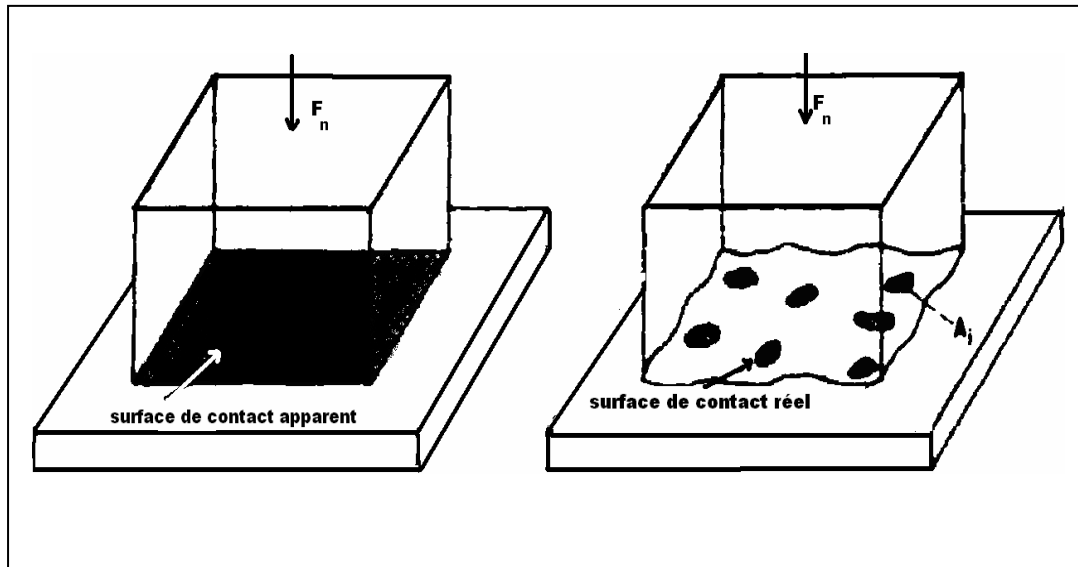


Figure 2.3: Surface apparente et surface réelle de contact [26].

Dans un contact dynamique les aspérités bougent les une par rapport aux autres. Elles sont déformées élastiquement et plastiquement par le processus d'usure. Pour cette raison, la surface de contact réelle de glissement est plus grande que la surface de contact statique [2,26].

Si l'aire de chacun des points de contact est A_i , l'aire réelle de contact A_r est donnée par :

$$A_r = \sum_{i=1}^n A_i \quad (2.3)$$

Où n est le nombre total d'aspérités simultanément en contact.

Avec A_i = surface de contacte individuelle entre les aspérités [2,26,27].

- Les couches d'absorption et les couches de réaction, qui diminuent normalement (μ statique et dynamique) en comparaison avec le contact direct métal-métal.
- L'environnement (atmosphère qui empêche ou favorise la constitution d'une couche d'oxyde)
- Le couple de frottement

Dans un couple de frottement (lorsque deux corps se frottent l'un contre l'autre) si un corps bouge tangentiellement contre l'autre et si la force normale F_N est constante, le coefficient de frottement μ_d dépend seulement de la force tangentielle F_T . Cette force F_T est dans ce cas une fonction de la surface de contact réelle A_r et de la résistance au cisaillement [2,26,27].

$$F_T = A_r * S \quad (2.4)$$

Avec A_r : surface de contact réel

S : résistance au cisaillement.

2.2.2 L'usure

En terminologie, le terme « usure » signifie la détérioration d'une chose par suite de son usage, de son fonctionnement, affaiblissement ou altération de qualité,... [24,27,28,29].

En mécanique l'usure peut néanmoins être définie comme la *perte de matériaux ou le déplacement non désiré de matière* sur la surface de contact entre deux solides en mouvement relatif. Ce phénomène est constitué de trois étapes reliées les unes aux autres et qui se déroulent sur des points de contact individuels soient l'interaction des surfaces, les changements dans la couche de surface et l'endommagement des surfaces. L'usure d'un matériau peut avoir plusieurs origines (diffusion atomique, adhésion...) et être influencée par de nombreux paramètres [25,26,27].

- * La pression
- * La vitesse
- * La lubrification
- * La structure métallurgique (traitement de surface)
- * la rugosité
- * Les conditions d'environnement,...

On divise l'usure selon les principaux mécanismes qui la génèrent : l'*adhérence*, l'*abrasion*, l'*érosion*, la *fatigue* et le *fretting*.

2.2.2.1 L'usure par adhérence

Cette forme d'usure apparaît lorsque deux surfaces glissent l'une sur l'autre est associée à la formation de joints d'adhérence aux points de contact situés sur les aspérités des surfaces à l'échelle atomique. La nature des solides en contact, la structure cristalline et l'orientation du cristal influencent ce processus [2,24,25].

Tel qu'illustré à la Figure 2.4, on peut résumer les étapes qui conduisent à la formation d'un fragment d'usure par adhérence de la façon suivante :

(a) déformation plastique des aspérités en contact;

(b) pénétration des films de surface;

(c) formation du joint d'adhérence entre les matériaux de base débarrassés de leur oxyde et bris de l'aspérité dans le matériau de base et formation d'un fragment d'usure [27,28,30].

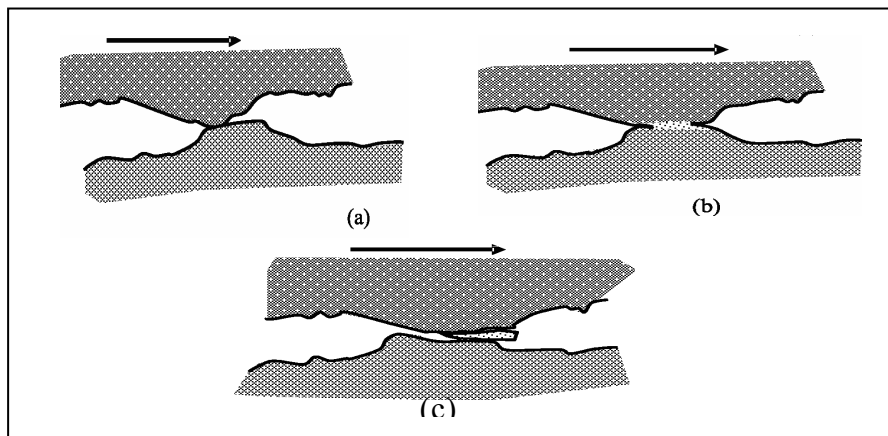


Figure 2.4: Formation d'un fragment d'usure par adhérence [27].

2.2.2.2 L'usure par abrasion

L'usure par abrasion est le résultat du frottement de glissement par labourage ou par déformation plastique. L'usure peut se faire à *deux corps*, directement à partir des solides en contact ou bien à *trois corps*, comme résultat de l'action de particules solides

dures qui se trouvent entre les deux surfaces en mouvement relatif. Une lime cause de l'usure par abrasion à deux corps, alors que le polissage avec de la poudre à r oder est un exemple d'abrasion à trois corps [24,26,28,29].

La Figure 2.5 illustre le principe du mécanisme d'usure par abrasion. Dans l'abrasion à deux corps, la particule abrasive est attachée à une des deux surfaces en contact. Dans l'usure à trois corps, la particule abrasive peut rouler plus ou moins librement entre les deux surfaces [26] [27].

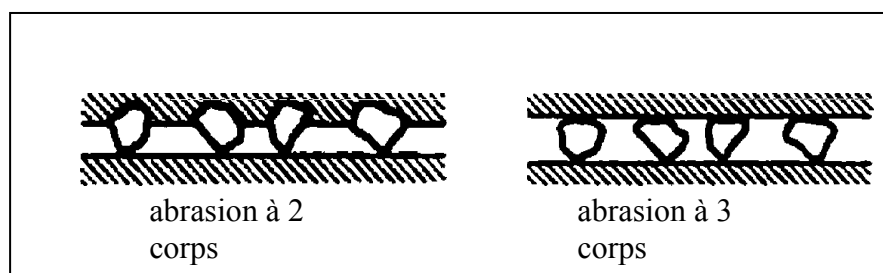


Figure 2.5 Représentation schématique de l'usure abrasive à 2 corps et à 3 corps [26].

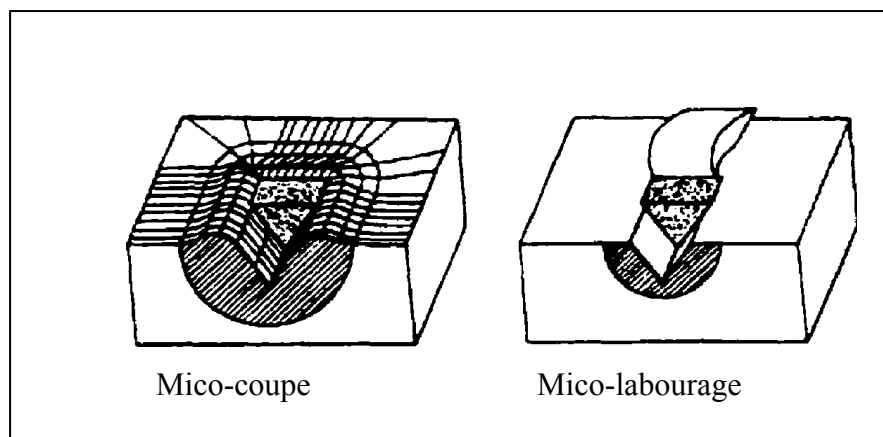


Figure 2.6: Micro-labourage et micro-coupe[26]

Dans le cas idéal, le micro-labourage provoqué par une particule abrasive qui passe une seule fois sur la surface du métier ne cause pas de détachement de matière. Une bosse se forme devant la particule et le métier est continûment déplacé pour former des bords adjacents d'un sillon [2,26].

En pratique, pendant le micro-labourage, la perte de métier peut quelque fois être provoquée par de nombreuses particules qui usent la surface simultanément

et successivement : Le matériau peut être labouré à côté d'une rayure antérieure et peut être cassé par quelques cycles de fatigue.

Le micro-coupage pur provoque une perte de matériau égale au volume du sillon.

L'angle d'attaque de la particule ainsi que la force de cisaillement interfaciale va influencer ces deux mécanismes et il existe une valeur critique de l'angle où il est possible de passer du micro-labourage à la micro-coupe. Pour la majorité des métaux, cette valeur est comprise entre 30° et 90° [2,26].

2.2.2.3 L'usure par fatigue

Le frottement de roulement et le contact successif sur les aspérités reproduisent ce phénomène aux surfaces de contact. Selon la valeur du coefficient de frottement, les efforts dans des solides en contact sont localisés soit à la surface ou sous la surface de contact. Dans le premier cas, la fissure se forme à la surface (Figure 2.7 (a)) [31,32]. En se propageant, celle-ci se déplace d'abord vers l'intérieur du solide, puis revient vers la surface pour former un fragment d'usure. Dans le second cas, la fissure se crée d'abord sous la surface (Figure 2.7 (b)). En se déplaçant vers la surface, cette fissure forme un fragment d'usure [27].

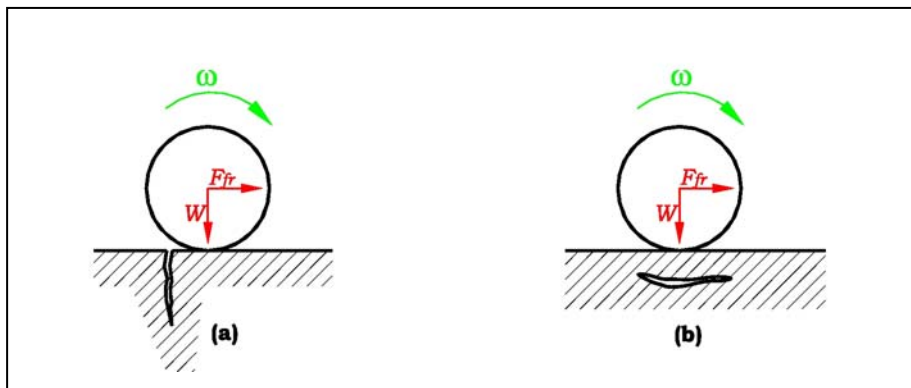


Figure 2.7: Usure par fatigue [27].

L'usure par fatigue peut intervenir de deux manières différentes dans les contacts : la fatigue mécanique qui résulte d'une action cyclique en surface ou la fatigue thermique où la dégradation des surfaces résulte des contacts provoquant une forte chaleur entre les surfaces [26].

2.2.2.4 L'usure par érosion

L'érosion est une dégradation de surface sous l'effet de particules, de gouttelette d'un jet, ou de l'action d'un écoulement turbulent. Concernant les matériaux fragiles, le processus d'érosion se manifeste par enlèvement ou perte de matière sur une surface, par la formation et l'intersection des fissures. L'intersection des fissures dues à l'impact est plus sévère quand la direction d'impact est normale à la surface. L'usure érosive est donc, la perte de matière provoquée par l'action d'un fluide en mouvement contenant des particules solides, généralement de faibles dimension [27,29,33].

2.2.2.5 L'usure par fretting

Le fretting est un mécanisme d'usure qui se produit entre des surfaces qui ne devraient pas normalement être en mouvement relatif, mais qui en fait présentent un déplacement oscillant microscopique entre elles. L'amplitude de ce déplacement est de l'ordre de 1 à 100 microns, donc pratiquement imperceptible à l'œil nu. Ce type de déplacement est induit par des vibrations dans la machine ou par l'environnement [27].

2.2.2.6 L'usure tribochimique

La tribochimie concerne la chimie des interactions des surfaces en mouvement relatif [26]. L'environnement et les interactions dynamiques entre les matériaux contrôlent ce mode d'enlèvement de matière.

Il y a 4 mécanismes différents pour ce type d'usure (Figure 2.8) :

- Un contact métallique entre les aspérités de surface qui entraîne un enlèvement de métal par adhésion. Les petits débris d'usure produits peuvent être oxydés (Figure 2.8 (a));
- Une réaction chimique des métaux avec l'environnement qui réduit le contact et assure une protection (Figure 2.8 (b));
- Une fissuration des couches protectrices provoquée par une grande pression locale qui entraîne des débris non-métalliques (Figure 2.8(c));

- Des débris d'usure métalliques ou non peuvent agir comme particules abrasives et rendre rugueuses les surfaces en contact. Il pourra y avoir reformations des couches protectrices (Figure 2.8 (d)) [29,32].

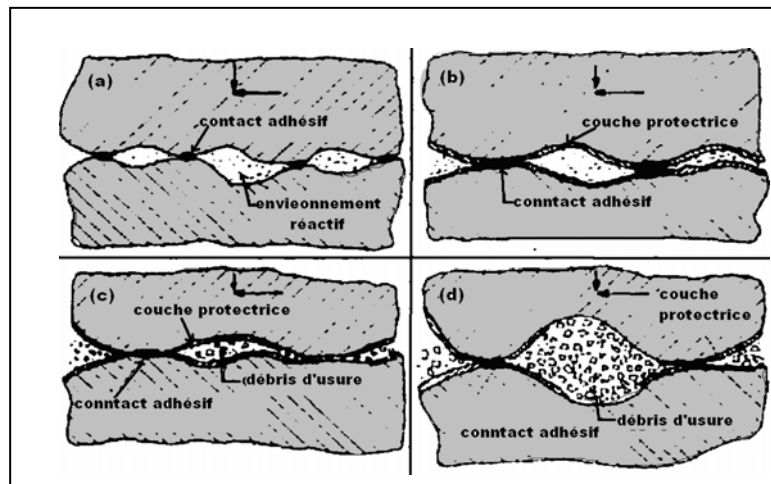


Figure 2.8: Mécanismes de l'usure tribochimique [26].

2.3 La lubrification

Lorsque deux solides en contact par leur surface se déplacent relativement l'un par rapport à l'autre, l'application d'une force de frottement est inévitable. Pour minimiser la force du frottement, il faut minimiser la déformation plastique. C'est là justement la fonction de la lubrification, qui consiste à déposer un film de faible résistance sur la surface de contact entre les solides [30,34].

Le substrat dont est constitué ce film s'appelle un lubrifiant. En plus de réduire le frottement, le lubrifiant a comme fonction de distribuer la charge sur une plus grande surface de contact, et d'évaluer la chaleur et les débris d'usure du contact.

En ingénierie, les lubrifiants se classent en trois catégories, soit les lubrifiants solides, les lubrifiants onctueux et les lubrifiants liquides...

Les lubrifiants solides n'évacuent pas la chaleur ni les bris d'usure du contact. De plus, ils ne se renouvellent pas et le frottement reste quant même relativement élevé. La propriété première d'un lubrifiant solide est de posséder une faible résistance à la déformation plastique

les autres propriétés recherchées pour ces lubrifiants sont leur facilité à se distribuer uniformément sur la surface et de bien s'y adhérer [27,34].

Le Tribaloy[®]-400 est un lubrifiant solide très utilisé pour les pièces dont la lubrification n'est pas suffisante ou inexistante. Il est largement utilisé pour les pièces de turbine à gaz dans le domaine aéronautique. Les dépôts de cet alliage ont une excellente résistance à l'usure de glissement, une bonne résistance à la corrosion et une résistance moyenne à l'oxydation à haute température, ils sont adhésifs par contre moins abrasifs.

La résistance à la cavitation-érosion augmente avec la densité du dépôt et la proportion de la phase en lattes et diminue avec le taux de l'oxydation. Guo et al ont constaté qu'un traitement thermique à 1175C° peut augmenter la densité et la proportion de la phase en lattes. Cela conduit à une forte augmentation de la dureté, de la résistance à la cavitation-érosion par rapport au dépôt non traité [2,18,19,20].

CHAPITRE 3

LE CONTROLE NON DESTRUCTIF

3.1 Définition

L'appellation contrôle non destructif fait naturellement penser au diagnostic le médecin formule lors de l'examen de son patient. Le même principe appliqué à la pièce mécanique consiste à mettre en œuvre des méthodes d'investigation pour permettre d'apprécier l'état de santé des pièces sans destruction préjudiciable.

Les techniques de contrôle non destructif les plus couramment employées actuellement peuvent être classées en deux familles principales, étroitement liées à la localisation de l'anomalie sur la pièce en cours d'examen [35].

- La première famille concerne les méthodes dites de surface pour lesquelles l'anomalie est localisée en surface extérieure. Elle groupe les procédés suivants :
 - examen visuel,
 - ressuage,
 - magnétoscopie,
 - courant induits ou courant de Foucault.
- La deuxième famille concerne les méthodes dites volumiques pour lesquelles l'anomalie est localisée dans le volume de la pièce. Elle regroupe les procédés suivants :
 - ultrason,
 - rayonnements ionisants.

Dans ce chapitre on n'aborde que le contrôle non destructif par courants de Foucault et par ultrasons.

3.2 Contrôle non destructif par courant de Foucault

3.2.1 Principe

Le contrôle non destructif par courant de Foucault n'est applicable que sur les pièces réalisées en matériaux conducteurs « d'un point de vue électrique » [36].

Lorsqu'on place un corps conducteur au voisinage d'un champ électromagnétique variable, il se développe à l'intérieur de celui-ci des courants induits que l'on appelle courants de Foucault.

Ces courants ont pour effet de s'opposer au flux qui leur a donné naissance. Leur intensité et leur répartition dépendent des caractéristiques physiques et de la géométrie du corps « caractéristique du matériaux, conductivité, perméabilité, forme et géométrie de la pièce ou de toute anomalie dans le matériaux tels que les défauts, les fissures etc. » [8,35,36,37]

3.2.2 Les lois de Maxwell

La répartition des champs magnétique et des courants induits dans un matériau conducteur est régie par les lois de Maxwell [8,35,37] :

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (3,1)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (3,2)$$

$$\operatorname{Rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.3)$$

→

E: Champs électrique

ε_0 : Permittivité magnétique

→

B: Induction magnétique

ρ : densité de courant.

