

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique



جامعة بجاية
Tasdawit n'Bgayet
Université de Béjaïa

Université Abderrahmane Mira Bejaia
Faculté de Technologie, Département de Génie Mécanique

Mémoire

Pour obtenir le diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique, **Spécialité** : GENIE DES MATERIAUX

Par :

ZERARI Idir

Thème

**Comportement Mécanique et Tribologique d'un contact glissant
d'un couple de dépôt Molybdène/Graphite**

Soutenu le, 03 juillet 2018 devant le jury composé de :

D ^r . SAADEDDINE A.	Université Abderrahmane MIRA BEJAIA Faculté de Technologie-Département Génie Mécanique	Président
Pr. BRADAI M.A	Université Abderrahmane MIRA BEJAIA Faculté de Technologie-Département Génie Mécanique	Rapporteur
Dr. RASSEM Y.	Université Abderrahmane MIRA BEJAIA Faculté de Technologie-Département Génie Mécanique	Examinateur

Année Universitaire 2017-2018

Remerciements

Ce travail a été réalisé à l'Université Abde RAHMANE Mira de Béjaia, au niveau du Hall de Technologie de Bejaia. Apres dieu ;

Mes vifs remerciements s'adressent à mon promoteur Monsieur Professeur : M.A. BRADAI, en tant que professeur, et pour son aide pour la réalisation du pont d'Ingéniorat vers Master II. Ainsi pour avoir initié ce sujet de thèse, Merci pour ton aide, pour tes conseils pédagogie, pour le soutien et la confiance que vous m'avez accordés tout au long de ce travail soit pour avoir rapporté ou la relecture de ce travail.

J'exprime ma gratitude à mon Co-promoteur Monsieur Dr : Y. RASSEM, pour le soutien et la patience au cours de ses mois. Il m'a initié aux techniques théoriques nécessaires à l'accomplissement de ce mémoire. J'ai beaucoup apprécié ça façon de travailler. Je le remercie pour ça disponibilité, ainsi pour ses conseils qui m'ont été d'un très grand profil tout au long de ce travail. Qu'il trouve ici toute ma reconnaissance.

J'adresse mes plus sincères remerciements aux membres de jury Monsieur Dr SADEDDINE A pour avoir accepté de présider le jury, ainsi qu'à Monsieur Docteur : Y. RASSEM pour avoir accepté de rapporter et examiner ce travail.

Mes remerciements ne seront pas complets si je ne cite pas celui que j'ai eu plaisir à sa compagnie durant ces longues années, Un merci incommensurable à monsieur Professeur Kasri .Y, que je le considère comme frère, qui fut la bougie d'allumage qui permit la mise sur pied pour la réalisation de ce pont. Un immense merci pour ton aide précieuse et ton soutien dans tous les moments difficiles.

Je suis reconnaissant envers Monsieur Docteur Tamalouste S, Merci infiniment, Je vous exprime toute ma reconnaissance pour votre aide et le soutien précieux dans la mise au point du pont réalisés. Trouvez ici l'expression de ma sincère gratitude.

Je remercie également vivement toute l'équipe du hall de technologie de l'université de Bejaia pour la disponibilité et l'accès aux équipements.

En fin, mes derniers remerciements iront à mes parents, d'avoir accordé autant d'importance à mon éducation, qui ont toujours fait le maximum pour que je puisse poursuivre mes études dans les meilleures conditions, pour ma femme, mes petites filles, ainsi toute ma famille.

Dédicace

Enfin, je dédicace ce travail

*À mon épouse, Noura, il serait impossible d'écrire en quelques
mots tout ce que tu m'as Apporté, Merci énormément
pour ton soutien sans faille et ta compréhension ;
tout simplement, je t'aime.*

À mes filles Meriem, Asma, Lyna

Mes trois petites étoiles.

Bisous et câlins.

Que Dieu vous protèges.

Sommaire

I	INTRODUCTION	01
I-1	PROJECTION THERMIQUE	03
I-1-1	Introduction	03
I-2	QU'EST-CE QUE LA PROJECTION THERMIQUE	06
I-3	LES DIFFERENTES PROCEDES DE LA PROJECTION THERMIQUE	07
I-3-1	Projection flamme	07
I-3-2	Projection Plasma	11
I-3-3	Projection par arc électrique.....	12
I-3-4	Avantages et inconvénients de la projection arc-fil	14
I-4	FILS FOURRES	14
I-5	CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTES TECHNIQUES DE PROJECTION THERMIQUE	17
I-5.1	Paramètre de projection influant sur le dépôt	18
I-6	PARAMETRES DE LA PROJECTION THERMIQUE	21
I-6 .1/	Le substrat	21
I-6 .2/	Préparation de substrat	21
•	Le dégraissage	21
•	Le sablage ou « grenailage»	22
I-6.3	Caractéristiques du dépôt	22
a	Construction du dépôt	22
b	Adhérence et dureté	23
c	Porosité et l'oxyde	24
d	Corrosion	25
I-7	REVETEMENT EN MOLYBDENE	25
I-7.1/	Définition	25
I-7.2/	Caractéristiques	27
I-7.3/	Applications	28
I-7.4/	Propriétés	29
I- 8	TRIBOLOGIE	30
I - 8 .1/	Surface	32
I - 8 .2/	Quelques propriétés des surfaces	33
•	Dureté des surfaces	33
•	Énergie de surface	34
I - 8 .3/	Le concept du triplet tribologique, et accommodation de vitesse	34
I - 8 .4/	Le circuit tribologique	36
I- 9	MECANISME DE DEGRADATION DE SURFACE	37
I - 9 .1	Usure	37
I - 9 .2/	Mécanismes de dégradation de surface	37
➤	Usure adhésive	38
➤	Usure abrasive	39
I- 10	LUBRIFICATION	40
I - 10.1	Définition	40