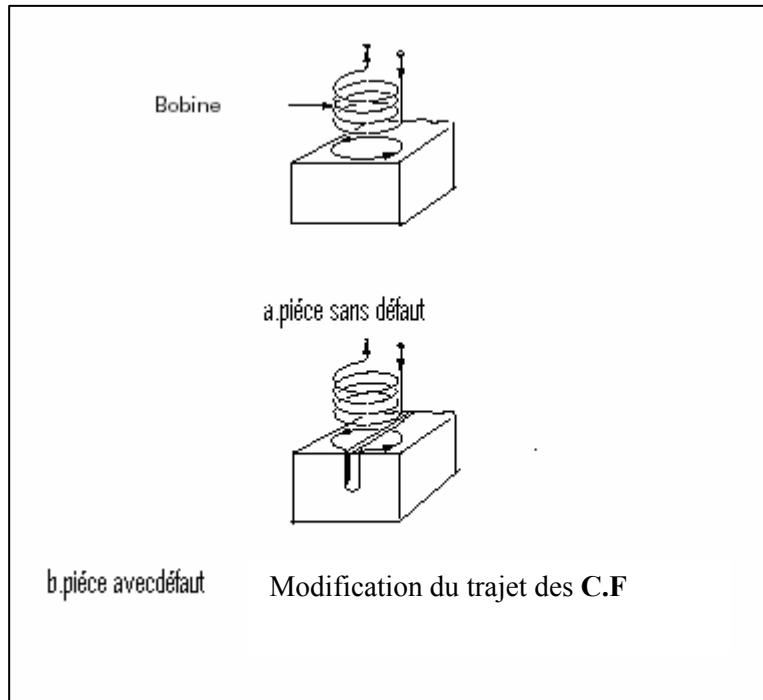


Figure 3.1: principe de la détection par courant de Foucault [35,37]

3.2.3 La répartition et la profondeur des courants de Foucault

La sensibilité de la méthode dépend de la fréquence du courant d'excitation. Celle-ci conditionne en effet la profondeur du courant induit. L'intensité du courant de Foucault décroît très rapidement dans l'épaisseur des pièces. L'équation suivante montre le rapport entre les densités du courant et la surface et un point X à l'intérieur du matériau (voir figure 3.2) [8,35,37].

$$\frac{j_x}{j_0} = e^{-\beta x} \sin(\omega t - \beta x) \quad (3,4)$$

$\frac{j_x}{j_0}$: est le rapport de la densité du courant de Foucault.

J_x : densité de courants à la profondeur x.

J_0 : densité de courants à la surface.

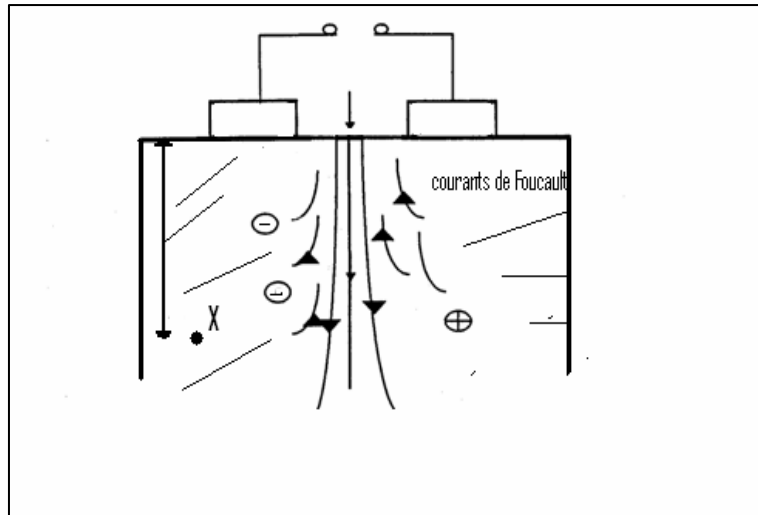


Figure 3.2: répartition des courant de Foucault [8]

La profondeur de pénétration standard est la profondeur à laquelle la densité des- courants de Foucault vaut 37% de la valeur de la surface. D'après la relation suivante la profondeur standard dépend de la résistance électrique et de la fréquence [8,37].

$$\delta = 50 \sqrt{\frac{\rho}{\mu r f}} \quad (3,5)$$

Où

f : la fréquence du contrôle (du signal traversant le capteur) en Hz.

μ_r : est la perméabilité magnétique relative (sans unité).

ρ : est la résistance électrique en micro ohms.

δ : Profondeur standard en mm.

Cette relation permet de déduire la pénétration des courants dans les matériaux. Ce paramètre est important dans la mesure ou il permet de quantifier les courants de Foucault. Ces derniers subissant un déphasage qui est fonction de la profondeur transversale [8].

$$\beta = \frac{x}{\delta} = \frac{x}{50 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}} \quad (3,6)$$

x : Etant la distance par rapport a la surface de la pièce en (mm).

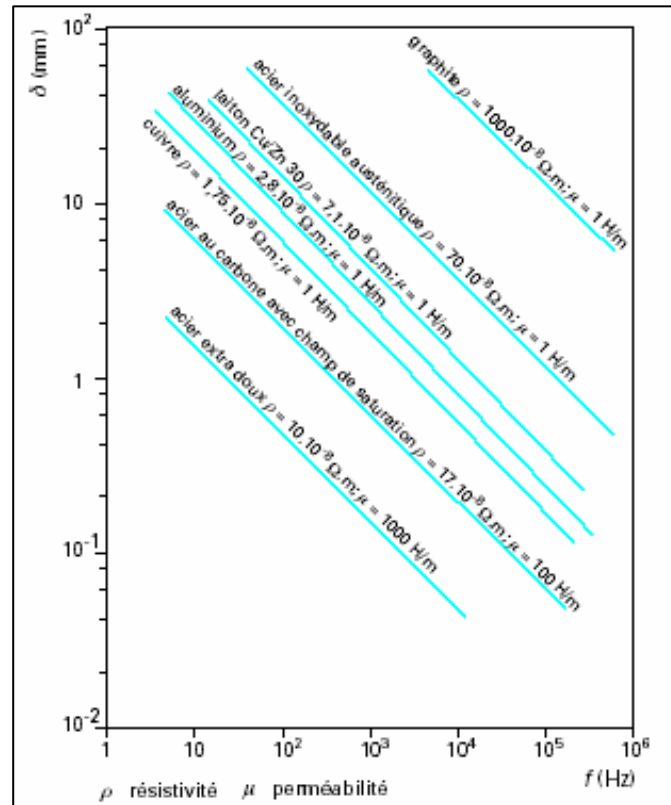


Figure 3.3: Profondeur de pénétration conventionnelle des courants de Foucault dans divers matériaux [37].

La figure 3.3 permet de connaître, en fonction de la fréquence la profondeur de pénétration pour les matériaux qui font le plus couramment l'objet de contrôle par courant de Foucault [37].

Le choix de fréquence dépend donc essentiellement de la profondeur à contrôler. Pour une fréquence très élevée, le flux total tend vers zéro (effet de peau) [8,37].

3.2.4 Principaux paramètres d'influence

L'interprétation des résultats du contrôle par courants de Foucault est obtenue indirectement en connaissant la valeur de l'impédance du capteur à tout moment du contrôle.

Un capteur à courant de Foucault sans la présence d'un échantillon à contrôler, possède une valeur z_0 dite impédance à vide, dont les parties résistives et inductives sont successivement R_0 et L_0 [8,37].

La présence de l'échantillon modifiée la valeur de l'impédance du capteur Z_1 dont la partie résistive est R_1 et la partie inductive est L_1 .

Trois types de paramètres influent sur le contrôle par courants de Foucault :

— *les paramètres liés au couplage entre la ou les bobines et le matériau* ; il s'agit dans le cas d'une bobine plate de la distance entre celle-ci et la surface du métal (entrefer ou lift off) et dans celui d'une bobine encerclant du coefficient de remplissage, rapport entre section de la barre et celle de la bobine. Ces paramètres ont beaucoup d'influence sur les courants de Foucault ;

— *les paramètres liés au matériau à contrôler* ; il s'agit de la conductivité électrique σ et la perméabilité magnétique μ et surtout, de leurs variations locales. Ces variations, souvent imprévisibles, ont une influence déterminante sur la circulation des courants de Foucault. Leurs origines sont des plus diverses : présence de contraintes résiduelles importantes localement dues à la fabrication elle-même, zone localement décarburée ou recarburée ;

— *les paramètres électriques liés au capteur et à son alimentation et constituant les paramètres de réglage du contrôle* : fréquence d'excitation de la bobine et intensité de magnétisation [37].

3.2.5 Avantages, inconvénients et domaines d'application

Les avantages des courants de Foucault tiennent à leur facilité de mise en œuvre et la rapidité possible de contrôle ou de mesure, l'information à obtenir peut être extraite soit de l'amplitude, soit de la phase du signal qui peut faire l'objet de tout traitement informatique actuel associées aux appareils. Les bancs de mesure peuvent être robotisés pour obtenir des précisions de mesure de l'ordre de 1%.

Par contre, il est nécessaire de préparer très soigneusement le banc de mesure pour n'extraire que le seul signal utile parmi les signaux dus à des nombreux paramètres susceptibles d'intervenir sur la qualité de l'information.

Les courants de Foucault constituent un moyen de contrôle particulièrement fidèle, les plus faibles variations du signal étant exactement reproduites lors d'un second contrôle dans les mêmes conditions, même si la complexité des paramètres concourant à la formation du signal ne permet pas de retrouver l'origine de chaque influence. Cette caractéristique est particulièrement intéressante en maintenance des matériels, notamment pour suivre leur-évolution lors des contrôles périodiques [8,35,36,37].

3.3 Contrôle non destructif par ultrason

Contrairement à la technique précédente, le contrôle par ultrason se prête bien au contrôle de cœur de pièce, même très épaisse (jusqu'à plusieurs mètres).

Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans les milieux élastiques, des modifications locales du milieu parcouru engendrent des perturbations dans la propagation de l'onde. Les vitesses de propagation des ondes étant grandes (5850 m/s en onde longitudinale 3250 m/s onde transversale pour l'acier) et des distances à contrôler faibles (quelques dixièmes à quelques centaines de millimètres), les chocs de défauts et de fond sont donc très proches de l'écho d'émission (quelques micro-secondes) [8,38,39].

Les ultrasons sont des ondes de fréquence supérieure à 20 KHz dans les milieux métalliques, les fréquences généralement utilisées vont de quelques centaines de kilohertz à quelques dizaines de mégahertz. Dans ce domaine de fréquence d'amortissement dans l'air et tel qu'elle ne s'y propagent pratiquement pas [8,39,40].

3.3.1 Types d'ondes

Les ondes ultrasonores sont caractérisées par la longueur d'onde λ : la distance qui sépare deux zones comprimées ($\lambda = v/f$). La vitesse de propagation qui ne dépend que du matériau dans lequel les ondes se déplacent. Le mouvement imprimé aux grains du matériau caractérisé par sa fréquence (f). Il existe trois types d'ondes :

- Les ondes longitudinales ou de compression.
- Les ondes transversales.
- Les ondes de surfaces.

3.3.1.1 Les ondes longitudinales

Les particules constituant le milieu se déplacent parallèlement à la direction de propagation ce qui provoque des contraintes de compression et de traction, entraînant un changement de volume dans la région où elles se propagent (figure 3.4)

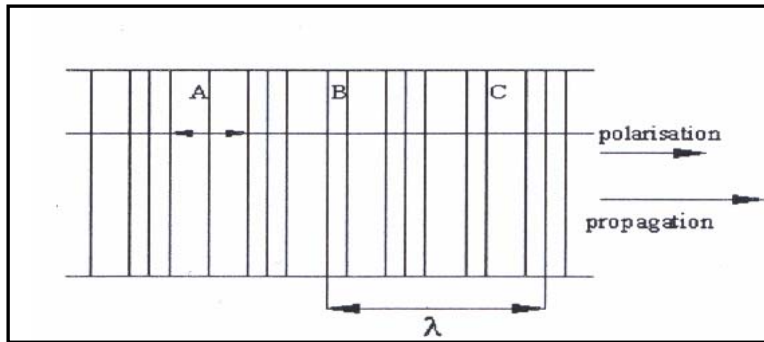


Figure 3.4: Onde longitudinale [8]

3.3.1.2 Les ondes transversales

Les mouvements des particules et perpendiculaire au sens de propagation, les contraintes provoqué sont donc de cisaillement. Comme la montre la figure 3.5 ces ondes se propagent dans les solides sans changement de volume. Seules les solides présentent une rigidité permettent la transmission des ondes transversales.

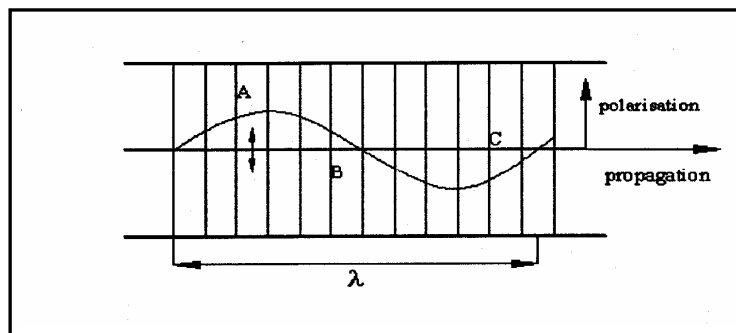


Figure 3.5 Onde transversale [8]

3.3.1.3 Les ondes de surfaces

A la surface du corps solide se propagent des ondes de surface qui sont des ondes composites constitué à la fois par des déplacements longitudinaux est transversaux déphasés de $\pi/2$ et contenue dans le plan sagittale ces ondes sont à peut près analogue aux ondes qui se propagent dans l'eau et le mouvement des particules est simultanément parallèle et perpendiculaire à la direction de propagation [8,38,40].

3.3.2 Impédance acoustique

L'impédance acoustique est définie par analogie d'une onde dans un milieu isotrope et une ligne de transmission électrique. L'impédance acoustique « Z », d'une onde plane, dans un milieu isotrope comme le rapport de la contrainte sur la vitesse de déplacement des particules [8,38].

Pour une onde longitudinale : $Z_l = (\lambda + 2 * \mu) / C_l = \rho * C_l$ (3,7)

Pour une onde transversale : $Z_t = \mu / C_t = \rho * C_t$ (3,9)

Où μ et λ sont les coefficients de lamé.

3.3.2.1 Réflexion et transmission sous incidence normales

En incidence normale lorsqu'il y a deux interfaces successives suffisamment rapprochées. Il peut y avoir un phénomène d'ondes stationnaires, ce la peut être par exemple le cas pour une plaque à face parallèles, immergée dans l'eau.

Au niveau de chaque interface une partie de l'onde ultrasonore est transmise et réfléchi. Au sein du milieu 2 il y a donc tout une succession de réflexions multiples.

L'onde ultrasonore est de très courte durée et ce phénomène ne peut alors se produire que les différentes ondes puissent combiner entre elles. Il faut cependant remarquer que c'est un problème qui se rencontre en particulier au niveau des protections des transducteurs et du contrôle avec des films de couplage comme cela est schématisé à la figure 3.6.

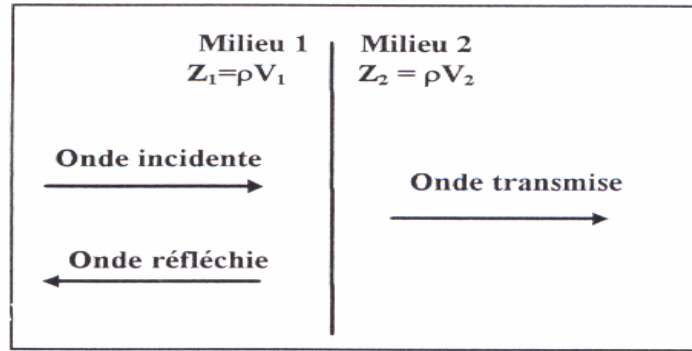


Figure 3.6: Propagation d'une onde ultrasonore plane normalement à la surface de séparation de deux milieux d'impédance acoustique Z_1 et Z_2 [8]

3.3.2.2 Réflexion et transmission sous incidence oblique phénomène

Lorsque une onde plane rencontre la surface de séparation de deux milieux d'impédance différents sous incidence oblique, il se produit des conversions de mode.

L'onde acoustique incidente est alors réfléchie et réfractée sous plusieurs angles, avec changement de sa polarisation. Les ondes réfléchis et transmis ont des directions déterminées par les lois de Descartes

Si l'on parle de l'onde incidente longitudinale dans le milieu 1 (vitesse V_{L1}) à l'incidente θ_1 , celui-ci est réfléchi sous le même angle θ_{T1} , mais elle donne lieu également à une onde transversale réfléchi dans le milieu 2 (vitesse V_{t1}) sous l'angle θ_{r2} et deux ondes réfractées dans le milieu 2, d'une longitudinale et d'autre transversale de vitesse V_{L2} et V_{T2} , sous des angles θ_{T1} et θ_{T2} respectivement comme le montre schématiquement la figure 3.7[8.38.3941].

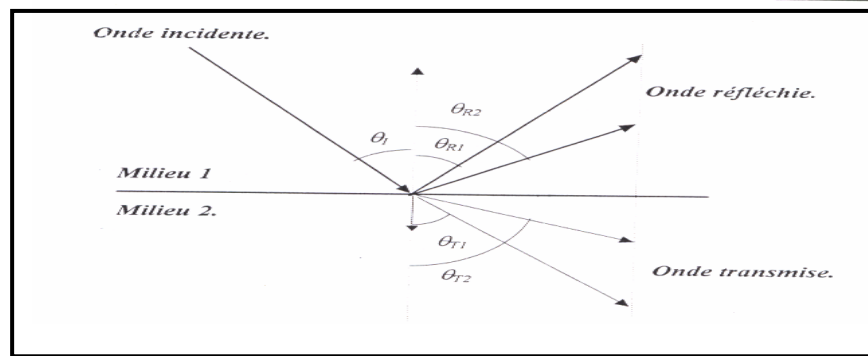


Figure 3.7: Double réflexion et réfraction des l'ultrasons à la frontière entre deux milieux, avec conversion de mode [8]

3.3.3 Atténuation des ondes ultrasonores

Dans un milieu parfaitement homogène et isotrope. La pression acoustique d'un faisceau ultrasonore n'est pas atténuée que dans le champ lointain celle-ci décroît de manière inversement proportionnelle à la distance séparant de la source.....

$$P = P_0 \exp(-\alpha x) \quad (3,10)$$

Ou P_0 : amplitude initiale

P : Amplitude après un parcours x

Cependant les matériaux naturels ne sont jamais idéaux. Ils produisent une atténuation plus au moins prononcée des ondes ultrasonores. L'atténuation de l'onde est toujours d'autant plus importante que la fréquence est élevée cette atténuation de l'onde est due principalement à deux phénomènes qui se superposent, l'absorption et la diffusion [8.38]

3.3.3.1 L'absorption

L'absorption est la conversion de l'énergie ultrasonore en chaleur à cause des frottements internes au sein du matériau. Cette absorption se traduit uniquement par une- atténuation de l'onde en fonction de sa propagation, certains expliquent ce phénomène par la théorie de dislocation celle- ci démontre que le matériau présentent un effet plus au moins important lorsque l'épaisseur du joint et de l'ordre de la longueur d'onde. La dépendance de- l'absorption

de la fréquence est difficilement contrôlable des études expérimentales ont montré que pour les fréquences faibles non pas celles utilisées en CND [8.38].

L'absorption varie selon la loi linéaire suivante : $\alpha = f * C_1$ (3.11)

Avec

C_1 : Constante qui dépende du matériau

f : Fréquence

3.3.3.2 La diffusion

La diffusion de l'onde ultrasonore est analogue au phénomène observé avec un- faisceau lumineux par temps de brouillard, les matériaux dans les quels les ondes ultrasonores se propagent ne pas strictement homogènes. Cette hétérogénéité peut correspondre aux grains d'un milieu poly cristallin, aux différentes phases d'un alliage.

Importances de la diffusion dépend des caractéristiques des hétérogénéités cette diffusion est d'autant plus importante que les hétérogénéités sont grandes comparées à la longueur d'onde (que la diffusion augmente lorsque la fréquence augmente ou que par exemple la grosseur des grains augmente). Si la taille moyenne des cristaux est grande devant la longueur d'onde il y a diffusion des ultrasons ; En effet les joints des grains représentent des obstacles importants pour les ondes ultrasonores, quand la longueur d'onde est la dimension des cristaux sont du même ordre, il y a diffraction des ondes ultrasonores [38].

Si les grains sont orientés en désordre, l'onde ultrason rencontre souvent lors de son passage à travers le matériau, des caractéristiques mécanique différentes devant et derrière les joints des grains, le résultat est une diffusion acoustique plus au moins prononcée selon le degré d'anisotrope.

3.3.4 Techniques de contrôle ultrasonore

Les ultrasons, aux fréquences utilisées (1 à 10Mhz), ne se propagent pas dans l'air. Pour assurer le passage des ultrasons entre le traducteur et la pièce à contrôler, il faut placer entre les deux un milieu dit le couplage.

Deux techniques existantes pour assurer ce couplage ; le contrôle par contact et par immersion [8,38].

3.3.4.1 Contrôle par contact

Le traducteur est directement placé sur la pièce à contrôler. La liaison acoustique est assurée par un film de couplage qui est généralement soit une graisse ou un huile soit de la colle cellulosique, soit des gels spéciaux. L'épaisseur du film de couplage est l'onde du dixième de millimètre.

Cette technique est surtout employée lors de contrôles manuels, c'est-à-dire lorsque le déplacement traducteur est assuré par un opérateur.

3.3.4.2 Contrôle en immersion

La pièce à contrôler est immergée dans un liquide de couplage : le plus souvent de l'eau, parfois du pétrole, plus rarement du huile.

Le palpeur n'étant pas en contact avec la pièce à contrôler, la hauteur de fluide intervient dans le trajet effectué par les ultrasons [8,39,41].

CHAPITRE 4

PARTIE EXPERIMENTALE

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes techniques expérimentales utilisées lors de la réalisation de ce travail.

Les manipulations et les différentes opérations concernant l'élaboration et la caractérisation des échantillons sont présentées dans cette partie par ordre chronologique.

4.2 Elaboration des revêtements

4.2.1 Choix des substrats

Nous avons utilisé dans ce travail des substrats de nature métallique :

- *un acier ordinaire allié de type 25CD4* (acier faiblement allié employé dans la construction mécanique) ;
- *un acier inoxydable de type 304L* (acier inoxydable austénitique très utilisé dans la fabrication de pièces mécaniques nécessite une bonne résistance mécanique et travaillant dans des milieux oxydants et corrosifs) ;
- *un alliage d'aluminium à haute résistance de type 7075* (alliage à durcissement structural utilisé en aéronautique, armement, sport... etc.)

Ces nuances sont très utilisées dans la fabrication de pièces mécaniques, particulièrement dans le domaine des turbines à gaz, les équipements aéronautiques et aérospatiales, etc.

La composition chimique ainsi que les propriétés de ces nuances sont données respectivement dans les tableaux 4.1 et 4.2

Tableau 4.1: Composition chimique de : a) L'acier 25CD4, b) L'acier 304L, c) L'alliage 7075.

(a)

Elément	C	Cr	Mn	Si	Mo	P	S
Poids (%)	0,22 à 0,29	0,90 à 0,120	0,60 à 0,90	0,15 à 0,40	0,15 à 0,25	Max 0,035	Max 0,035

(b)

Elément	C	Cr	Mn	Si	Ni	S	P
Poids (%)	Max 0,03	18-20	2	1	18-12	0,03	Max 0,045

(c)

Elément	Al	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Fe	Si
Poids (%)	Bal	5,9	2	1,32	0,2	0,12	0,42	0,19

Tableau 4.2: Propriétés physiques et mécaniques de : a. L'acier 25CD4, b. L'acier 304L , c. L'alliage 7075.

(a) Caractéristiques mécaniques	25CD4
Dureté HB	230à390
Limite élastique RP0.2 (MPa)	510
Allongement (%)	14

(b) Caractéristiques physiques et mécaniques	304L
Densité (g/cm ³)	7,9
Résistivité électrique (Ωcm)	$7,2 \cdot 10^{-5}$
Dureté, Rockwell B	92
Résistance à la traction (MPa)	572
Résistance à la traction (plastique (MPa))	290
Allongement à la rupture (%)	50
Module d'élasticité (GPa)	200
Limite élastique (MPa)	241
Résilience (J)	58

(c) Caractéristiques physiques et mécaniques	7075
Masse volumique (g/cm ³)	2.80
Intervalle de fusion	475-630
Coefficient de dilatation linéique (0 à 100 °C) (°C-1.106)	23.5
Module d'élasticité (MPa) (1)	72000
Coefficient de Poisson	0.33
Conductivité thermique (0 à 100°C) (W/M°C)	État T6 : 130
Résistivité à 20°C (μΩcm)	État T6 : 5.2
Capacité thermique massique (0 à 100°C) (J/kg°C)	915
Limite élastique RP0.2 (MPa)	470 (1)
Limite à la rupture Rm (MPa)	535 (1)
Allongement (%)	8 (1)
Limite élastique RP0.2 (MPa)	390 (2)
Limite à la rupture Rm (MPa)	475 (2)
Allongement (%)	7 (2)
Dureté HB	~152

(1) Tôle laminée état T6, épaisseur entre 3.2 et 6 mm (2) Tôle laminée état T7351, épaisseur entre 6 et 25 mm

4.2.2 Préparation des substrats

Les échantillons sont de formes cylindriques de 25mm de diamètre et 20mm d'hauteur, on a choisi cette hauteur pour permettre la dissipation de l'importants flux thermique transmis par la torche lors de la projection HVOF.

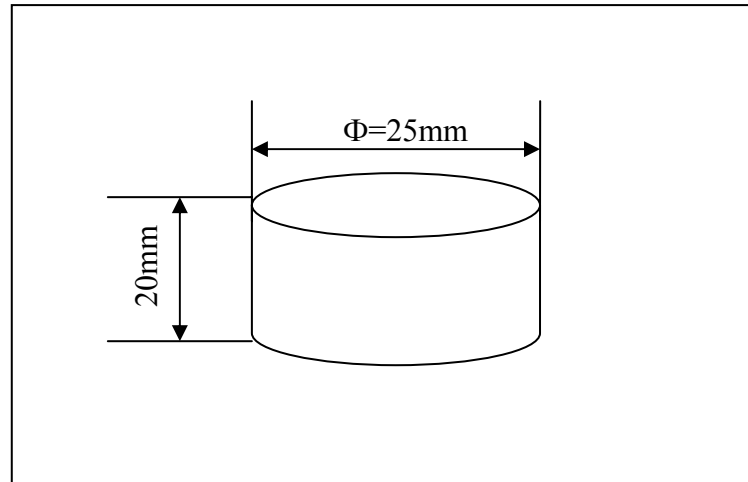


Figure 4.1: Forme d'échantillon.

4.2.2.1 Nettoyage des substrats

Un *dégraissage alcalin* nécessaire à l'élimination de toute matière contaminante (graisse, huile, poussières)

4.2.2.2. Sablage des échantillons

La *rugosité* de la surface de la pièce traitée est un facteur prépondérant permet 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 adhérence des dépôts.

La création de rugosité est effectuée par sablage (au corindon) permettant aussi un nettoyage complémentaire de la pièce après le dégraissage alcalin. Les paramètres de sablage utilisés dans ces travaux sont présentés dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3: Paramètres de sablage utilisés.

Type de sableuse	Sableuse à pression
Type d'abrasif	Corindon blanc
Granulométrie moyenne	400µm
Pression d'air comprimé	1,5 bar
Distance	120mm
angle	75

4.2.3 Poudre utilisées pour la projection

La poudre métallique à base de cobalt (tribaloy[®]-400) à été utilisé pour la construction de dépôts , dur, dense et avec de bonnes propriétés tribologiques.

La composition chimique de cette poudre ainsi que la méthode de sa fabrication sont données dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4: Composition chimique de la poudre T[®]-400.

poudre	Méthode de production	Elément	Co	Cr	Mo	Si	Ni	Fe	P	S
⁽¹⁾ Amdry 19155	Agglomérée et frittée	% Poids	Bal	8,50	28,69	2,46	<0,50	<0,25	<0,03	<0,03

4.2.3.1 Etuvage et mélange des poudres

La poudre est introduite dans une étuve pendant 48 heures (avant leur projection) à une température allant de 80 à 90°C, puis elle est mélangée automatiquement pendant 30mn. Cette opération permet d'éliminer toute présence d'humidité et d'assurer une bonne homogénéité de la granulométrie.

⁽¹⁾Amdry: sulzer Metco, Rignckerstrasse 16, 5160 Wohlen, Switzerland.

4.2.4 Elaboration des revêtements à la flamme supersonique HVOF

Pour élaborer les revêtements de nos échantillons le système HVOF utilisé est de type CDS (sulzer-Metco) figure 4.2.

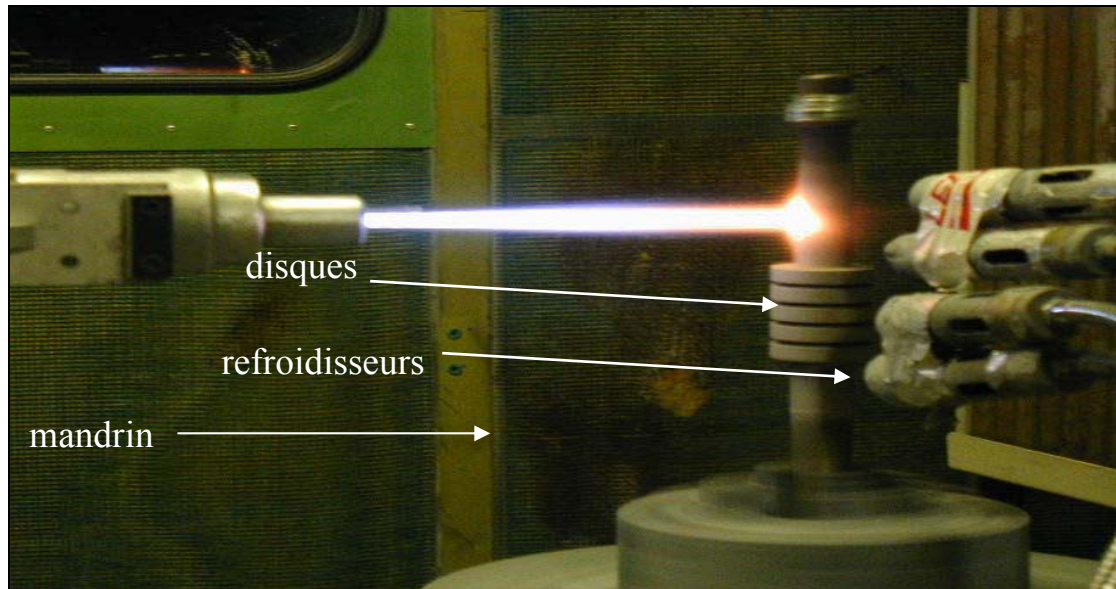


Figure 4.2: Revêtements à la flamme supersonique HVOF de type CDS (sulzer-Metco) ⁽²⁾ [LERMPS]

L'installation est constituée de :

- une cabine insonorisée ;
- un système automatisé de commande et contrôle de type PTA-2000 ;
- une source de courant PT-800A d'une puissance de 80KW
- un ensemble de manipulation de la torche et des pièces, constitué d'un robot ASEA cinq axes et un sixième axe qui permet d'assurer la rotation de la pièce ;
- un chalumeau standard de type CDS ;
- un système vidéo, qui facilite le contrôle de l'opération depuis l'extérieur de la cabine ;
- un système de refroidissement.

⁽²⁾[LERMPS] : Laboratoire d'étude et de recherche sur les matériaux, les procédés et les surfaces. UTBM, France.

Le refroidissement s'effectue par l'utilisation d'un flux d'air comprimé qui contribue aussi l'évacuation des poussières pendant la projection. Deux moyens de refroidissement sont utilisés simultanément :

- une arrivée d'air comprimé ($P=6\text{bars}$) de chaque côté de la torche ;
- deux buse ventury ($P=6\text{bars}$)

On a utilisé dans ce travail l'oxygène comme comburant et le gaz naturelle « méthane » comme combustible. Ce dernier se trouve au réseau de distribution sous une pression d'environ 300 mbars, par contre le système HVOF demande environ 06 bars donc avec un compresseur on peut augmenter la pression pour obtenir l'énergie calorifique et cinétique nécessaire pour la projection thermique. La figure 4.3 présente une vue générale de l'installation.

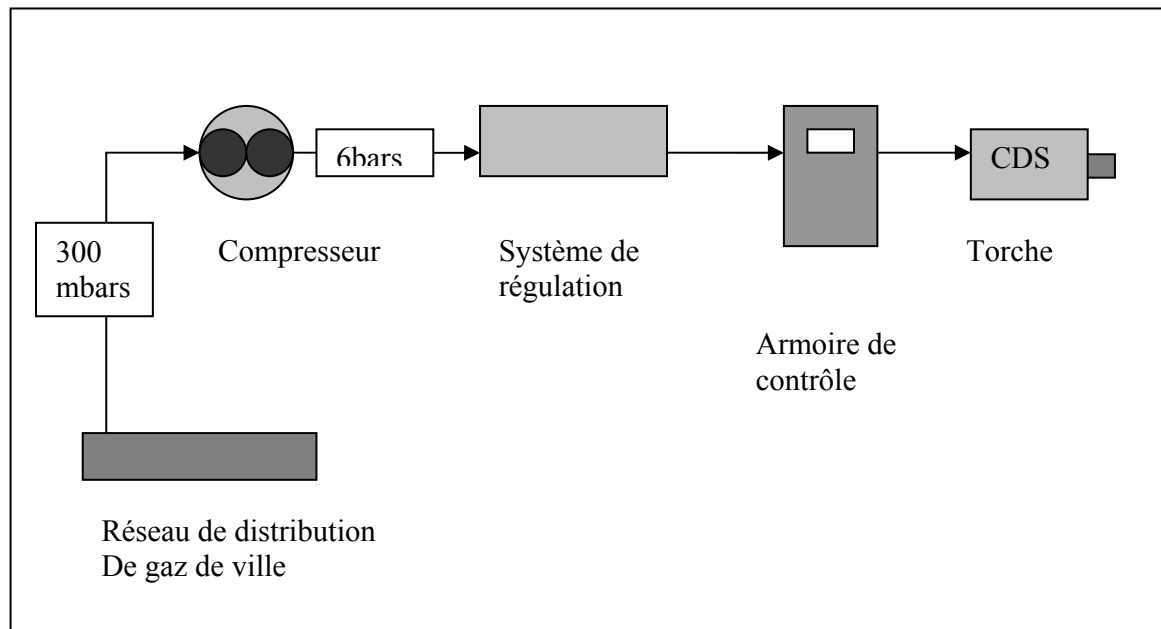


Figure 4.3: Représentation schématique de l'installation HVOF-gaz naturel.

Le choix des paramètres des gaz détermine l'énergie calorifique nécessaire pour fondre et projeter la poudre. Les paramètres retenus pour la poudre triballoy[®]-400 sont :

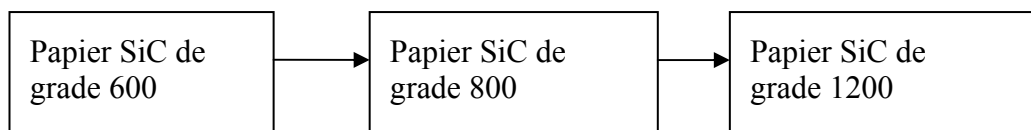
- Débit d'oxygène : 420NI/min
- Débit du combustible (méthane) : 145NI/min
- Débit du gaz porteur (N_2) : 20NI/min
- Distance de projection : 200mm
- Longueur de la buse : 3 pouces
- Débit de poudre : 40,5g/min

4.3 Techniques d'analyse et de caractérisation des dépôts

4.3.1 Préparation métallographie

Une fois les revêtements réalisés, un découpage transversal rigoureux des échantillons est effectué avec une micro-tronçonneuse afin d'éviter tout arrachement préalable des dépôts.

Le polissage mécanique, obtenu manuellement dans notre cas, vise à rendre les surfaces uniformes. Il consiste à abrader la surface, sous une charge constante, à l'aide de papiers revêtus de carbure de silicium (SiC) de grade progressif, montés sur des tourets de polissage. La diminution de la taille des grains d'abrasif d'un papier à l'autre permet d'affiner progressivement l'état de polissage et de diminuer la rugosité moyenne. La surface à polir se couvre de rayures de plus en plus fines, caractéristiques des sillons laissés par les grains de SiC. Le polissage à la main des échantillons se fait selon la séquence suivante :



Chaque séquence dure environ 5 minutes. Le polissage de finition se fait en utilisant une pâte d'alumine sur feutre. En fin, un nettoyage à l'eau et un séchage par flux d'air chaud termine le polissage mécanique.

4.3.2 Diffraction des rayons X

La technique d'analyse par diffraction de rayons X repose sur l'interaction élastique d'un faisceau monochromatique de photons X avec la matière cristallisée. La diffraction résultante aboutit à l'obtention d'un diffractogramme et permet la détermination des distances réticulaires des plans de diffraction.

L'appareillage utilisé est un diffractomètre PHILIPS-XPRT. Il est couplé à un ordinateur réalisant l'automatisation des balayages angulaires et des enregistrements. La source de rayon X est constituée d'un tube scellé à anticathode de cuivre (raie $\text{CuK}\alpha, \lambda = 1.54\text{\AA}$) couplé à un monochromateur arrière en graphite afin de filtrer le raie $\text{K}\beta$ du cuivre et éventuellement la

fluorescence de l'échantillon. Le montage utilisé permet d'obtenir des spectres par réflexion. Les phases sont identifiées à l'aide d'un logiciel associé à l'équipement.

4.3.3 Microscopie optique et analyse d'image

Les demi échantillons découpés dans le sens transversal sont examinés sans aucune attaque chimique par un microscope optique métallographique de type Axiovert 40 MAT, ZEISS permettant l'observation des échantillons, avec un grandissement qui varie de 100 à 1000. Ce microscope s'accompagne d'une caméra (DIGITAL STILL CAMERA, DSC-585), d'un micro-ordinateur. L'avantage de la microscopie optique, outre sa grande facilité d'utilisation, est de permettre l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée.

Mais compte tenu de sa faible résolution, il n'est pas possible de l'utiliser pour une observation fine d'objets rugueux de petite taille ; la microscopie électronique à balayage est alors mieux adaptée.

Les images obtenues par le microscope optique sont traitées par un logiciel d'analyse structurale par traitement d'image SCIONIMAGE.