Matériaux et Techniques Expérimentales

II	INTRODUCTION	42
	II-1/ MATERIAUX UTILISES	42
	II-1.1 Substrat	42
	II-1.2 Préparation du substrat	43
	II-1.3 Le dépôt considéré pour le revêtement	43
	II-1.4 / Paramètres de projection	44
	II-2/ PROCEDE TRIBOLOGIQUE	45
	II-2 .1 / Préparation des échantillons pour les essais d'usure	45
	II-2 .2 Description du matériel d'expérience	46
	II-2 .3 Procédure des essais	48
	II-2 .3.1 Les paramètres à prendre en compte lors des tests d'usure	48
	II-3 / OBSERVATION METALLOGRAPHIQUE	48
	II.3. 1 / Le microscope électronique à balayage (MEB)	48
	II-4 / ESSAI DE VICKERS	49
	<i>Résultats et Interprétations</i>	
III	INTRODUCTION	51
	III-1 / Caractérisation microstructurale	51
	III-2 / DETERMINATION DES PROPRIETES MECANIQUE	53
	III.2.1 Microdurete Vickers	53
	III-3 / DETERMINATION DES PROPRIETES TRIBOLOGIQUE DU COUPLE MOLYBDENE GRAPHITE	54
	III.3.1 Influence du temps sur la perte de masse relative	54
	III.3.2 Influence de la charge sur la perte de masse relative	55
	III-4 / DETERMINATION DES TEMPERATURES DE CONTACTE DU COUPLE Molybdène/ graphite	57
	III.4.1 Influence de la charge sur la température de contact du couple Mo/ Gr.....	57
	III.4.2. Influence du temps sur la température de contact du couple Mo/ Gr.....	58
	III-5 / CARACTERISATION MICROSTRUCTURAL	59
	<i>Conclusion</i>	
IV	CONCLUSION	61
	<i>Bibliographies</i>	
IIV	ELIMENTS BIBLIOGRAPHIES	63
	<i>Annexes</i>	
IIIV	ANNEXE	66

Liste des Figures

Figure I.1 - Épaisseurs de dépôts et température de substrat en fonction de la technique utilisée	03
Figure I.2 - Classification des procédés de traitement de surface.....	04
Figure I.3 - Caractéristiques des différents procédés de projection thermique	07
Figure I.4 - Schéma du principe d'un pistolet flamme poudre.....	08
Figure I.5 - Schéma d'un pistolet flamme fil	09
Figure I.6 - Principe de fonctionnement d'un canon à détonation.....	10
Figure I.7 - Principe de fonctionnement d'un canon à détonation.....	11
Figure I.8 - Schéma de principe de la projection plasma.....	12
Figure I.9 - Principe de fonctionnement de projection arc-fil.....	13
Figure I.10 - Schéma de la tête d'un pistolet de projection Arc-Fil équipé d'un système de gaz d'atomisation secondaire.....	13
Figure I.11 - Principe du procédé développement d'un fil fourré utilisant la technologie Chemetron.....	15
Figure I.12 - Schéma de principe du remplissage d'un fil fourré.....	15
Figure I.13 - Un exemple de morphologies-type de dépôts obtenus avec des fils fourrés de Ni-TiB ₂	16
Figure I.14 - Représentation schématique des contaminants d'une surface métallique Industrielle.....	21
Figure I.15- Illustration schématique de la coupe d'un dépôt en croissance réalisé par projection thermique.....	23
Figure I.16 - Structure cristalline Molybdène.....	28
Figure I.17 - Relations entre les trois aspects de la tribologie.....	31
Figure I.18 - Structure de surface d'un métal.....	32
Figure I.19- Défauts géométriques d'une surface.....	33
Figure I.20 - Le triplet tribologique de troisième corps.....	34
Figure I.21- Représentation schématique des mécanismes d'accommodation de vitesse.....	36
Figure I.22 - Schéma du circuit tribologique dans le cas d'un contact entre deux solides et théorème 3 ^{ème} corps.....	36
Figure .I.23 - Importance relative des mécanismes d'usure dans l'industrie.....	38
Figure I.24 - Mécanisme de l'usure adhésive.....	39
Figure I.25 - Mécanisme de l'usure abrasive.....	39
Figure II.1 - Echantillon utilisé pour la projection	42
Figure II.2 - Echantillon utilisé pour la projection, revêtue en molybdène de 01 mm.....	44

Figure II.3 - Pistolet arc électrique entre deux fils.....	45
Figure II.4 - Photos de la polisseuse.....	45
Figure II.5 - Représentation du dispositif d'usure utilisé.....	46
Figure II.6 - Représentation de la balance utilisée.....	47
Figure II.7 - Microscope métallographique.....	47
Figure II.8 - Microscope électronique à balayage (Philips type FEI Quanta 200).....	49
Figure II.9 - Essai de dureté Vickers.....	49
Figure III.1- Microstructures des différentes zones de l'acier revêtu.....	51
Figure III.2- Spectre des rayons X obtenu après projection thermique.....	52
Figure III.3 - Micro-Dureté Vickers des différents échantillons.....	53
Figure III.4 - Variation de la perte de masse relative, en fonction du temps sous un couple de 5 et 30N, a) pour 90 tr/min (0.5 (m/s), b) pour 180 tr/min (01 (m/s).....	54
Figure III.5 - Variation de la perte de masse relative en fonction du temps sous un couple de 5 et 30N pour des vitesses de glissement de 90 tr/min (0.5 (m/s), et 180 tr/min (01 (m/s).	55
Figure III.6 -Variation de la perte de masse relative en fonction de la charge sous un couple de glissement de 90 tr/min (0.5 (m/s), et de 180 tr/min (01 (m/s).....	56
Figure III.7 - Variation de la température en fonction de la charge sous un couple de glissement de 90 tr/min (0.5 (m/s), et de 180 tr/min (01 (m/s).....	57
Figure III.8-1- Variation de la température en fonction du temps sous un couple de glissement de 90 et 180 tr/min, pour les charges 5 et 30N.....	58
Figure III. 8-2- Variation de la température en fonction du temps sous un couple de glissement de 90 et 180 tr/min, pour les charges 5 et 30N.....	58
Figure III.9- Faciès d'usure de l'échantillon molybdène après usure ; a) : à une vitesse de glissement de 0.5 m/s, b) : à une vitesse de glissement de 01 m/s, c) : à une charge de 30 N dans un régime sec.....	59

Liste des Tableaux

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 - Différentes caractéristiques des techniques de projection thermique.....	17
Tableau I.2- Paramètres influant sur la qualité des dépôts, avec les différents procédés de la projection thermique.....	19
Tableau I.3 - caractéristiques de molybdène.....	27
Tableau II.1 - La composition chimique de l'acier E335.....	42
Tableau II.2 - Compositions et caractéristiques du fil utilisé pour le dépôt donné par le fournisseur	43
Tableau II.3 - Paramètres de la projection Arc électrique entre deux fils de l'entreprise privé «Algérie métallisation».....	44

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui, pour pouvoir suivre la compétitivité industrielle, on se doit de disposer des machines fiables, c'est pour cela que des études sur la détérioration des pièces de machines de production par le frottement et l'usure, qu'elle soit mécanique ou structurale, ont été élaborées.

L'une des méthodes les plus utilisées est le revêtement par projection thermique, afin d'améliorer les performances et allonger la durée de vie d'un système mécanique. Ce dernier est techniquement et économiquement avantageux par rapport à un changement du matériau constituant la pièce à améliorer.

En outre, il est demandé plus fréquemment aux pièces de résister à des sollicitations impliquant simultanément plusieurs phénomènes (fatigue, usure, frottement et chocs...) et pour cela on utilise les dépôts par projection thermique.