Contrairement à l'analyse micrographique de base conduite à une interprétation qualitative des caractéristiques structurales de la microstructure observée, l'analyse d'image est une technique de métallographie quantitative, autorise quant à elle une analyse quantifiée des caractéristiques structurales d'une microstructure. Basée sur l'emploi d'une chaîne d'analyse d'image, cette méthode se décompose en quatre phases successives. Ces phases seront expliquées par un exemple traitant un segment d'image de notre revêtement pour le calcul de taux de porosités [42].

- La première phase est l'obtention à partir d'une image réelle (figure 4.4) une image numérique comporte différents niveaux de gris (figure 4.5a). Une image numérique est une fonction spatiale de l'intensité lumineuse $f(x,y)$, où x et y représentent les coordonnées spatiales d'un point constitutif de l'image et f est la brillance de ce point. Si la brillance f est portée suivant un axe verticale, une image peut être représentée par une carte topologique (courbe de niveaux) figure 4.5b.

- Dans un second temps, l'image est traitée par l'emploi de filtre en vue d'identifier les objets d'intérêts, dans notre cas les porosités ;

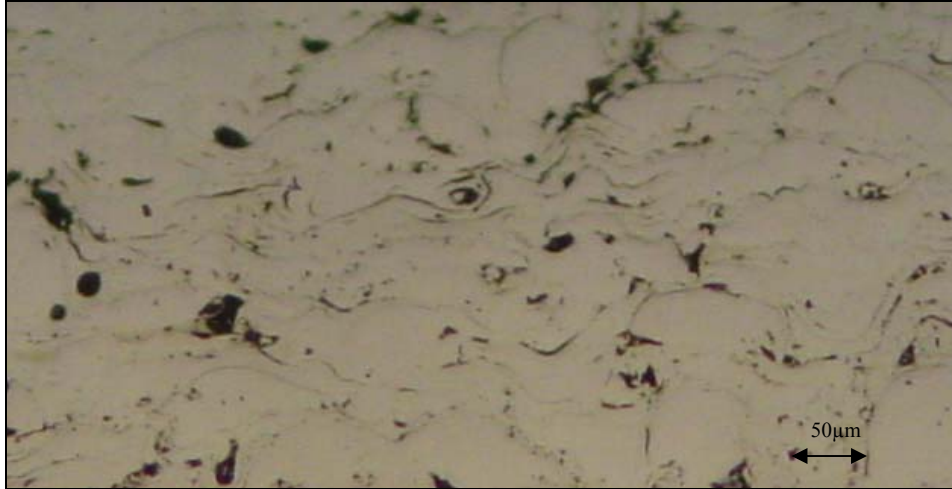


Figure 4.4: Image réelle.

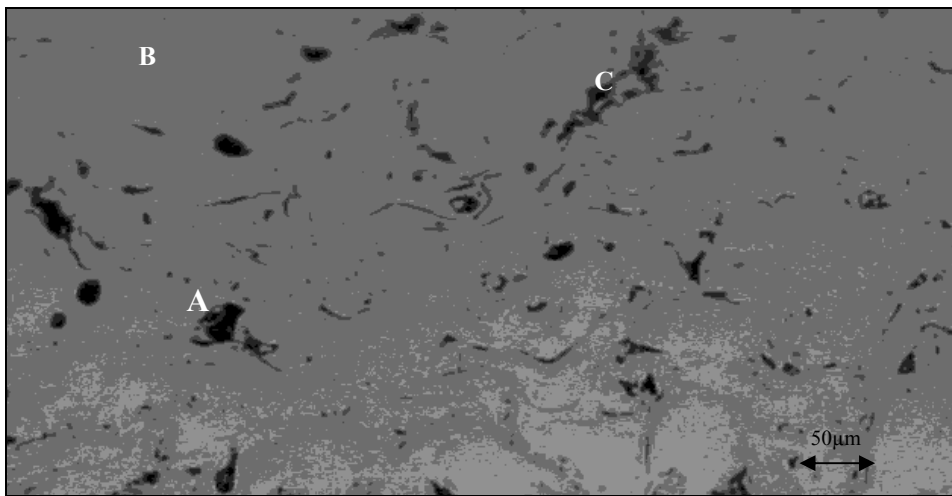


Figure 4.5a: Image numérique (différents niveaux de gris).

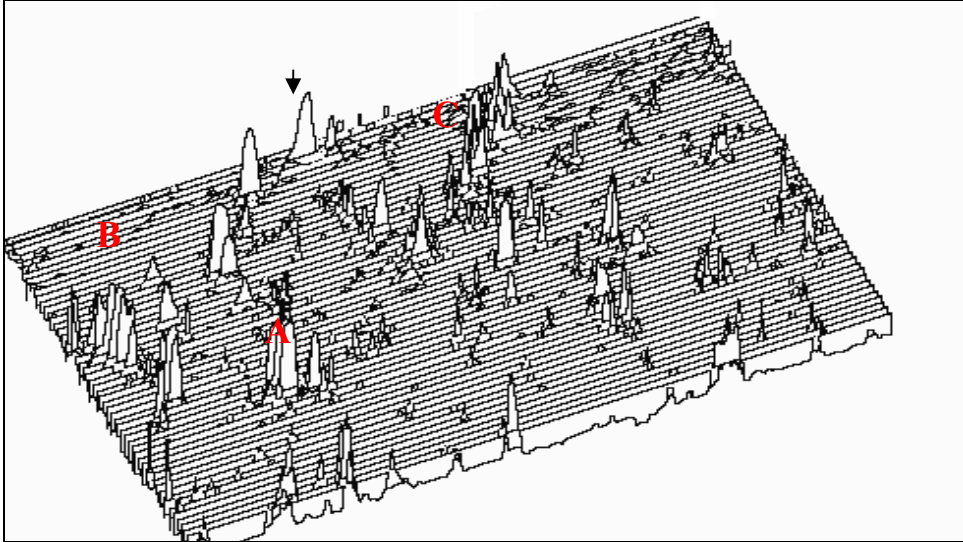


Figure 4.5b: représentation topologique.

- Dans une troisième étape, l'image est binarisée ; les pixels la constituant sont affectés d'une valeur 0 (blanc) ou d'une valeur 1 (noir) arbitrairement, par exemple, tous les pixels d'un niveau supérieur en nuance de gris sont affectés de la valeur 0. Cette binarisation permet l'identification des porosités.

La détection des porosités s'opère essentiellement après la binarisation de l'image les porosités en noir, le reste de l'image en blanc (figure 4.6.a.) et par son traitement grâce à l'emploi de filtre morphologique (figure 4.6.b.);

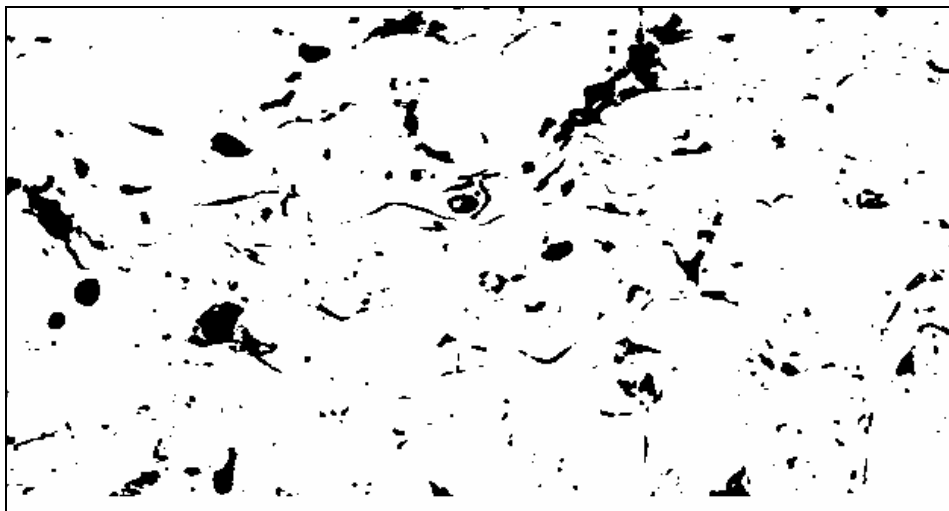


Figure 4.6a: Binarisation de l'image.



Figure: 4.6b Filtrage morphologique.

- Lorsque les objets digitaux (les porosités) sont définis et détectés, il est alors possible de conduire l'analyse morphologique proprement dite en définissant d'une part des critères morphologique (facteur de taille et de forme), et d'autre part des critères spatiaux (distribution dans le plans d'image) ainsi qu'illustre sur la figure 4.7 ;

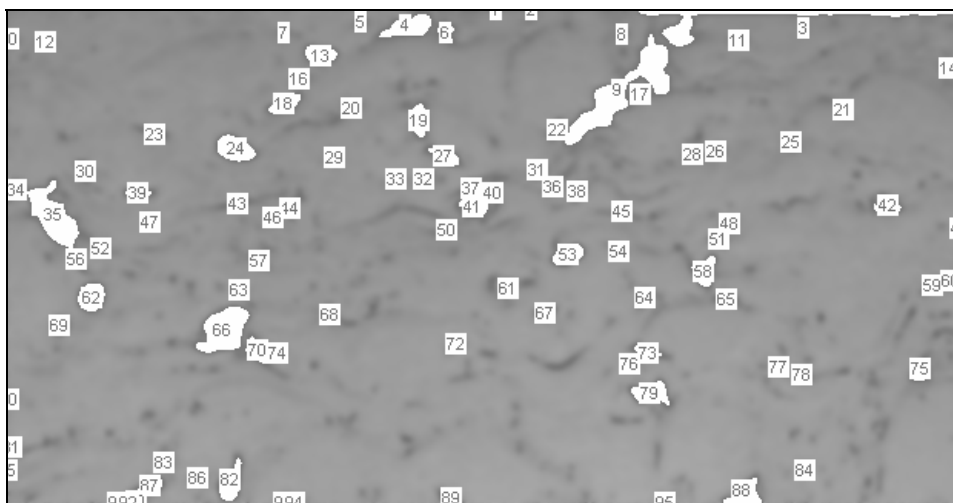


Figure 4.7: Analyse morphologique.

L'analyse statistique de ces informations par une méthode stéréologique conduit à quantifier les porosités et mesurer leurs surfaces tableau 4.5;

n°	Aire(pixel)	n°	Aire (pixel)	n°	Aire (pixel)
1	4	33	35	64	3
2	4	34	1	65	46
3	969	35	107	66	51
4	311	36	698	67	666
5	1	37	23	68	39
6	90	38	48	69	16
4	1	39	69	70	100
8	6	40	84	71	175
9	1255	41	1	72	11
10	11	42	187	73	22
11	24	43	119	74	97
12	14	44	27	75	15
13	196	45	8	76	126
14	46	46	42	77	17
15	15	47	30	78	30
16	21	48	20	79	50
17	87	49	17	80	196
18	110	50	15	81	20
19	142	51	8	82	38
20	11	52	52	83	242
21	6	53	29	84	6
23	73	54	195	85	12
24	55	55	30	86	1
25	303	56	1	87	26
26	37	57	13	88	108
27	33	58	26	89	218
28	107	59	186	90	73
29	28	60	50	91	7
30	13	61	7	92	6
31	81	62	40	93	10
32	56	63	251	94	1
				95	3
				96	2

Tableau 4.5: Nombre des porosités et leurs surfaces.

En fin et avec un simple calcul on peut déterminer le taux de porosités divisant l'aire totale de porosités (l'aire blanc) sur l'aire totale de l'image (l'aire gris+l'aire blanc).

L'aire de surface grise en pixel est : 200946 pixels

Le taux de porosité dans ce cas est la somme des surfaces de porosités sur la surface totale :

$$8962/8962+200946=0.042$$

4.3.3.1 Calcul d'épaisseur

La mesure de l'épaisseur est parmi l'ensemble des caractéristiques d'un revêtement obtenu par projection thermique, les mesures de l'épaisseur ont été réalisées par analyse d'image en utilisant le mode « distances ».

- Premièrement on divise l'image de revêtement obtenue par le microscope optique en plusieurs segments (figure 4.8).
- La longueur de chaque segment sera déterminée en divisant l'aire du segment par sa largeur.
- Ainsi, l'épaisseur moyenne de revêtement est définie en divisant la largeur totale des segments par le nombre des segments.

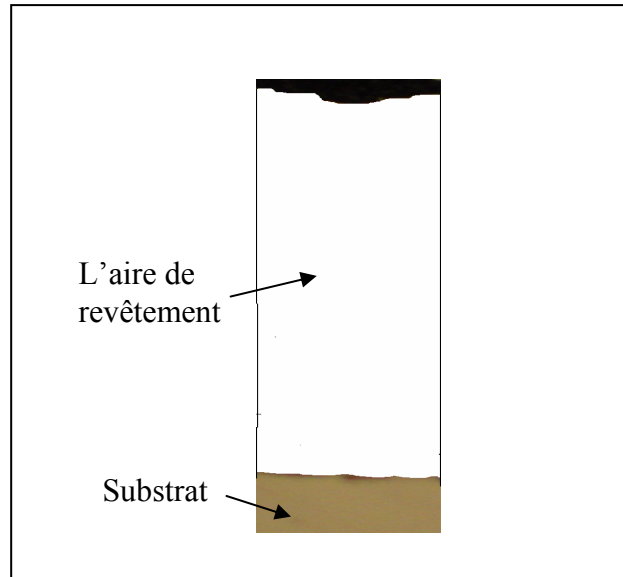


Figure 4.8: Segment de revêtement.

Enfin l'étalonnage qui permet de corréler l'aire d'un pixel à des dimensions physiques.

Pratiquement, la calibration est effectuée en définissant la distance séparant deux pixels non contigus de l'image. Cette opération est réalisée à partir de l'image d'un micromètre étalon numérisée dans des conditions identiques à elle utilisées pour acquérir les images des microstructures à analyser, ainsi qu'illustre la figure 4.9.

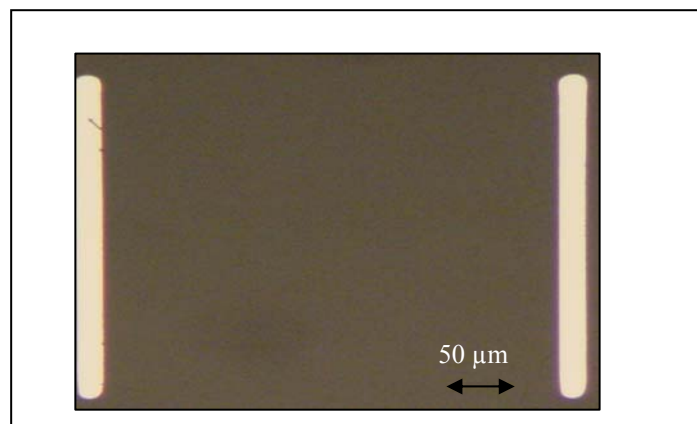


Figure 4.9: Un micromètre étalon.

4.3.4 Microscopie électronique à balayage

Le microscope électronique à balayage (MEB) utilisés est de type JEOL JSM. 5800LV, à été utilisé pour obtenir des images modulées par électrons secondaires (contraste topographique) ou par électrons retrodiffusés (contraste de numéro atomique). Toute fois qu'il a été nécessaire, le recours à l'analyse par spectroscopie dispersive en énergie (SDE), a permis de préciser la composition chimique de chaque détail.

4.3.5 Micro dureté

Cet essai consiste à mesurer l'empreinte faite dans une partie du dépôt. Les mesures de la micro dureté de dépôt ont été effectuées sur la section transversale d'un revêtement polie. Elles ont été réalisées avec un indenteur de type Vickers appliquant une charge de 0,3 Kgf à été appliquée. L'appareillage utilisé est un microduromètre de type PRSI DM2A. La valeur de la dureté obtenue résulte de la moyenne de 6 mesures.

4.3.6 Adhérence

Un indenteur Vickers est positionné à l'interface revêtement-substrat, puis actionné de façon à pénétrer perpendiculairement la surface figure 4.10. Ces indentations sont réalisées sous des charges discrètement croissantes allons de 10 à 50 N appliquées pendant 15 secondes à l'aide d'un appareil de dureté de type standard Wotpert Instron au CRC.

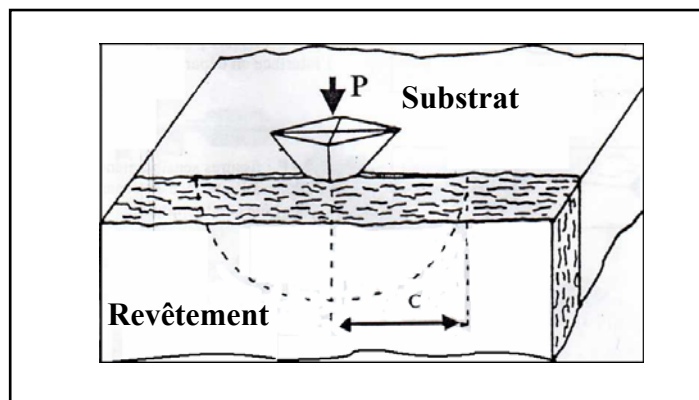


Figure 4.10: L'indentation interfaciale [2].

4.3.7 Essais de frottement et d'usure des dépôts

Une machine d'usure Amsler-A135 a été utilisée pour déterminer l'usure des revêtements par roulement. Figure 4.11. Un disque en acier 25CD4 trempé revêtu par projection HVOF (T-400).



Figure 4.11: tribomètre Amsler-A135 [LERMPS, UTBM, France].

Ce disque frotte contre un disque fait d'alliage de cuivre sus-cité (disques antagonistes), sa composition est montrée par le tableau 4.6. La figure 4.12 schématise le positionnement de chacun des disques sur la machine Amsler. Les disques sont pressés l'un contre l'autre par une charge de 245N, tandis que la vitesse radiale de disque revêtu était de $0,52 \text{ m.s}^{-1}$ et celle de disque en laiton de $0,47 \text{ m.s}^{-1}$, soit une différence de $0,05 \text{ m.s}^{-1}$ (rapport de glissement de 10%). Afin de réaliser cet essai dans des conditions plus sévères, aucune lubrification n'a été envisagée.

Tableau 4.6: composition de l'alliage de cuivre utilisé comme contre-échantillons.

Cu	Pb	Ni	Zn
Bal	1,9	1	8,1

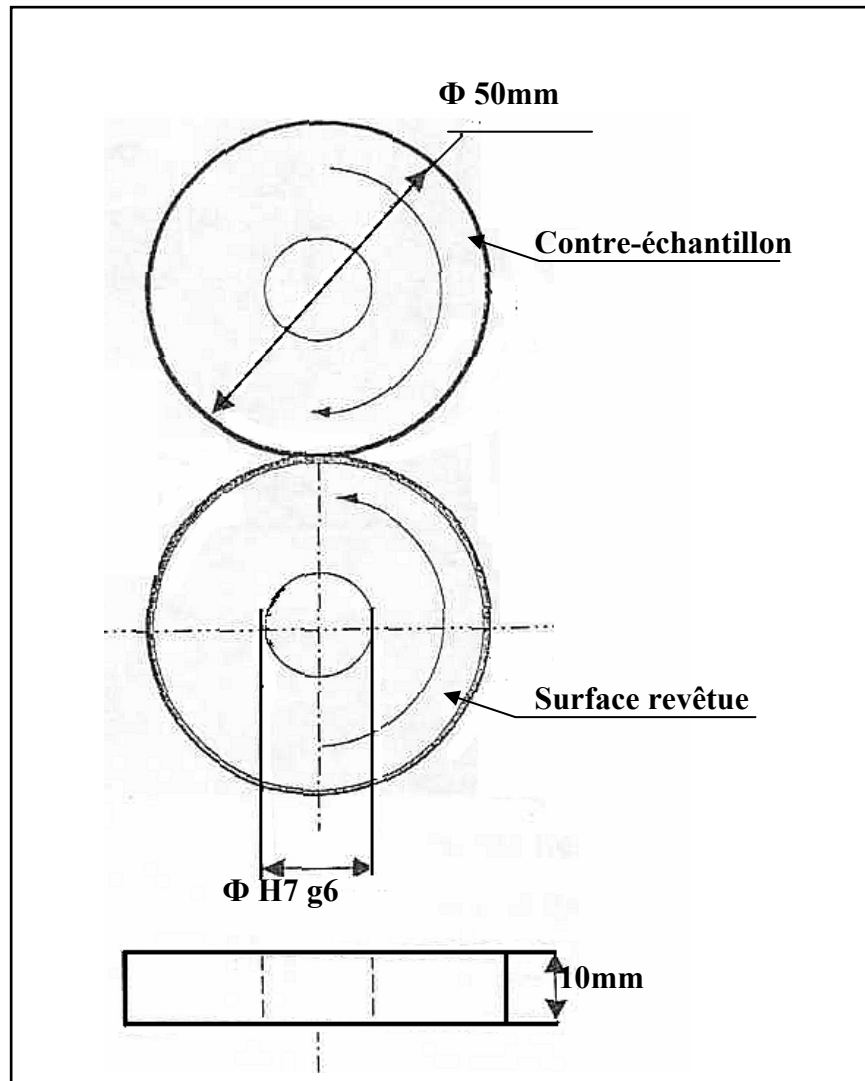


Figure 4.12: Schéma du frottement des disques (test Amsler)[2].

Notons que le disque à revêtir est monté sur un mandrin horizontal qui tourne à une vitesse de 160 tr/min, et il est balayé horizontalement par le jet du chalumeau du bas vers le haut et vis versa. La vitesse de rotation du mandrin et le nombre de passes effectuées par le chalumeau contrôle l'épaisseur du revêtement souhaitée.

4.3.8 Contrôle non destructif

4.3.8.1 contrôles non destructifs par courant de Foucault

Ce contrôle a été effectué par un appareil FORSTER, le DEFECTOMAT F2. 825. L'institut FORSTER, est l'un des premiers constructeurs d'appareil à courant de Foucault. Le FORSTER 2.825 est un appareil analogique, qui travaille avec une gamme de fréquence allant de 100 HZ à 1MHZ.

Il travaille en mode absolu et en différentiel. Sur une seule voie. Par visualisation des signaux, il permet de contrôler des surfaces fissurées, et permettre la mesure des épaisseurs.

À l'aide d'une sonde on fait un balayage micrométrique sur la surface revêtue de chaque échantillon.

4.3.8.2 Contrôle non destructif par ultrason

Le contrôle non destructif par ultrason a permis d'évaluer l'adhérence du revêtement au substrat. Une chaîne de contrôle a été utilisée pour la réalisation de cet essai.

Cette chaîne comme la montre la figure 4.13 se compose de :

- Un micro-ordinateur qui est doté d'un programme qui permet la commande des trois moteurs pas à pas de la cuve ultrasonore suivant trois axes, x, y, z, ainsi que le traitement des données et l'affichage des résultats.
- Un générateur d'impulsion électrique (émetteur- récepteur) produit à une cadence réglable des impulsions d'amplitudes élevées.
- Un oscilloscope à phosphore numérique de type TEKTRONIX série TDS 3054 connecté au micro-ordinateur via une interface IEEE 488 qui permet l'échantillonnage et l'acquisition des signaux obtenus.
- Un pupitre de commande de la cuve de type SIGE AX 416 PP qui est connecté au micro-ordinateur. Il permet la commande automatique et manuelle de chariot porte sonde suivant les trois axes.
- La cuve utilisée spécialement pour le contrôle par immersion de petites pièces plates et cylindriques, est montrée à la figure 4.5. Elle est équipée de trois chariots qui se déplacent

suivant trois axes x , y , z . Deux supports de la sonde sont fixés sur le troisième chariot que l'on peut régler à l'aide de deux pignons: L'un pour l'orientation verticale et l'autre pour l'orientation transversale. Cette cuve permet en tout cinq degré de liberté.

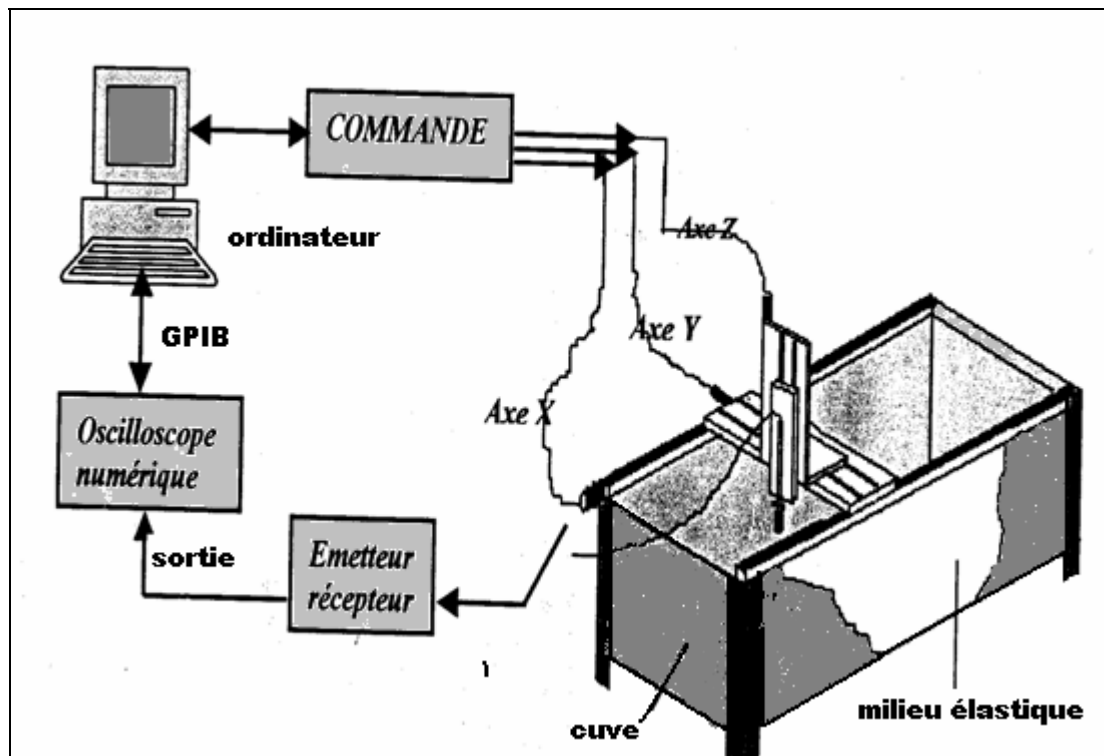


Figure 4.13 chaîne de mesure ultrasonore [8]

Les deux sondes sont utilisées simultanément dans le cas de contrôle par transmission (émetteur, récepteur) séparés dont l'une envoie l'onde et l'autre reçoit. Mais dans notre étude (contrôle par Echo) on utilise une seule sonde (même sonde qui envoie et reçoit l'onde).

La tige qui maintient la pièce à étudier est fixée sur goniomètre. Ce dernier est fixé sur un bac en plexiglas.

Pour faciliter la propagation des ondes ultrasonores on a utilisé un milieu élastique qui est l'eau douce dans lequel la pièce et la sonde sont immergées.

Le bac en plexiglas est placé dans la cuve à immersion, et repose sur deux cales de hauteur identique.

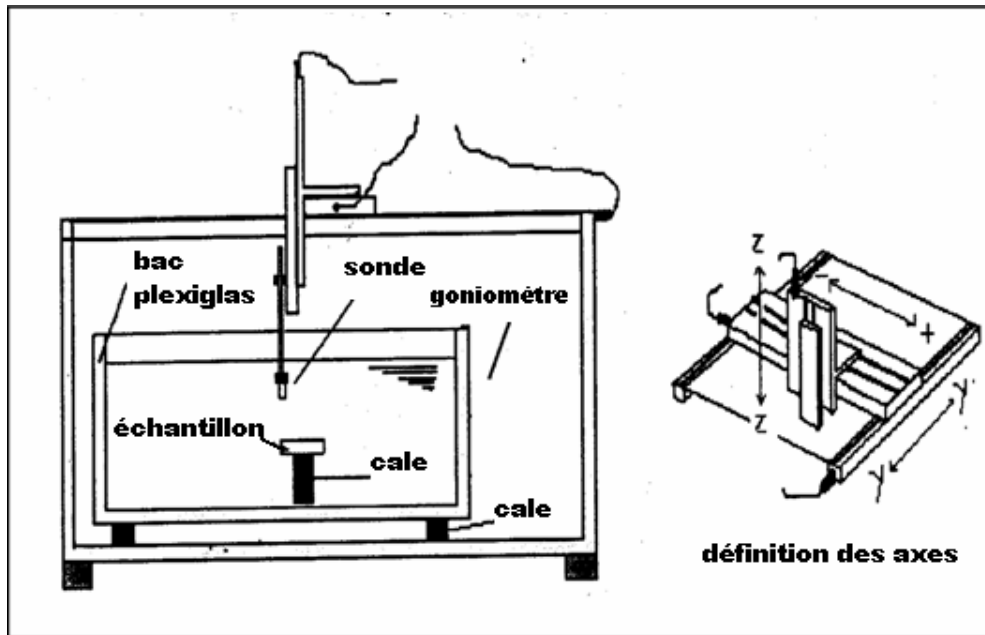


Figure 4.14 Illustration de la cuve [8]

CHAPITRE 5

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

5.1 Caractérisations chimiques et microstructurales

5.1.1 Le tribaloy[©]-400

Le T[©]-400 est un alliage métallique à base de cobalt, appartenant au système Co-Mo-Cr-Si, largement utilisé dans les applications où la lubrification s'avère insuffisante et dans un large domaine de température.

La poudre agglomérée et frittée de l'alliage T[©]-400 fait partie de la famille des superalliages, généralement utilisée pour le rechargement dure et les applications contre la corrosion et l'oxydation. La figure 5.1 montre la poudre de l'alliage T[©]-400 obtenue par microscopie électronique à balayage.

La projection thermique à la flamme HVOF de la poudre T[©]-400 a permis la construction d'un revêtement multicouches (couches superposées).

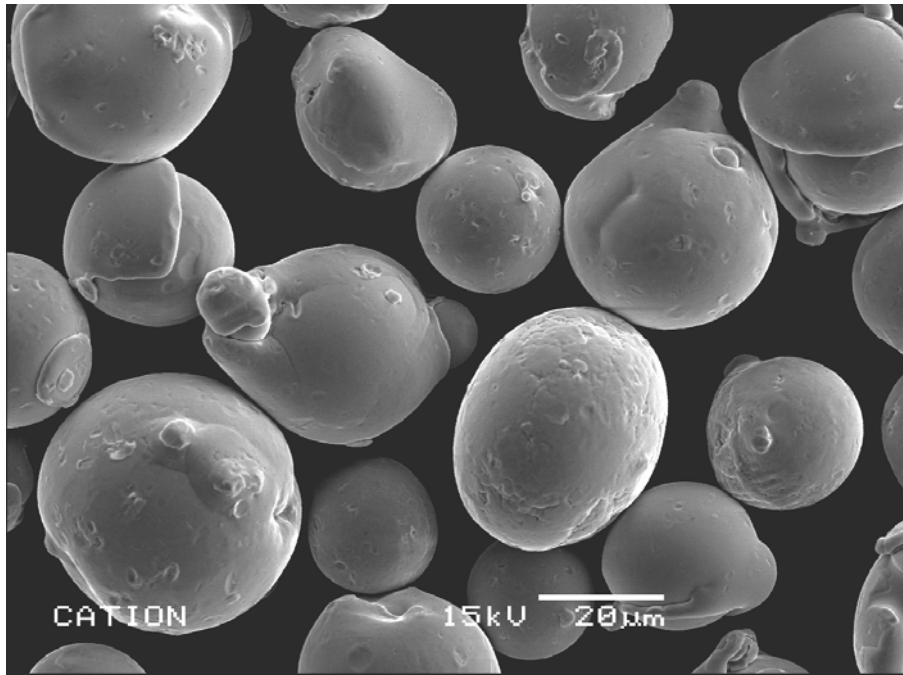
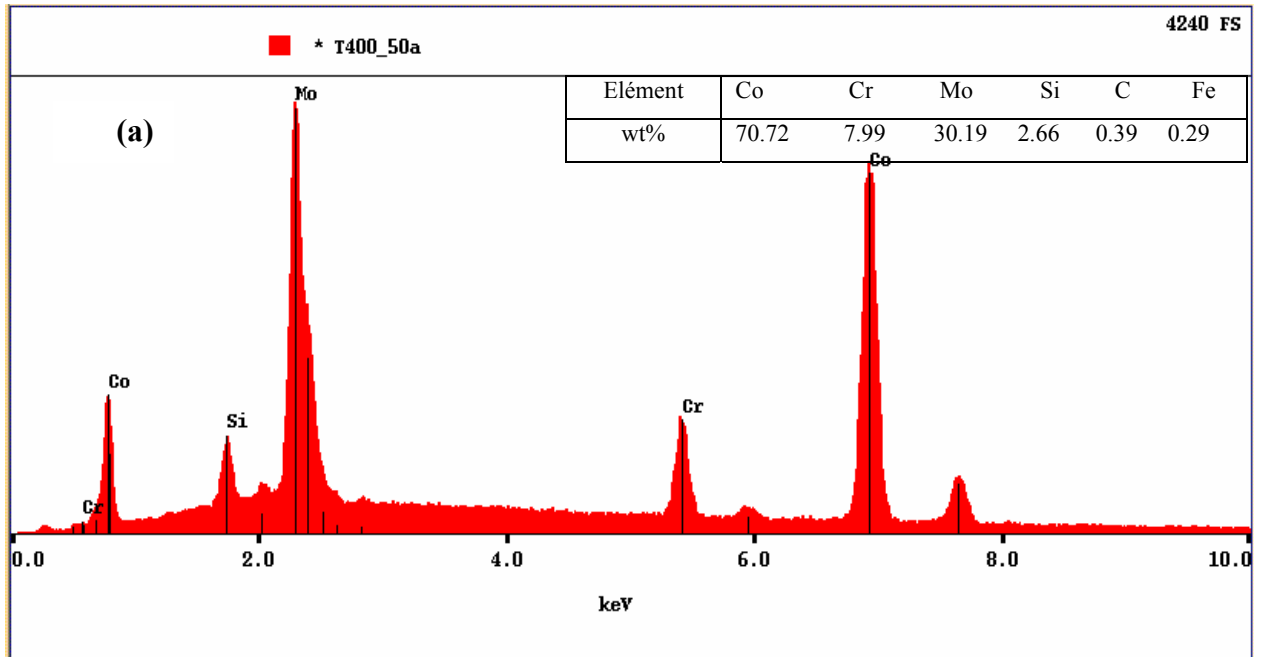


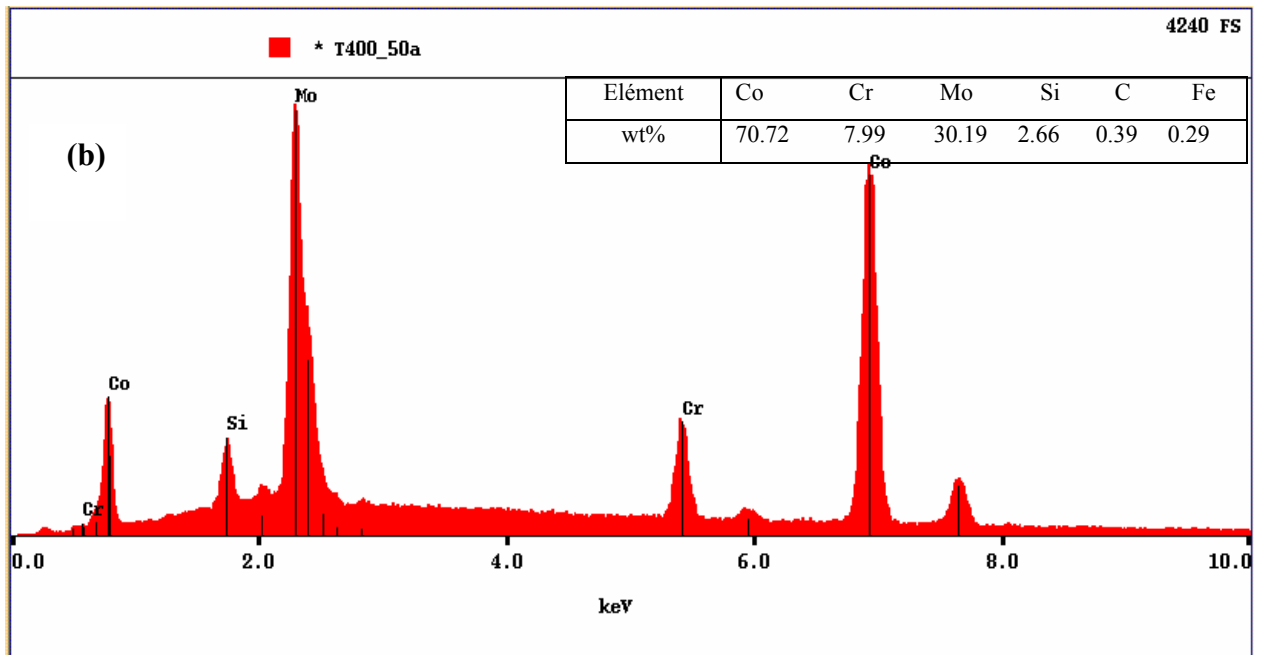
Figure 5.1: Photo MEB de la poudre T[®]-400 (Amdry 19155).

5.1.2 Analyse chimique

L'analyse chimique par spectroscopie dispersive en énergie (SDE) de l'alliage T-400, après et avant projection (poudre, revêtement) est montrée à la figure 5.2. Elle a révélée la présence de mêmes éléments (la même composition chimique), ce qui signifie que cet alliage n'a subit aucun phénomène de vaporisation lors de la projection thermique à la flamme supersonique (HVOF).



5.2.a



5.2.b

Figure 5.2. Analyse SDE de l'alliage T[®]-400. a) Poudre, b) Revêtement.

5.1.3 Analyse diffractométrique

La figure 5.3 illustre les pics de diffraction au rayon X obtenus par la poudre (figure 5.3.a) et par la réflexion sur la surface polie du revêtement (figure 5.3b et 5.3c) avec un tube anticathode de cuivre (raies $K\alpha$).

Pour connaître les structures cristallographiques on a fait une simulation entre les pics expérimentaux obtenus et des pics théoriques de la fiche (ASTM) de façon à ce que le spectre simulé coïncide le plus parfaitement possible avec le spectre expérimental (Méthodes de comparaison).