L'usure des pièces est l'une des causes et l'un des fléaux qui touche le parc industriel et qui le met hors d'usage, d'où l'importance capitale d'y remédier.

Pour les applications où l'usure est sévère, les pièces de machine sont sollicitées excessivement en causant d'importantes pertes de masse, même après traitement de surface ce qui fait que l'utilisation des matériaux autolubrifiants est une des solutions les plus adéquates associée aux pièces avec des surfaces traitées par projection thermique, le remplacement de pièces usées sera évité ainsi que les dépenses énergétiques et économiques qui seront réduites grâce à cette dernière.

Ce mémoire va donc présenter l'ensemble des travaux qui ont été réalisés, la réalisation des revêtements par projection thermique moyennant le procédé arc électrique entre deux fils, ainsi que l'évaluation de l'usure par perte de masse à différentes vitesses de glissement en fonction du temps et des charges appliquées.

Pour la présentation de notre travail on l'a partagé sur trois chapitres.

Le premier chapitre est une étude bibliographique permettant de présenter les principaux types de préparation de surface pour les différentes techniques de projection thermique, tout en mettant l'accent sur le procédé arc électrique entre deux fils et les paramètres influençant sur ce procédé, ainsi qu'une présentation des différentes méthodes de lubrification et le type de lubrifiant, suivi d'une présentation des différents aspects de l'usure et quelques notions sur la tribologie.

Le chapitre deux consiste à élucider les techniques expérimentales, le matériau utilisé et les paramètres de projection pour l'élaboration des dépôts, ainsi que la configuration des tests d'usure et l'observation au microscope optique (M.O) des différentes formes d'usure.

Le chapitre trois met en évidence les microstructures des différents échantillons soumis au test d'usure, les résultats expérimentaux de ce dernier exprimés sous forme de graphe. Suivi de discussion et interprétations. Enfin nous achevons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Eléments Bibliographiques

I / PROJECTION THERMIQUE

I-1 / Introduction

L'industrie a connu un développement accru au cours de ces dernières années. Différentes technologies de dépôts et techniques de traitements de surface permettent d'apporter un matériau à la surface d'une pièce pour en changer ses propriétés de surface. Parmi les techniques les plus utilisées, on peut citer l'électrodéposition, les dépôts chimiques, l'immersion dans un bain de métal en fusion, les dépôts physiques en phase vapeur PVD « Physical Vapor Deposition », ou chimiques en phase vapeur CVD « Chemical Vapor Deposition » et la projection thermique. Les applications de ces dépôts concernent essentiellement la protection contre l'usure et la corrosion, la décoration ou la réalisation de revêtements à propriétés physiques spécifiques (électrique, magnétique, thermique, etc.). Différentes épaisseurs peuvent alors être obtenues en fonction de la technique utilisée figure I.1.

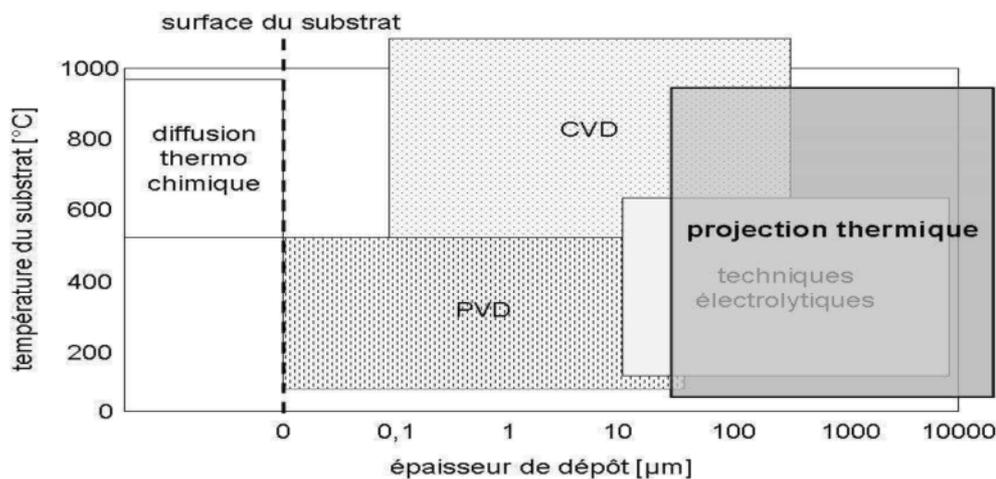


Figure I.1 -Épaisseurs de dépôts et température de substrat en fonction de la technique utilisée

Les procédés de traitement de surface peuvent être classés en deux grandes familles : celles des revêtements constitués par une couche protectrice superficielle et celles des transformations structurales (figure I.2). Les transformations structurales sont des méthodes de modification des propriétés surfaciques. Elles peuvent être réparties en groupes fonctionnels de modification métallurgique d'une couche superficielle par traitement mécanique ou thermique, et de modification chimique par transformation, via une réaction chimique ou la diffusion.

En fonction de la technologie utilisée, les revêtements peuvent être obtenus par voie humide ou sèche. Historiquement ce sont les procédés par voie humide qui ont été développés en premier. Mais ces procédés, de par les composés utilisés dans les bains, tels qu'arsenic, cyanure, métaux lourds, etc., ont un impact environnemental très fort. Ainsi de nouveaux procédés ont été mis au point.

La figure I.2 présente les principaux procédés utilisés pour le traitement de surface. Ils sont regroupés par transformations structurales et revêtements par voie sèche ou humide.