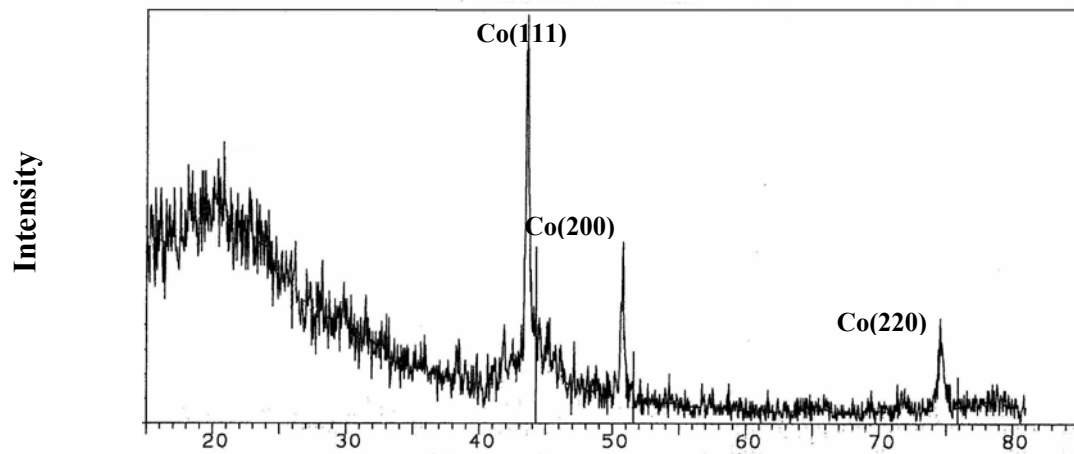
Le spectre RX de la poudre montre que parmi les différents composants (Co, Mo, Cr, Si) contenus dans la poudre le constituant principal est le cobalt (Co) cristallisé, indiqué par les intenses raies (les raies caractéristiques du cobalt).

Par contre le revêtement présente des phases de cobalt cristallisé et des phases en lattes (laves phase) de Co_3Mo_2Si et Co_3Mo_2Cr dont les raies de diffraction sont de faible intensité.

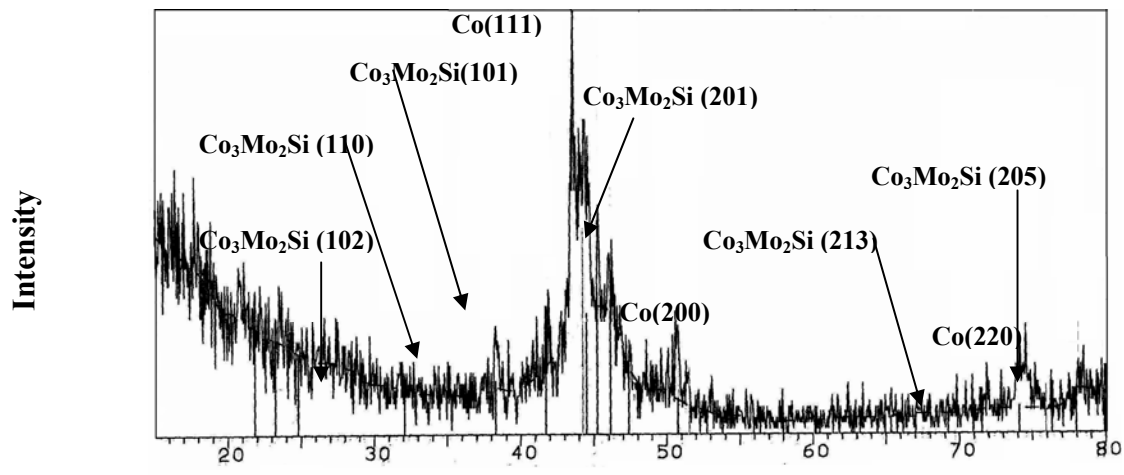
Nous remarquons que l'intensité des pics de cobalt est similaire à celle de la poudre.

La largeur des pics obtenus indique la présence de phases amorphes ou de phases extrêmement fines (nanocristallines), ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Zhang et al, pour le cas de la projection HVOF de l'alliage tribaloy[®]-800[2].

(a)



(b)



(c)

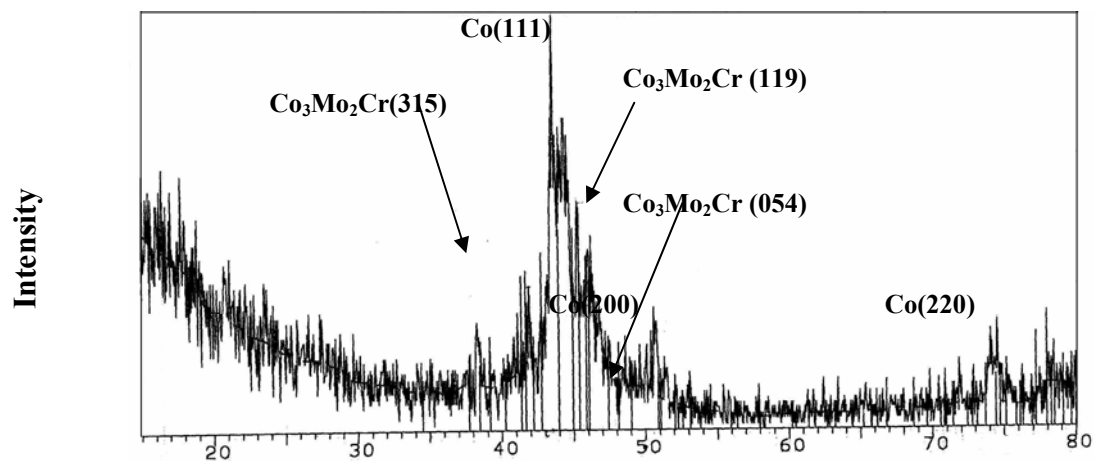


Figure 5.3: Analyse diffractométrique du tribaloy[®]-400: a) poudre, b) revêtement avec phases en lattes de $\text{Co}_3\text{Mo}_2\text{Si}$, c) revêtement avec phases en lattes $\text{Co}_3\text{Mo}_2\text{Cr}$.

5.1.4 Analyse Microstructurale

L'observation de la section transversale du revêtement fait apparaître une structure lamellaire qui résulte des oxydes formés entre les couches superposées, indiquant une oxydation durant le vol des particules fondues (figure 5.4), ces oxydes se traduisent par des porosités dans le revêtement après polissage. Notons aussi la présence des particules infondues, particules dont le séjour s'est avéré insuffisant pour avoir la température nécessaire à leur fusion.

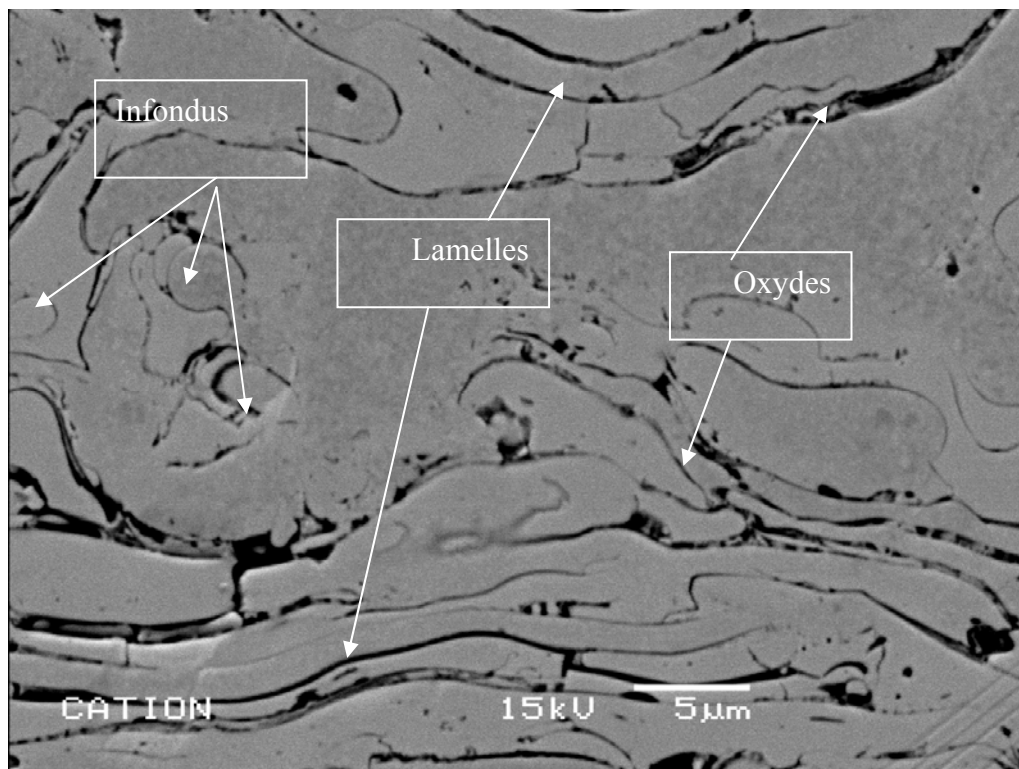


Figure 5.4: Structure du revêtement tribaloy®-400 (section transversale).

La structure lamellaire du revêtement due au bon écrasement des particules traduit les bonnes conditions de fusion des particules lors de la projection thermique ainsi que l'énergie cinétique très élevée qui leur a été transmise.

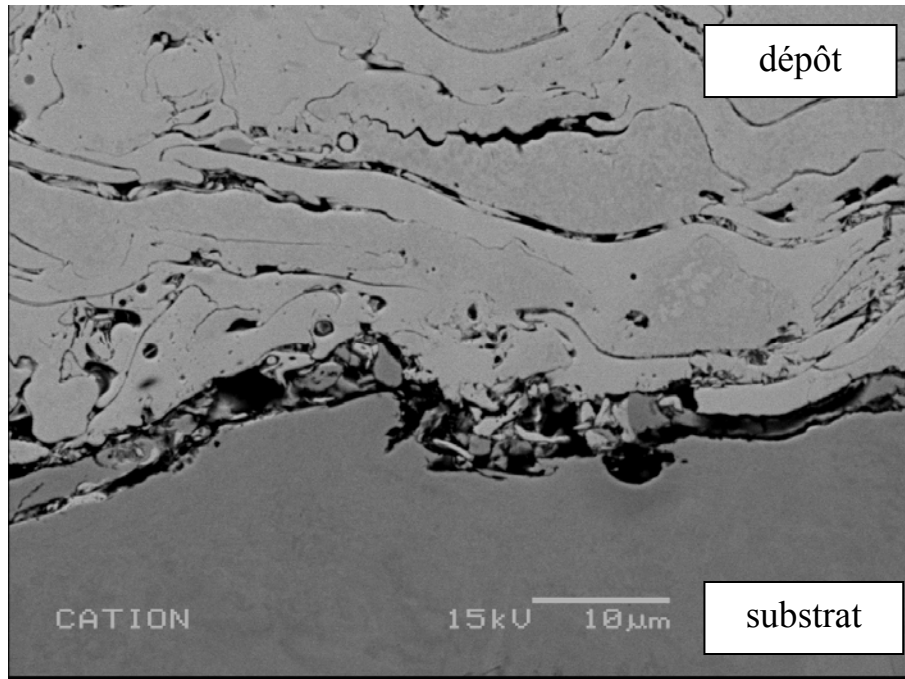
L'ensemble des micrographies obtenues par microscopie optique et électronique présentées par les figures 5.5 et 5.6, montrent quelques porosités interfaciales résultant de la préparation des surfaces avant leurs revêtements. On note la bonne cohésion et le bon encrage du revêtement avec tous les types de substrats, ce qui explique une bonne préparation des surfaces.

Ces propriétés structurales traduisent la dureté appréciable des revêtements obtenus ainsi que leur bonne adhérence. L'ensemble des résultats est reporté dans le tableau 5.1

Tableau 5.1 : Caractéristiques des revêtements élaborés.

Echantillon (Substrat)	Taux de porosité (%)	Microdureté de dépôt (HV)	Epaisseur (μm)
Inox 304L	0,4	838,9	213
Acier ordinaire 25CD4	0,6	821,4	210
Alliage d'Aluminium (7075)	0,5	788,86	209

(a)



(b)

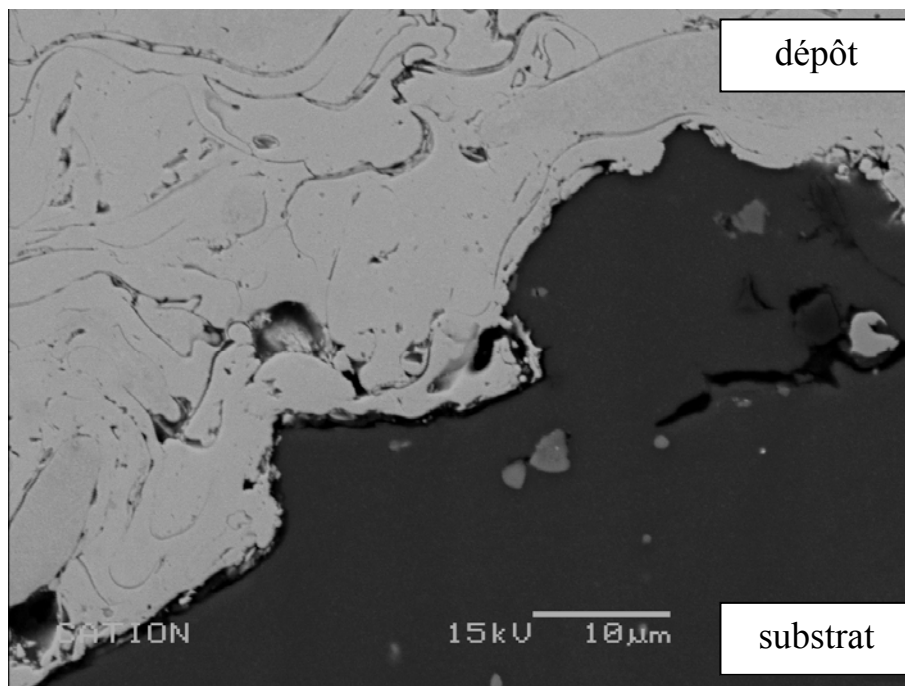
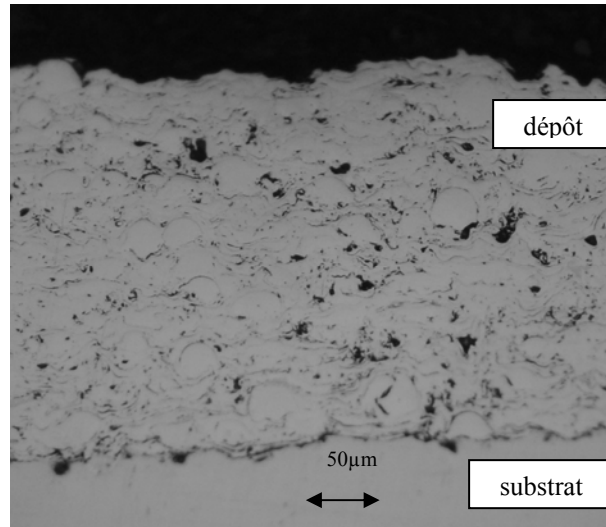
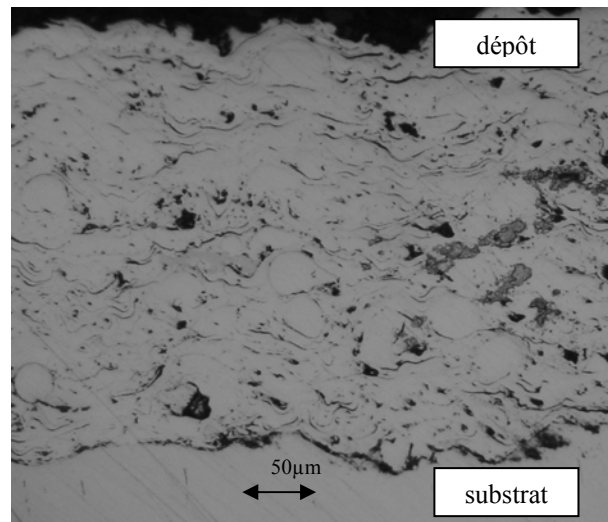


Figure 5.5: Photo MEB de l'interface dépôt/substrat, a) 304L, b) 7075.

(a)



(b)



(c)

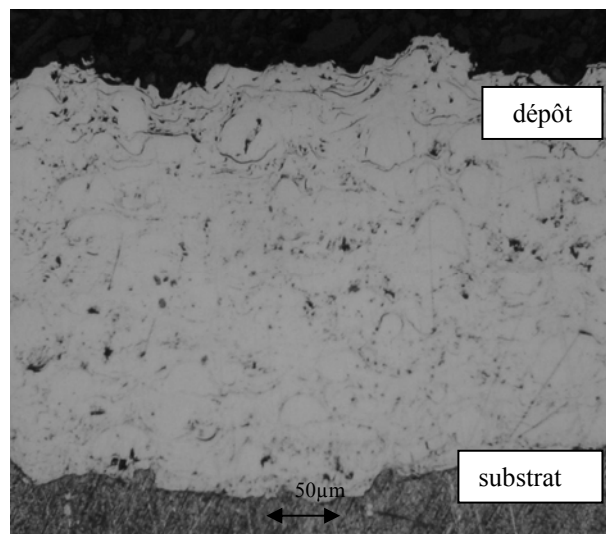


Figure 5.6: Dépôts T[©]-400/substrat, a) 304L, b) 25CD4 c) 7075

5.1.5 Microdureté

Les résultats de microduretés, obtenus sous une charge de 0,3 Kgf, obtenus sont présentés dans le tableau 5-1. En générale, et d'après ces résultats on peut dire que tous les revêtements présentent une dureté appréciable.

Nous remarquons que l'échantillon avec un substrat en alliage d'Aluminium présente une microdureté de l'ordre de 788,86 Hv et semble moins dur que les deux autres échantillons (substrat en acier ordinaire: 821,4 Hv, substrat en acier inox: 838,9 Hv), ces résultats peuvent s'expliquer soit par la vitesse des particules à l'impact sur le substrat (un bon écrasement des particules implique une bonne dureté) soit par la structure des particules (laves phases, les carbures). On peut noter que le taux de porosités du dépôt influe aussi sur sa dureté (la dureté diminue avec l'augmentation du taux de porosités du dépôt).

5.1.6 Porosité

Les mesures de porosité ont été réalisées par analyse d'image à partir des niveaux de gris sur les micrographies des dépôts.

Le dépôt obtenu a une faible porosité (<1%) grâce à la grande vitesse des particules projetées, leur déformation à l'impact et leur étalement aisé. La microstructure est donc moins grossière et comporte des pores en faible quantité.

5.1.7 Adhérence de dépôt

Concernant les tests d'indentation interfaciales effectués sur chaque échantillon, ils sont réalisés sous des charges discrètement croissantes allons de 10 à 50 N appliquées pendant 15 secondes à l'aide d'un appareil de dureté de type standard (Wotpert Instron)., on constate que la fissure est à l'interface en départ des cotes de l'empreinte (fissure interfaciale) voir figure 5.7 on constate aussi que les fissures n'ont pas pu être générées sans que l'empreinte ne traverse tout le revêtement, ou sans que le revêtement ne casse.

Cependant, il nous a été difficile d'obtenir une fissuration interfaciale avec l'échantillon en alliage d'aluminium 7075 comme substrat, cause de la grande différence de dureté entre le revêtement et l'alliage d'aluminium. On peut cependant affirmer que l'ensemble des dépôts réalisés présente une bonne adhérence. La bonne adhérence obtenue peut cependant, s'expliquer par la vitesse élevée des particules. Ces dernières sont peut refroidies au contact de l'air, leur température à l'impact est élevée et leur viscosité est donc faible assurant ainsi un étalement adéquat des particules sur le substrat est un bon contact interfaciale et interlamellaire favorisant ainsi la mise en jeu d'une liaison mécanique au niveau de l'interface (substrat/dépôt). Une liaison mécanique qui correspond à la contraction et à la solidification des particules étalées sur les anfractuosités du substrat.