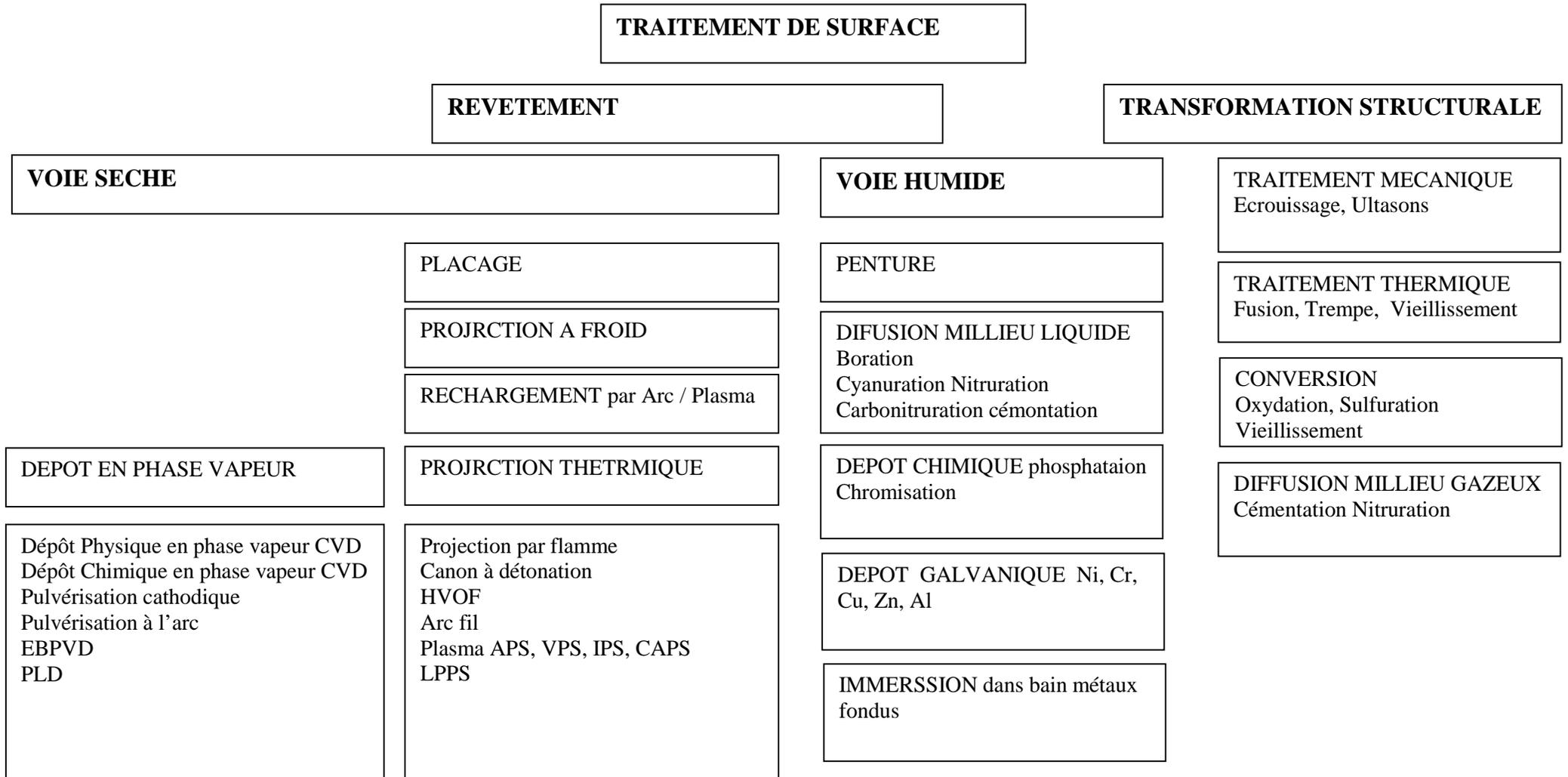


Figure I.2 -Classification des procédés de traitement de surface.

Parmi ces techniques dites «propres», la projection thermique est l'une des plus anciennes, historiquement, c'est l'invention et l'œuvre du scientifique M.U. Schoop au début du XX^{ème} siècle tel que :

En 1909, l'ingénieur suisse le docteur Max Ulrich Schoop, à réaliser une invention portant sur l'utilisation de la technique de revêtement en plomb ou en zinc par projection de métal fondu, grâce aux expériences de l'impacte des balles en plomb sur un mur en béton.

En 1911, l'utilisation du chalumeau comme source d'énergie et d'un métal en poudre a été qualifiée et certifiée comme procédure pour fondre un matériau et le propulser à l'état fondu et/ou ramolli par la chaleur, sur une cible pour y former un enduit.

Suite Hermann Drösse à brevetée sa première innovation par utilisation un appareil de chauffage par arc électrique. Depuis le procédé n'a pas cessé d'évoluer.

En 1912, Schoop créer le pistolet de projection, en remplaçant la poudre par un fil métallique.

En 1915, il innove la technique de la projection par arc électrique entre deux fils qui devient le procédé utilisable pour de nombreuses applications soient pour la protection de surface, de l'anticorrosion, de la réparation et du rechargement. Depuis la technologie est mondialement connue sous le nom de «schoopage».

A partir de ce cette époque deux types de source enthalpique ont été développés Le premier utilise l'énergie de la combustion et le second l'énergie d'une décharge électrique continue.

Dans les années 50, Praxair Surface Technology a breveté l'apparition du canon à détonation (D-Gun Coatings), qui est due que la combustion a cette période le procédé le plus développé.

En 1960, SNECMA brevet le procédé de projection par plasma dont l'abréviation anglaise APS (Atmospheric Plasma Spraying), depuis a rendu de plus en plus utilisés des procédés de projection. Suite au développement de nouvelles techniques d'utilisation de l'énergie du plasma, des équipements notamment des générateurs de plasma, et d'améliorer la longévité des torches

Les années 70 marqué par le développement de la projection plasma sous faible pression résiduelle, tel que Le premier dépôt a été obtenu par Muehlberger en utilisant la technique baptisée par la suite Vacuum Plasma Spraying (VPS) ou Low Pressure Plasma Spraying (LPPS). Elle permet d'exploiter le procédé pour l'obtention de dépôts métalliques denses sans présence d'oxydes et avec une meilleure adhérence.

En 1983 Browning Engineering a brevet le procédé High VelocityOxy -Fuel (HVOF), ce procédé qui a marqué l'évolution technologique de la projection thermique mais par source

enthalpique gazeuse ; pour des revêtements à haute température pour les turbines à gaz dans le domaine aéronautique et spatial. [4]

I-2 / Qu'est-ce que la projection thermique ? [1-5]

La projection thermique ou à « pulvérisation thermique » ; est une technologie de traitement de surface par voie sèche permettant d'appliquer à bas coûts et dans le respect de l'environnement des revêtements épais (quelques dizaines de micromètres à quelques centaines généralement) aux propriétés très variées. Les matériaux déposés sont principalement des métaux, des céramiques, des polymères, et des composites avec pour objectif de protéger ou d'améliorer les propriétés du substrat contre divers phénomènes tels que la corrosion, l'attaque chimique, l'abrasion, l'usure et le transfert de chaleur.

Les revêtements permettent ainsi d'allonger la durée de vie utile de la pièce, d'augmenter son efficacité et/ou de réduire les coûts de maintenance/réparation (par exemple dans l'aviation, l'automobile, la marine, la reproduction d'électricité, etc....). La technique de projection thermique peut également être utilisée pour donner une seconde vie à des pièces usées (restaurer ou réparer une pièce). Finalement, les revêtements peuvent être appliqués de façon manuelle (incluant sur site) ou bien en usine de façon robotisée.

Les procédés de projection thermique se regroupent sous trois grandes catégories: la projection à la flamme (flamme spray), la projection à arc électrique (Electric arc spray) et la projection plasma (plasma arc spray). La projection à froid (cold spray) peut être considérée comme une variante de la projection thermique. Cependant, elle ne fait pas partie des trois grandes catégories de la projection thermique, car elle se caractérise comme étant un procédé d'énergie cinétique. [3]

Aujourd'hui les objectifs se focalisent plus sur la réduction des coûts et l'amélioration des performances des pièces traitées. [8]

I-2 .1/ Les principes de base

Quelle que se soit la technique de projection thermique utilisée, le principe est basé sur l'introduction de la matière/ou particules dans un flux de gaz énergétique/source d'enthalpie, dotée d'énergie cinétique. Dont La source d'enthalpie peut être obtenue de deux façons distinctes :

- Par combustion/détonation des mélanges gazeux (projection à la flamme, projection par canon à détonation);
- Par ionisation de gaz de différentes natures (air, argon, hydrogène, hélium, etc.) à l'aide d'une décharge électrique ou d'une exposition à un rayonnement électromagnétique à haute fréquence (projection plasma à l'arc soufflé ou plasma radio fréquence).

Le matériau/ou particule qui pénètre dans la source enthalpique sous différentes formes : poudres, baguettes ou fils continus subit un transfert thermique et cinétique pour être fondus ou portés à l'état plastique et accéléré en direction d'un substrat sur lequel ils s'écrasent et se solidifient sous forme des lamelles. L'empilement des particules écrasées sur le substrat constitue alors le revêtement (dépôt).

L'équipement typique en projection thermique consiste alors en un fusil de projection, une source de chaleur, un matériau à déposer, un gaz porteur et une unité de contrôle (console). Tous ces éléments peuvent être facilement adaptés à des applications très diverses. Cette polyvalence permet aux ingénieurs en industrie d'utiliser les techniques de projection thermique pour améliorer significativement la durée de vie ou les fonctionnalités d'équipements, de composants & de structures très variées. [1-2-4]

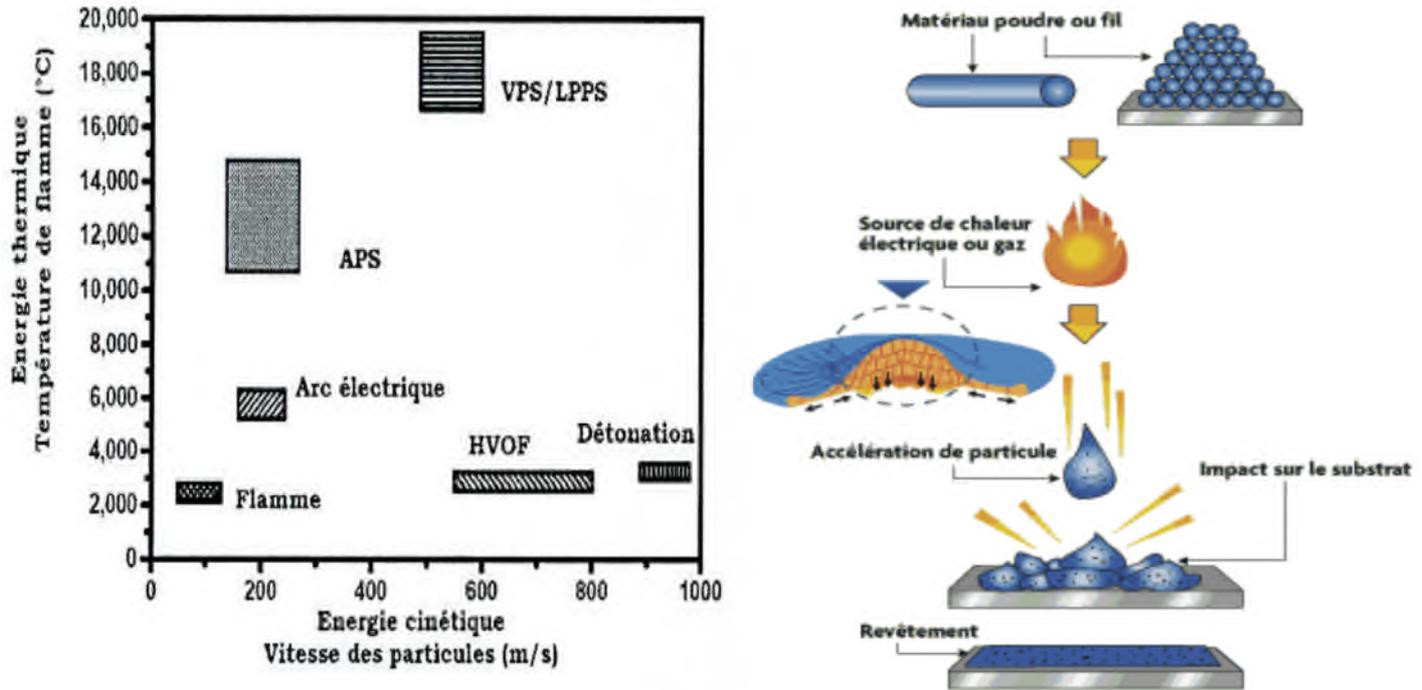
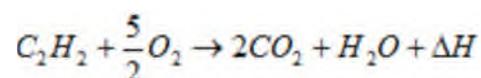


Figure I.3-Caractéristiques des différents procédés de projection thermique [9].

I-3 / LES DIFFERENTES PROCÉDES DE LA PROJECTION THERMIQUE

I-3-1 / Projection flamme

Ce procédé de projection thermique, est une technique plus ancienne largement employée dans le monde compte tenu de sa simplicité et de son faible coût d'équipement dont le principe de base utilise de l'énergie d'une réaction chimique de combustion. Cette énergie thermique provenant de la combustion d'un carburant sous forme gazeuse avec l'oxygène, Les principaux mélanges de gaz enthalpiques sont : acétylène/oxygène, hydrogène/oxygène ou propane/oxygène. Ils permettent d'atteindre des températures de flamme varie de 2800°C à 3150°C. Pour ce procédé l'acétylène est souvent préféré à d'autres combustibles gazeux, la réaction obtenue est la suivante [9]:



On distingue trois grandes techniques de projection à la flamme. [4]

➤ Dans la technologie dite **flamme-poudre** consistant à introduire un matériau sous forme de poudre dans une flamme oxy-combustible diffusante qui le véhicule jusqu'au substrat grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion figure I.4. [4] Tel que la température de la flamme est de l'ordre de 3000 °C, et les températures atteintes par les particules à projeter ne dépassent généralement pas 2000 °C, avec une vitesse faible de l'ordre ~50 m/s, et une distance comprise entre 100 et 200 mm entre la buse et le substrat. 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 3 kg/h sans échauffement important du substrat ($T < 250$ °C). Les matériaux les plus utilisés restent les alliages auto-fusibles (alliages à base Nickel ou Cobalt contenant des éléments de petite taille tels que le bore et/ ou le silicium et chargés éventuellement en carbures). Les taux de porosité varient de 10 à 20% avec un rendement moyen de 50 %. La force d'adhérence des dépôts au substrat est de 20 à 40 MPa. [5-2]