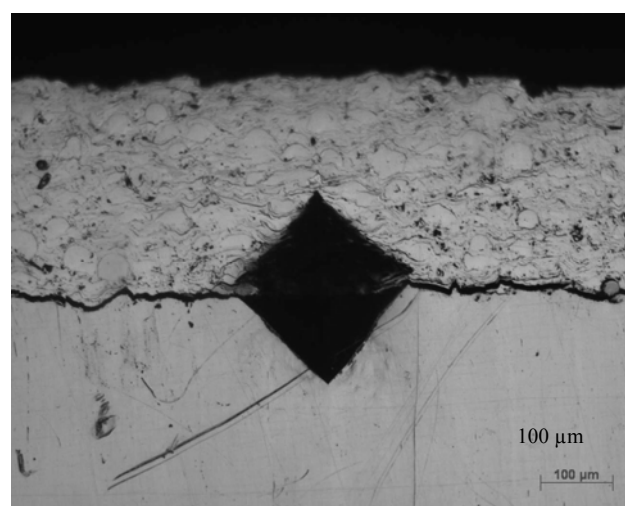
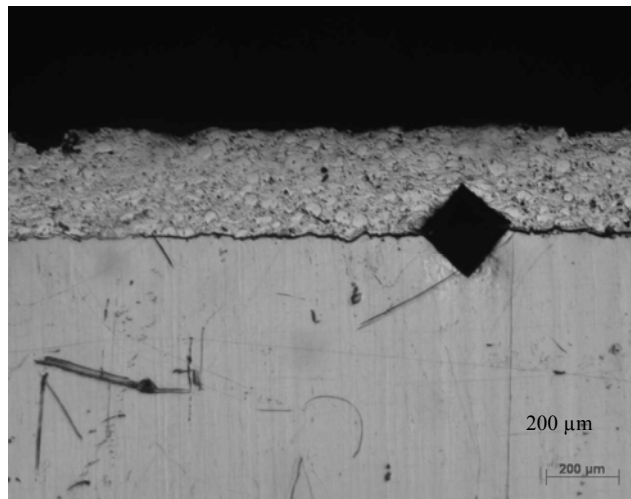


Figure 5.7 : Indentation interfaciale

5.2. Essais sur le tribomètre

Les essais sur le tribomètre Amsler (A135) nous ont permis de suivre l'évolution du coefficient de frottement à travers le moment de frottement enregistré.

Le coefficient de frottement évolue de la même façon que le moment de frottement et peut être exprimé aisément par la relation suivante

$$\mu = M / R F_n$$

avec:

μ : le coefficient de frottement.

M: le moment.

F_n : la force normale exercée sur les pièces.

R: le rayon de disque.

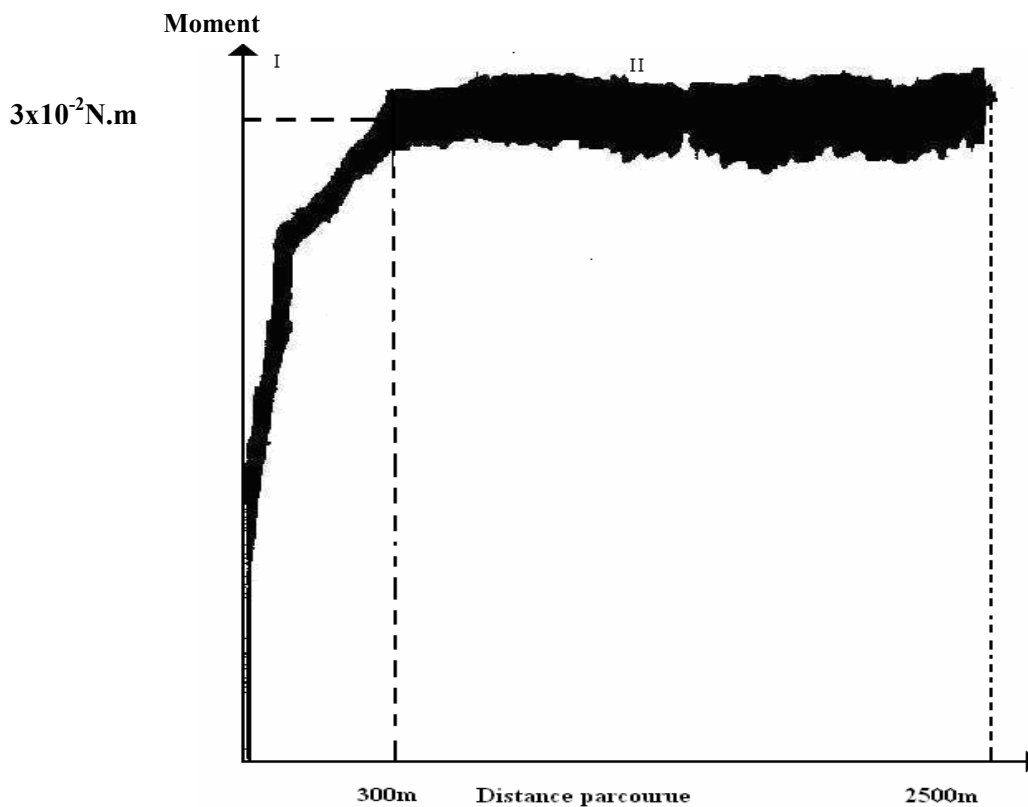


Figure 5.8: Evolution du moment de frottement en fonction de la distance parcourue sous une charge de 245N.

Sur la figure 5.8, on note dans la courbe expérimentale que l'évolution du moment de frottement en fonction de la distance parcourue (2500m) sous une charge de 245N présente un changement de pente qui se situe environ $3 \times 10^{-2} \text{N.m}$.

Sur cette figure on peut définir 2 zones:

La zone I

Une zone relativement courte, caractérisée par une partie linéaire de la courbe et s'effectue lors d'un parcours d'une distance d'environ 300m. C'est une zone où le moment de frottement augmente rapidement et atteint une valeur maximale qui correspond à un comportement élastique de la déformation des aspérités de contact (revêtement/disque). On peut dire que c'est la période de rodage durant laquelle le frottement considérable des surfaces de contact augmente la surface réelle de contact entre le disque revêtu et le disque de laiton.

La zone II

C'est une zone où le moment de frottement a une valeur moyenne stable. La zone II traduit un comportement plastique associé à un endommagement du revêtement ainsi une délamination, étant donné la faible épaisseur du revêtement comparée à l'épaisseur totale de l'échantillon.

Notons que l'élasticité et la plasticité de substrat influent aussi sur le comportement de revêtement (force de cisaillement).

D'une manière générale, on peut dire qu'une augmentation du moment signifie que le travail d'usure est important, et que le système consomme beaucoup d'énergie pour casser la jonction entre les deux surfaces en mouvement.

Les figures (5-9 et 5-10) présentent les micrographies obtenues par microscopie électronique à balayage des surfaces du revêtement tribaloy[®]-400 endommagé après l'essai de l'usure.

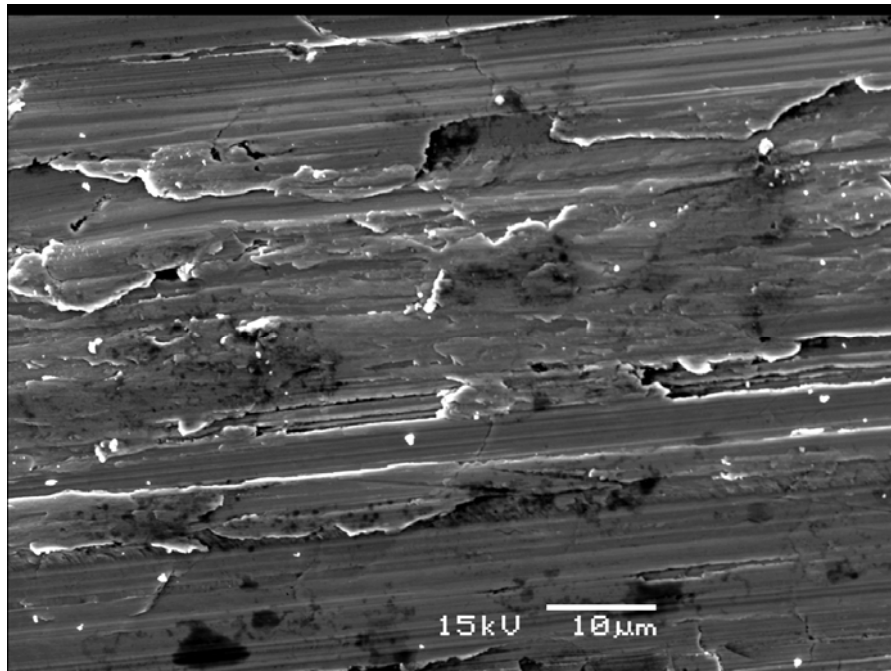


Figure 5. 9 : Micrographie de la trace d'usure (beurrage) de revêtement.

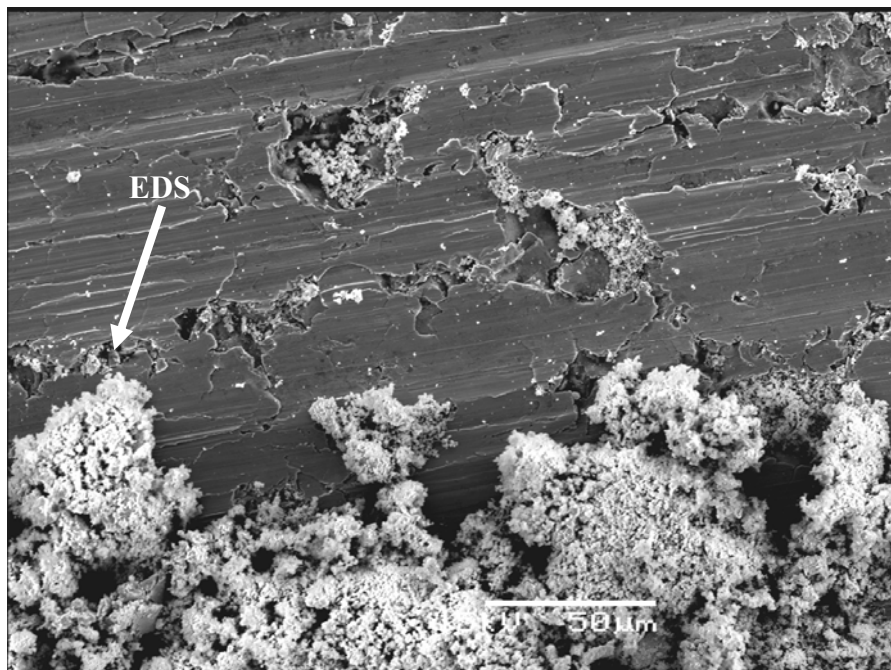


Figure 5.10: Micrographie de la couche noirâtre.

Le travail important de l'usure appliqué sur le revêtement crée un réseau de fissuration sur la surface de dépôt qui s'est manifesté par des beurrages et des délaminations au niveau des couches de dépôts. En effet, la fissuration pénètre et s'amorce dans des parties saines du dépôt jusqu'à atteindre l'interface substrat/dépôt et provoque ensuite un décollement du revêtement.

Sur la figure (5-10), on note la présence d'une seconde couche très fine et noirâtre adhérente à la surface de revêtement qui est éventuellement l'oxydation du cobalt suite à la transformation de l'énergie consommée par le système en chaleur durant l'essai d'usure.

5.3 Contrôle non destructif

5.3.1 Contrôle non destructif par courant de Foucault

Cette méthode non destructive consiste à caractériser l'état de surface du dépôt en fonction du changement d'impédance.

Dans le cas présent, on considère que la conductivité électrique et la perméabilité magnétique sont constantes dans tout l'échantillon (même matériau). La seule variable est l'aspect géométrique de la surface de l'échantillon revêtu.

Sur les courbes obtenues, on remarque une augmentation d'impédance au niveau des points 2 et 3 pour l'échantillon substrat en acier ordinaire 25CD4(voir figure 5.11) et le même cas est observé au niveau du point 1 pour l'échantillon substrat en alliage d'aluminium 7075 (voir figure 1.13) . Cela signifie la présence des défauts surfaciques (porosité, rugosité). On peut noter que ce cas ne se voit pas sur la courbe présentée par l'échantillon substrat en acier inox 304L.

D'après ces résultats on peut dire que les dépôts réalisés présentent une uniformité et homogénéité de surface et surtout l'échantillon avec un substrat en acier inoxydable.

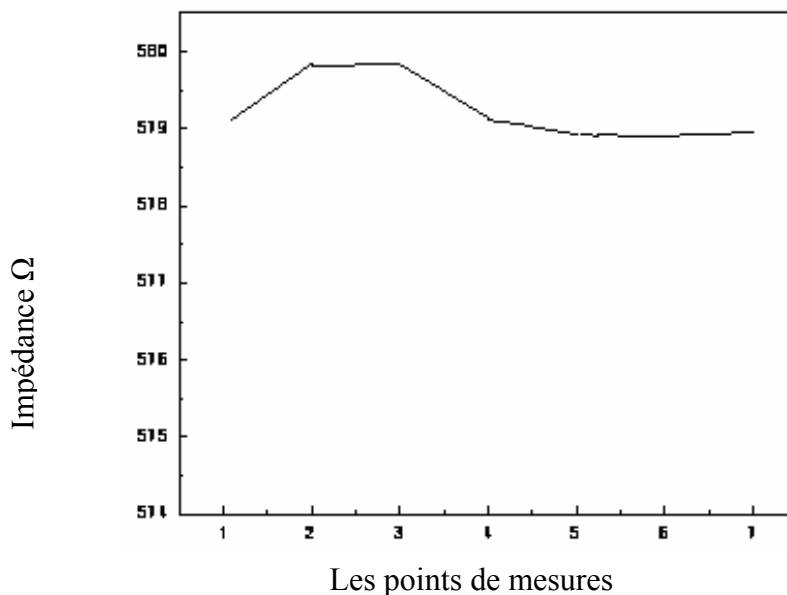


Figure 11 : La variation de l'impédance de l'échantillon substrat en acier ordinaire 25CD4.

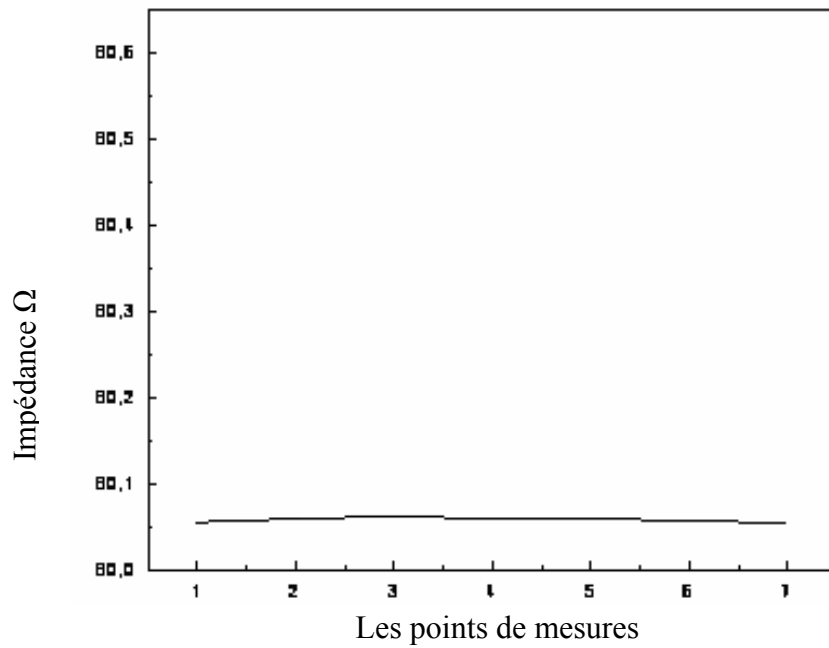


Figure 12 : La variation de l'impédance de l'échantillon substrat en acier inoxydable 304L.

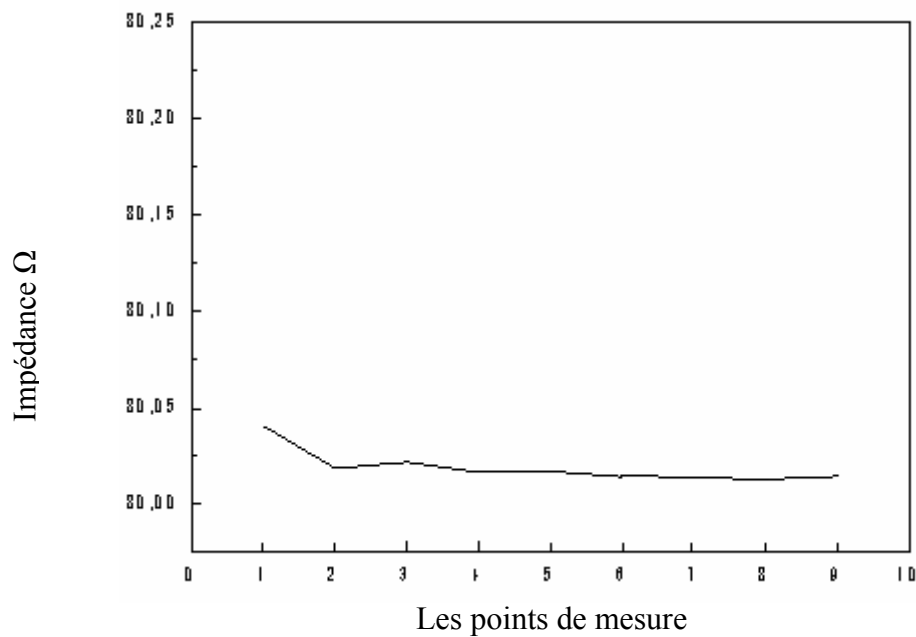


Figure 13 : La variation de l'impédance de l'échantillon substrat en alliage d'aluminium 7075.

5.3.2 Contrôle non destructif par ultrasons

Pour estimer la qualité d'adhérence entre le substrat et le revêtement, on a utilisé le contrôle non destructif par ultrasons.

Nous savons que les ultrasons aux fréquences utilisées (1à10MHz) ne se propagent pas dans l'air; donc s'il y a une mauvaise adhérence entre le dépôt et le substrat c'est-à-dire l'existence d'une couche d'air à l'interface, l'onde ultrasonore sera réfléchié vers la sonde émettrice dans ce cas, l'oscilloscope ne peut pas visualiser l'écho d'entrée dans l'échantillon.

Si l'échantillon possède une bonne adhérence une partie de l'onde ultrasonore passe et se réfléchi sur la face arrière de substrat, dans ce cas les échos visualisés par l'oscilloscope sont un écho d'entrée et l'écho de la face arrière du substrat.

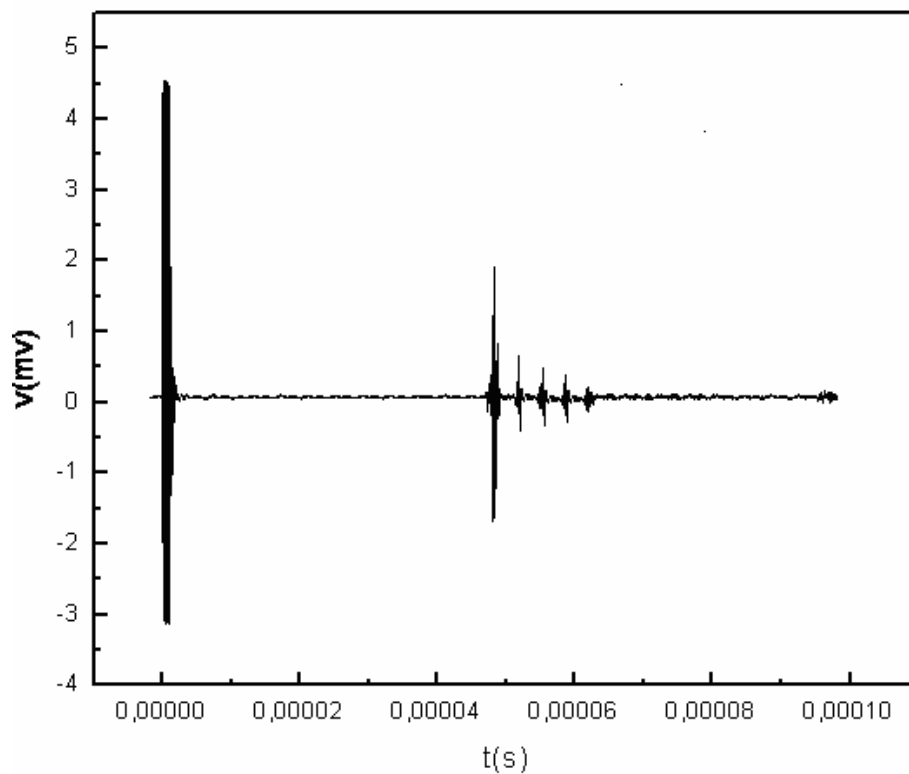


Figure 5.14: Echogramme de l'échantillon substrat en alliage d'aluminium 7075.