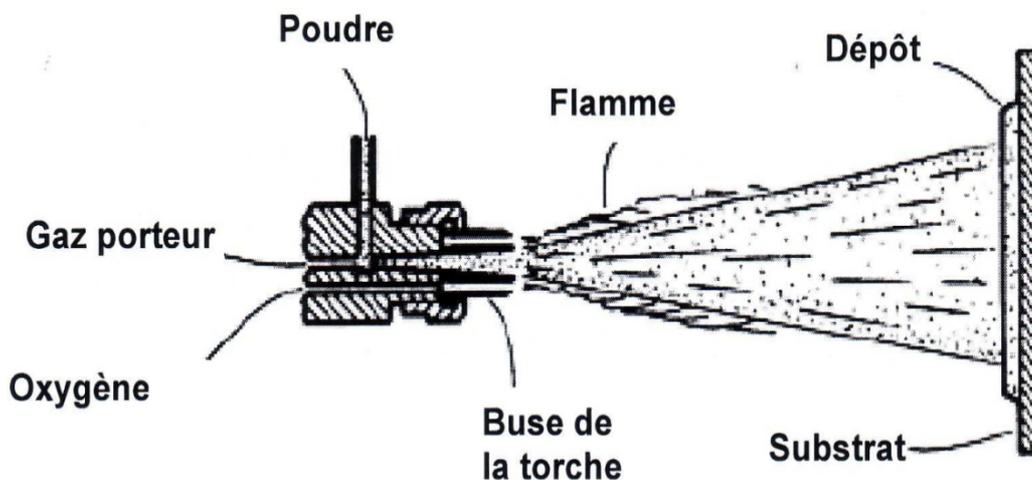


Figure I.4 -Schéma du principe d'un pistolet flamme poudre.

➤ Pour le second procédé appelé « **projection flamme-fil** » où le matériau d'apport est sous forme de fil, de baguette ou de cordon figure I.5. [6]. Ce procédé utilise les mêmes gaz que ceux utilisés en projection flamme poudre (oxygène + gaz combustible) pour faire fondre le matériau. Une fois fondu, le matériau d'apport est projeté sur le substrat par un courant d'air comprimé, servant à l'atomisation de l'extrémité fondue des fils. La vitesse des particules varie entre 30 et 150 m/s, ce qui produit des taux des porosités relativement élevés (entre 5 et 10%) et une adhérence limitée. Le taux de dépôt varie de quelques kilogrammes par heure pour la projection de poudre jusqu'à quelques dizaines de kilogrammes par heure pour la projection de fil.

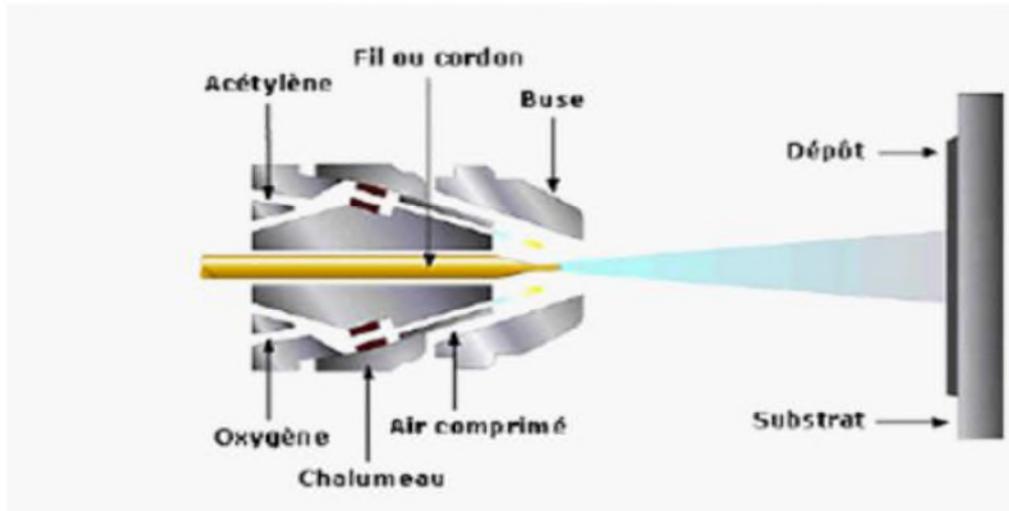


Figure I.5 -Schéma d'un pistolet flamme fil [6].

➤ Pour le troisième procédé qui se nomme **Flamme hypersonique** tire sa désignation de la vitesse très élevée de sortie des gaz. On distingue deux types : la projection hypersonique à tire continue HVOF (High VelocityOxy Fuel), et la projection à tire discontinue canon détonation.

- Ce dernier est connu sous le nom de **D-Gun (détonation gun)**. Le dispositif principal est un Canon à détonation, constitué d'un tube de diamètre 21 à 25 mm et d'une longueur d'environ 1 m fermé à une de ses extrémités et refroidi à l'eau. Il est équipé d'un système soupapes pour injecter les gaz et la poudre ainsi que d'un dispositif d'allumage entièrement automatisé. Dont la réaction d'oxydation se produit avec une vitesse supérieure à la vitesse du son.

Le matériau d'apport, sous forme de poudre, est injectée en même temps que les gaz de combustion généralement acétylène/oxygène. L'onde de choc de l'explosion amorcée par une étincelle se propage dans le tube avec une surpression de l'ordre de 2 MPa chauffe et accélère les particules puis projeter la poudre tout au long du canon avec une vitesse très grande proche de 1000 m/s vers la surface du substrat à traiter. Les allumages sont reproduits avec une fréquence de 4 à 10 tirs par seconde ; dont le régime de projection est donc discontinu et entre chaque tir, et successivement suivis d'un balayage du canon avec un gaz neutre. Le revêtement obtenu possède des caractéristiques remarquables telles que un faible taux de porosité moins de 1%, et une très bonne adhérence qui est souvent supérieur à 80 MPa mais il est limité à une épaisseur qui ne dépasse pas 300 μm , à des taux horaires de dépôts de l'ordre de 3 à 5 kg/h. Les matériaux les plus fréquemment utilisés sont les carbures de W et de Cr avec des liens de Ni ou Co, mais aussi des oxydes de chrome ou de l'aluminium. Les applications en protection anti-usure sont dans les domaines de l'aéronautique et de la sidérurgie. [2-5,6].