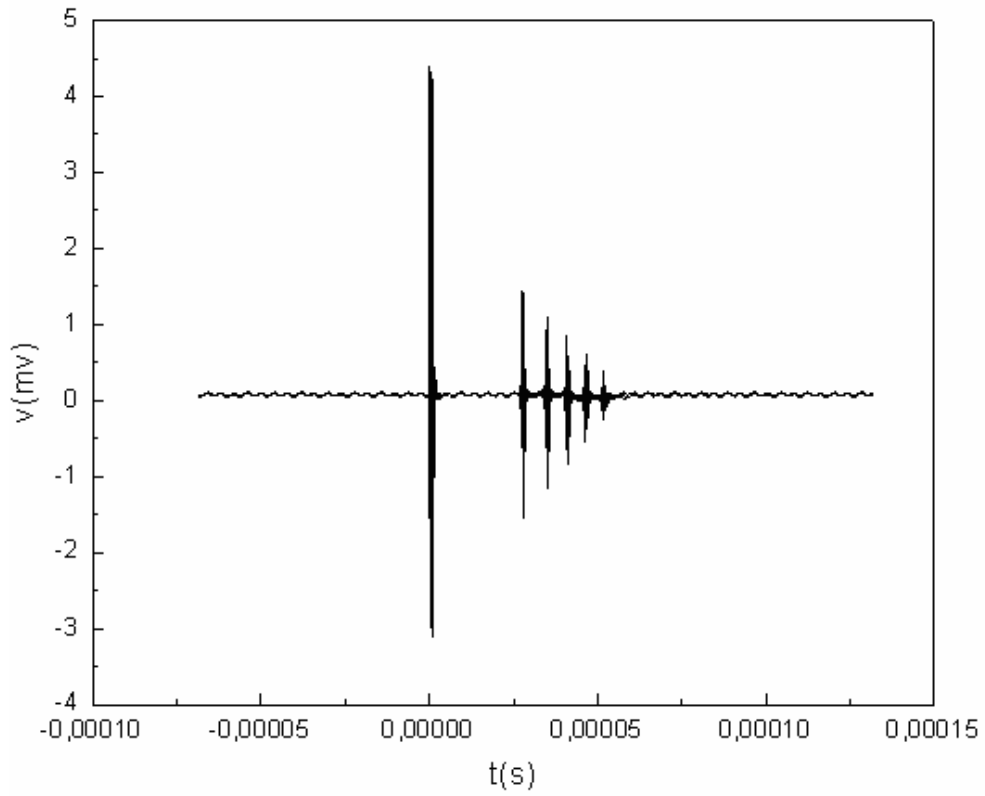


Figure 5.15: Echogramme de l'échantillon substrat en acier inoxydable 304L

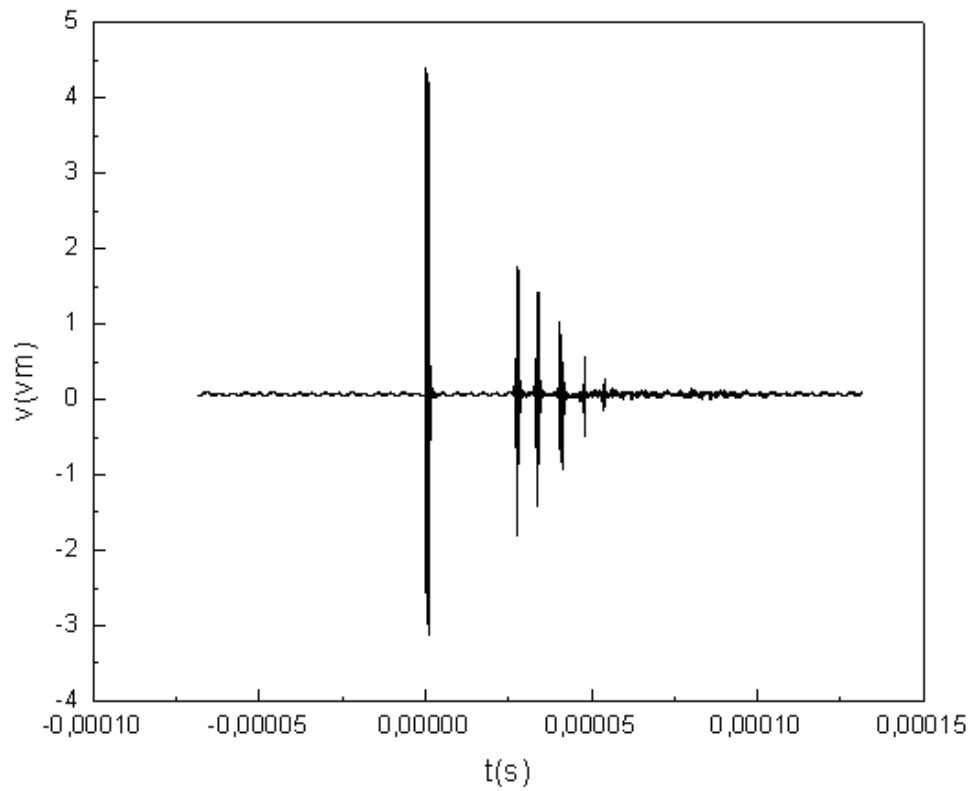


Figure 5.16: Echogramme de l'échantillon substrat en acier ordinaire 25CD4.

Dans les échogrammes ultrasonores obtenus par les échantillons on distingue nettement les trajets (aller-retour) à l'intérieur des échantillons (substrat/revêtement). Les amplitudes sont décroissantes en exponentielle à cause du phénomène d'atténuation des ondes longitudinales dans les matériaux.

D'après ces résultats, nous pouvons dire que les trois échantillons possèdent une bonne adhérence sur toute l'interface (substrat/revêtement), (voire figures 5.14, 5.15 et 5.16).

D'après les résultats obtenus par le contrôle non destructif (CND), on peut dire que ces résultats sont en bon accord à ceux obtenus par analyse d'image et indentation interfaciale.

CONCLUSION

Les procédés de projection thermique font maintenant partie des techniques de traitements de surface. Deux grands domaines d'application de ces procédés sont le frottement et l'usure. Pour ce dernier, le volume d'application le plus important concerne la protection contre l'usure par abrasion. Ce type d'usure se traduit par un déplacement de matière sur la surface en contact avec des particules abrasives ou des protubérances dures de l'autre surface en vis à vis. Il peut être fortement limité en protégeant la surface de la pièce avec un revêtement qui doit présenter une microstructure adaptée au type de contact avec le matériau abrasif, une dureté élevée et aussi une bonne adhérence au substrat. Pour un dépôt réalisé par projection thermique qui présente une microstructure lamellaire, cette cohésion exige une très bonne qualité de contact entre les lamelles et une "certaine" homogénéité. Cette dernière impose la réalisation de dépôts poreux et pour les dépôts métalliques, contenant peu d'oxydes. En effet si la présence d'oxydes dans le dépôt se traduit généralement par une élévation de sa dureté, elle entraîne aussi sa fragilisation car les lamelles oxydées sont généralement peu ou mal liées avec les autres.

L'objectif de ce travail était de caractériser un dépôt de tribaloy[®]-400 élaboré par un système de projection thermique à la flamme supersonique HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) et de discuter les corrélations entre la microstructure du dépôt et les propriétés mécaniques et tribologiques (état de surface, dureté, adhérence, usure).

La projection thermique à la flamme supersonique (CDS) a permis d'obtenir des dépôts denses et durs avec des taux de porosité relativement faible, la grande vitesse et la température convenable associées au procédé HVOF ont assuré le bon étalement des particules sur le substrat et un bon contact interfacial et interlamellaire, naturellement ceci explique la diminution du taux de porosités et des oxydes et le bon accrochage mécanique.

L'usure du revêtement de tribaloy[®]-400 s'est manifestée par la ductilité du matériau aussi par le fait qu'une partie de l'énergie consommée par ce matériau au cours de l'usure était transformée en chaleur provoquant la formation d'une couche de cobalt oxydé très fine pouvant

jouer le rôle de lubrifiant solide. Le cas de tribaloy[®]-400, prouve l'utilisation de ce revêtement pour des applications où la lubrification s'avère être insuffisante.

On a utilisé un logiciel d'analyse structural par traitement d'image (SCIOIMAGE) pour quantifier les porosités des dépôts et mesurer l'épaisseur du revêtement.

L'analyse d'image permet l'étude des échantillons à l'échelle microscopique. Les deux grands types d'utilisation sont l'analyse quantitative et la reconnaissance.

Dans le premier cas, c'est l'exploitation de données numériques, portant aussi bien sur la taille, la densité, la couleur, la forme des objets, ou l'organisation des structures. Cette approche est particulièrement adaptée à l'analyse de la microstructure de revêtement obtenus par projection thermique en appliquant l'analyse quantitative au composants principaux des revêtements: les porosités, les particules écrasées, les oxydes,..etc.

Dans le second cas, c'est l'identification des formes. Les formes peuvent être identifiées soit à partir de mesures, comme l'identification quantitative, soit à partir de transformation d'image suivies uniquement d'un dénombrement pour lister la présence ou non de la figure recherchée, l'analyse quantitative étant alors réduite.

Nous avons utilisé la technique du courant de Foucault et des ultrasons pour évaluer l'uniformité du revêtement et l'adhérence entre le substrat et le revêtement.

La technique de contrôle non destructif a montré son importance dans l'évolution des caractéristiques géométriques et mécaniques.

Le point plus important pour l'avenir de la projection thermique concerne certainement la prise de conscience, au niveau des bureaux d'études notamment, des possibilités offertes par l'ensemble des procédés proposés et donc la possibilité de les intégrer dès la conception d'une pièce.

REFERENCES

1. Sylvain Audisio, Marcel Caillet, Alain Galerie, Henri Mazille : « revêtement et traitement de surface », presse polytechnique et universitaire ROMANDS.
2. T.Sahraoui : « Alternative au chrome : caractérisation et étude tribologique des revêtements élaborés par projection thermique à flamme de type HVOF », thèse de doctorat d'état Blida (2003).
3. Guide pratique de la projection CETIM 1989.
4. Sophie BARADAS : « Etude a l'aide du choc laser des mécanismes d'adhérence au interface Cuivre/Aluminium et cuivre obtenues par projection thermique », thèse de doctorat d'état. Ecole des mines Paris le 7 décembre 2004.
5. Maurice Ducos : « Revêtement par projection thermique », Technique de l'ingénieur M51645.
6. Sébastien BEAUVAIS : « Etude de l'influence de la porosité sur les propriétés électriques des dépôts réalisés par projection plasma », thèse de doctorat. Ecole nationale supérieure des mines de Paris, le 8 juillet 2003.
7. Michel Varadel, Sébastien Bamasard, Pierfauchais, Cerdic Bessoutrot, Frédéric Braillard : « La projection thermique: formation du dépôt et contrôle en ligne du procédé ». Laboratoire des sciences des procédés céramique et de traitement de surface (SPCTS) UMR.CNRS6638.
8. A.KEFAIFI : « Application des méthodes non destructif pour la caractérisation de revêtement élaborés à la flamme », mémoire de magister Blida juin 2005.

9. R. David : « contribution à l'étude de l'érosion des électrodes de torche à plasma d'arc pour la projection par suivi en ligne des signaux de tension et de son », Thèse de Doctorat. Novembre 2003, Université de Limoges.
10. J-M. Gulemany, F.J. Sàchez, Barcelona, L. Delae, L. Jacobs, Leuven, «Wear properties of coatings obtained during HVOF spraying of Wc-Co-Cr powders onto low carbon steel substrate », TS 96 thermal spraying conference, Lugschender, DVS-BERICHT, ISBN 3-78 155-480-4 ISSN 0418-9639.
11. M.SA khan, TW. Clyne, AJ. Sturgeon «Microstructure and abrasion resistance of Wc- Co coatings produced by high velocity oxy –Fuel spraying», Published by ASM international, Materials Park, oho, USA.
12. A.IBRAHIM, C.C. BERNDT: «The effect of high velocity oxygen fuel, thermally sprayed Wc-Co coating on the high cycle fatigue of aluminum alloy and steel», Journal of materials science 33 (1998) 3095-3100.
13. V.A. de Sorza, A weville: «Corrosion and erosion damage mechanisms during erosion-corrosion of Wc-Co-Cr cermets coatings», Wear 225 (20-3) 146-156.
14. M.T. Blatch Ford, M. Jones, Blotfi: «Thermal spraying of SHS Powders for high, performance», individual Grant review report, Engineering coatings.
15. H.claire, E. Crawelle: «Thermal spray metal», Hand Book, vol5, 1982, P361
16. Wij.Jarosinski, M.F. Grwinger, C.H.Londry: «Characterization of tungsten carbide, cobalt powders and HVOF coatings», National thermal spray conference, Anaheim, CA, 7-11 june 1993.
17. T. Sahraoui, H.J Feraoun , N. Fenineche, G. Montavon, H. Aourag, C. Coddet: «HVOF sprayed tribaloy[®]-400: microstructure and first principal calculation», Science direct, Materials letters 2004.

18. J. Przybylowez, J. Kusinski: «Laser cladding and erosive wear of Co-Mo-Cr-Si coatings», surface and coating technology 125. 2000. 13-18.
19. P.M. Natishan, SH. Lawrence, R.L. Foster, J. Lewis, B.D. Sartwell, Salt Fog; «Corrosion behavior of High Velocity Oxygen Fuel thermal spray coating compared to electrodeposited hard chromium», Surface and coating technology 130. 2000. 218-223.
20. R.N. Johnson, D.G. Farwicr: « Friction Wear and corrosion of laves hardwed Nickel alloy hard surfacing in Sodium», Thin solid film 53.1978.365-373.
21. C. Navas, M. Cadnas, J.M. Cuetos, J. de Danborencia : « Microstructur and sliding wear behavior of tribaloy-800 coating deposited by laser calding», Science direct wear 260. 2006. 838-846.
22. Ludovicavril: «élaboration de revêtement sur acier inoxydable, simulation par irradiation laser, caractéristique structural, mécanique et tribologique». Thèse doctorat, Ecole national supérieur d'arts et métiers, 2003, Paris.
23. K. Zhang: «effect of test conditions on the tribological behaviour of a journal bearing in molten Zinc», Science direct wear 259. 2005. 1248-1253.
24. T. Sahraoui, N. Fenineche, G. Montavon, C. Coddet: «Alternative to chromium: Characteristic and wear behavior of HVOF coating for gas turbine shafts repair (heavy-duty) », Journal of material processing technology. 2004.
25. Jean. Marie, Gorges: «Frottement, usure et lubrification, tibologie en science des surfaces». Edition CNRS. 2000.
26. Cornet. A, Deville,J.P: « Physique et ingénierie des surfaces ». Edition EDP Science 2000.
27. Fabienne : « Amélioration de la résistance à l'usure abrasive du titane grâce à la réalisation de traitement de surface par laser ». Mémoire du grade maître des sciences, Université LAVAL, 2000.

28. J.Cauchetier : « Traitement de surface » chapitre2. Technique de l'ingénieur. M1641.
29. Z. Gerarld, V. Léo : « Matériaux et contact une approche tribologique ».Edition 2000.
30. T. Sahraoui, S. Guessasma , N. Fenineche, G. Montavon, C. Coddet: « Friction and wear behaviour prediction of HVOF coatings and electroplated hard chromium using neural computation», Science direct, Materials letters 58. 2004. 654-660.
31. C.B. Wang, D.C. Wang, WX chen, YY. Wang: « tribological properties of nanostructured WC/CoNi and WC/Co NiP coating produced by electro-deposition», Wear 253. 2002. 563-571.
32. K. Padilla, A.Velasquez, J.A Berros: «Fatigue behaviour of a 4140 steel coated with Mo Al deposited applied by HVOF thermal spray», Surface and coating technology 150. 2002. 151-162.
33. L.Prchililik, S. Sampth, J.Gutleber: « Friction and wear properties of WC-Co and Mo-Mo₂C based functionally graded materials», Wear. 249. 2001. 1103-1115.
34. M. Jones, A.J. Holoch, P.H. Shipway: «A comparison of the abrasive wear behaviour of HVOF sprayed titanium carbide-and titanium boride- based cermets coatings», Wear 251. 2001. 1009-1016
35. Changqung Lee: « characterization of thin coating using Eddy current methods», Thèse de doctorat, New York. 2004.
36. “Techniques de base du contrôle non destructif », fiche 43.
37. Maurice WANIN : « Evaluation non destructif de la qualité des matériaux ». Technique de l'ingénieur. Vol M4131
38. Maurice WANIN : « Evaluation non destructif de la qualité des matériaux » Technique de l'ingénieur. Vol M4130

39. Orland Guedes: « Génération et propagation ultrasonore », 30 septembre 2005.
40. H.W.Ma, X.h. Zhang, J. Wei: «Research on ultrasonic NDT system for complex surface parts», Journal materials possessing technology 129. 2002.667-670.
41. F.Bastian ini A.D tomanaso: « Ultrasonic non destructive assessment of bounding affects composite structure », Composites structures 53. 2001. 463-467.
42. G. Montavon: « Analyse d'image ».
43. M. Ducos : « Traitée matériaux métalliques », Technique de l'ingénieur, Vol M 1 645.
44. Thibaut HAURE : « Couche multifonctionnelles par procédés multitechnique », Thèse de Doctorat. Octobre 2003, Université de Limoges.

APPENDICE NOMENCLATURE

Eléments chimiques et métaux

Al	: Aluminium
Co	: Cobalt
Mo	: Molybdène
Si	: Silicium
Ni	: Nickel
C	: Carbone
Cr	: Chrome
W	: Tungstène
Fe	: Le fer
P	: Phosphore
S	: Soufre

Abréviation

HVOF	: Height Velocity oxy –fuel
T [®] 400	: Tribaloy 400
C.V.D	: Dépôt chimique en phase vapeur
P.V.D	: Dépôt physique en phase vapeur
D-Gun	: Détonation Gun
EDS	: Diffraction par électron secondaire
CND	: Contrôle non destructif
MEB	: Microscope électronique à balayage
DRX	: Diffraction par rayon X
H	: Dureté
Hv	: Dureté VICKERS
μ	: Coefficient de frottement
v	: Vitesse des particules

τ	: Résistance au cisaillement
A_r	: Aire réelle de contact entre deux surfaces
Pixel	: Le pixel est le plus petit élément constitutif d'une image numérique

Unités de mesure

C^0	: Degré celcius
K	: Degré Kelvin
mm	: Millimètre
g	: Gramme
%	: Pourcent
Wt (%)	: Pourcentage en poids atomique
Hz	: Hertz
Nl	: Normal litre
Min	: Minute.