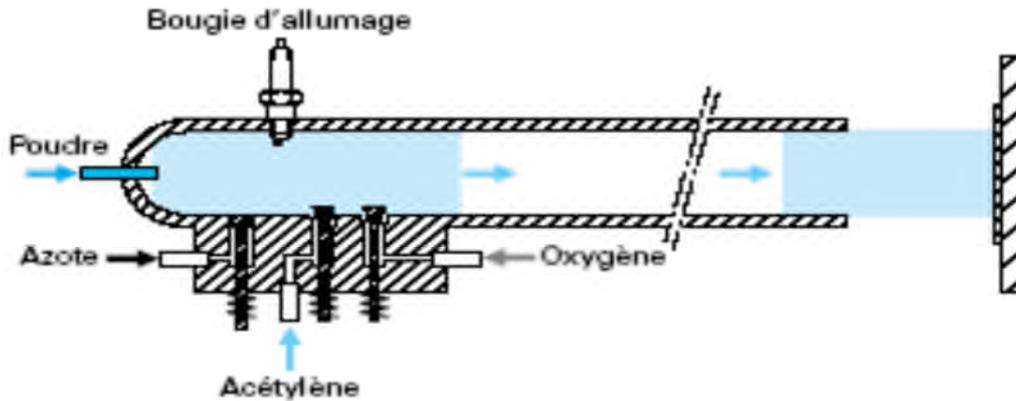


Figure I.6 -Principe de fonctionnement d'un canon à détonation [5].

- Le procédé **HVOF (High Velocity Oxy-Fuel)** est une technologie de pointe Conçue par James Browning en 1982, qui utilise comme gaz de combustion les mélanges carburant/comburant de type gazeux (oxygène – hydrogène/propane/propylène/gaz naturel) et ou liquide (air comprimé – kérosène ou white spirit) pour le procédé appelé HVOF (High Velocity Air Fuel).

Le gaz de combustion est brûlé en présence d'oxygène à haute pression de 5 à 7 bars dans une chambre de combustion afin de générer une flamme qui atteint une vitesse supersonique de 1800 à 2200 m/s, et des températures de 2500 à 2800°C. Cette flamme passe par un canon et se dégage dans l'atmosphère ouverte en utilisant une buse de différentes longueurs. La poudre est introduites dans le jet supersonique de façon radiale ou axiale à l'aide d'un gaz neutre, les particules de poudre sont fondues, accélérées à une vitesse de 300 – 600 m/s et dirigées vers la surface à recouvrir. Les pressions importantes atteintes dans le pistolet n'autorisent pas l'utilisation de l'acétylène comme gaz combustible (risque d'explosion). Lorsque les particules impactent, elles se déforment, s'imbriquent et se solidifient à la surface du substrat.

Ce procédé permet d'avoir un dépôt de très bonne qualité avec une dureté élevée. Le taux de porosité est généralement inférieur à 2% avec une bonne adhérence (70-90 MPa) et une faible rugosité de surface. Ce procédé permet de déposer des métaux (Ni, Co, Mo, Cr), des alliages (Inconel, MCrAlY, NiCr), des alliages auto-fusibles, mais aussi des carbures (WC-Co, TiC-Ni).

Les applications sont les protections anti-corrosion et anti-usure, les barrières thermiques, mais également la réparation, avec des dépôts de fortes épaisseurs en plusieurs passes Le coût de l'utilisation est fortement lié à la nature et à la consommation des gaz qui peut atteindre 1000 NL/min. Le taux de dépôt est de l'ordre d'une dizaine de kilogrammes par heure. [7-4-5].

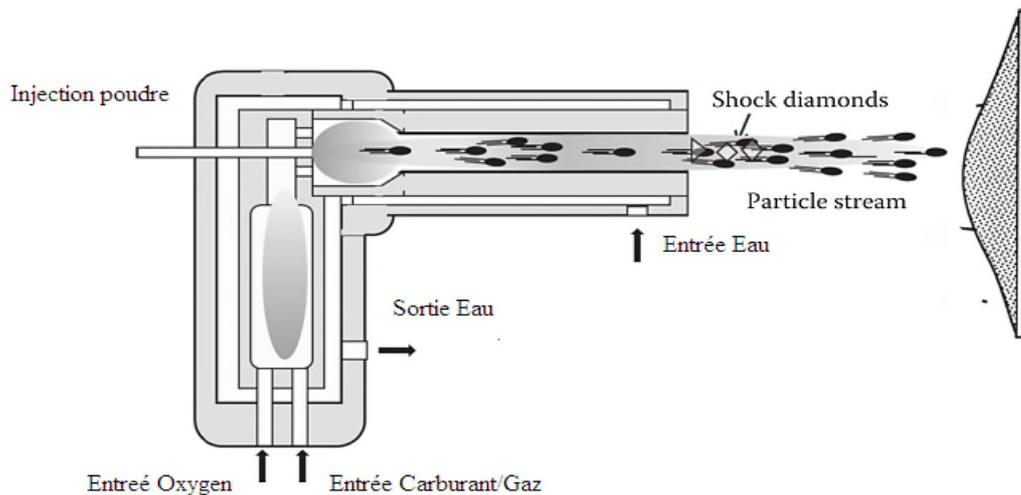


Figure I.7 -Principe de fonctionnement d'un canon à détonation [7].

I-3-2 / Projection Plasma

La projection à la torche à plasma d'arc soufflé est l'un des procédés les plus utilisés. Elle est constituée de deux électrodes considérées comme étant les composantes maîtresses. D'une Anode sous forme cylindrique en cuivre qui joue le rôle de collecteur d'électrons, refroidissement du système, et pour sa bonne conductivité thermique, d'autre part d'une cathode en tungstène sous forme conique. Comme son nom indique cette technique consiste à l'utilisation d'un gaz plasmagène dont ce dernier qui se distingue des trois autres états de la matière (solide, liquide et gaz) ; considéré comme le 4ème état de la matière.

Dans le processus de projection, consiste en une ionisation partielle d'un gaz plasmagène ; dont on fait passer ce dernier à travers un champ électrique et d'initier le passage du courant en faisant claquer un arc à l'aide d'un générateur haute tension, et haute fréquence. Le plasma apparaît avec l'arc, lequel est maintenu entre l'anode et la cathode de la torche, avec un courant fort et faible tension. L'arc permet d'élever considérablement la température du mélange gazeux qui subit une très forte dilatation laquelle force également le plasma à sortir de l'anode. Les vitesses de l'écoulement sont typiquement de l'ordre de 800 à 2200 m/s en sortie de tuyère, et avec un plasma ayant une très faible densité (1/30 à 1/40 du gaz injectés), et une température qui dépasse 20 000 °K.

Le produit à déposer est injecté sous forme de poudre dans ce plasma, à quelques millimètres de la sortie de la tuyère, et véhiculée par un gaz neutre ; (H₂) hydrogène, (Ar) argon, (He) hélium ou (Ne) azote. Ces gaz permettent d'augmenter la température des particules jusqu'à leur fusion.

Avec la température du jet de gaz dépasse 20 000 °K est susceptible de faire fondre tous les matériaux qui peuvent être transformés en poudre. Après que le matériau soit fondu ou porté à l'état plastique dans le jet plasmagène, il sera pulvérisé ou propulsé vers une surface à revêtir. A cet instant, les gouttelettes fondues (particules plastifiées) s'écrasent, rapidement refroidies, solidifient et forment le dépôt.

Les dépôts réalisés avec cette technique ont de nombreuses applications : barrière sthermiques, protection contre l'oxydation et la corrosion, résistance au frottement et à l'usure, revêtements conducteurs électriques et isolants, implants médicaux, etc... [8-9-10]

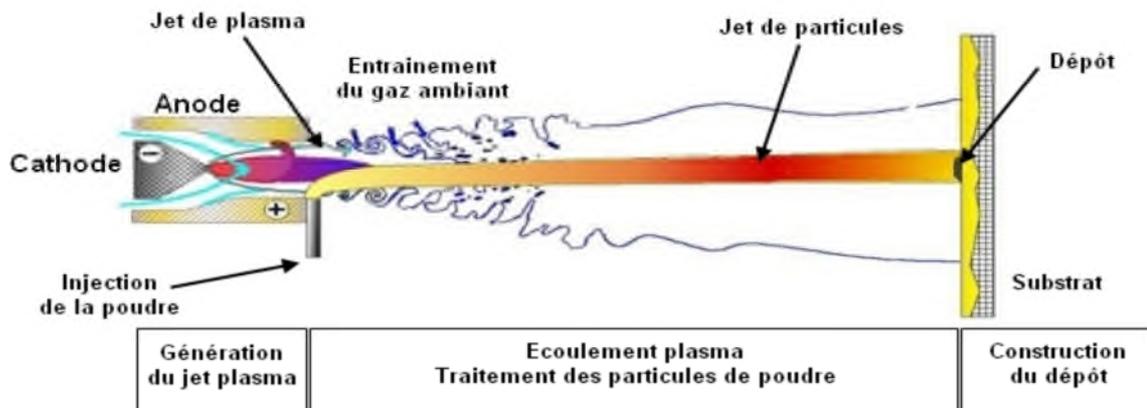


Figure I.8 -Schéma de principe de la projection plasma [13].

A partir de ce procédé, différentes techniques de projection ont été développées, selon l'environnement de projection. On distingue deux catégories: la projection sous air (APS, Atmospheric Plasma Spaying) et la projection sous atmosphère contrôlée (CAPS, Controlled Atmosphere Plasma Spraying). Le terme générique de CAPS englobe la projection sous vide (VPS, Vacuum Plasma Spraying), sous gaz inerte (IGPS, Inert Gas Plasma Spraying) et la projection en atmosphère réactive (RPS, Reactive gas Plasma Spraying). En effet, la nature et les propriétés de la couche déposée dépendent également de l'interaction du jet de particules avec son environnement avant de se déposer sur le substrat (refroidissement, oxydation par exemple). [17]

I-3-3 / Projection par arc électrique

L'équipement comporte un pistolet de projection ; assure la fusion et la projection du métal fondu, et un système d'avancement des fils. Avec un générateur de courant continu avec des tensions d'arc comprises entre 25 et 40 V, pour des intensités de courant allant de 100 à 500 A, maintenu par une régulation automatique et une source de gaz comprimé généralement de l'air/ou d'un gaz neutre. Les fils sont arrangés en bobines et sont amenés dans la zone de fusion du pistolet à travers deux tubes guides qui assurent leur bon positionnement du fil avant son entrée dans la zone de fusion et transmission du courant électrique aux fils.

La génération d'un arc électrique entre deux électrodes en contact sous formes de fils ductiles consommables comme source de chaleur permet de les fondre. Tel que la température dans la zone de fusion peut être de l'ordre de 6000 K. Le métal fondu réduit sous forme de gouttelettes, est pulvérisé grâce à au gaz d'atomisation appliqué entre les deux fils sert à la fois à détacher les bouts fondus et à transporter les gouttelettes vers le substrat [9]

Les épaisseurs des dépôts varient de 0.2 à 3 mm avec un taux de porosité de 5 à 10% et une adhérence de 20 à 40 MPa. Avec un débit important de 5 à 30 kg/h ; grâce la projection en continue qui est due à l'avancement des fils à vitesse constante.

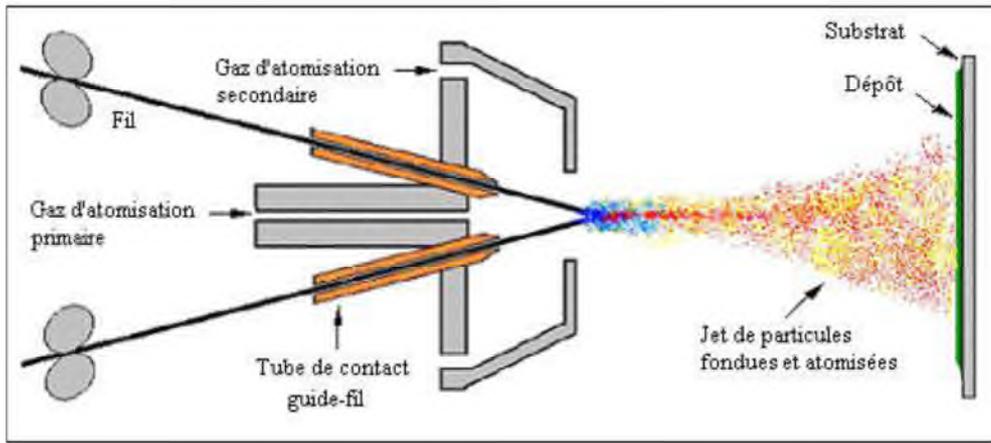


Figure I.9 -Principe de fonctionnement de projection arc-fil [8]

L'introduction d'un gaz d'atomisation secondaire (gaz de gainage) permet une d'amélioration les propriétés du dépôt soient :

- Augmentation de la vitesse des particules.
- Meilleure canalisation du jet des particules.
- Réduire l'entraînement de l'air ambiant et l'oxydation du dépôt.

Ce procédé de projection est simple et économique est le premier ayant utilisé l'énergie d'une décharge électrique. Mais limité aux matériaux conducteurs électriques (Aluminium, Cuivre, Zinc, Molybdène), des aciers, et des alliages NiCrAl, NiMoAl.

Grace à l'émergence de la technologie des fils fourrés ductiles, composés d'une gaine métallique remplie de poudre de matériaux non ductiles tend à y remédier on élargie la gamme des matériaux projetés qui permet de déposer des carbures (CrC, WC, TiC) et des oxydes ainsi que d'élaborer des couches composites. Ce qui rend cette technique concurrente pour les projections à la torche, à plasma, et à la flamme pour certaines applications et, en particulier, pour le revêtement de grandes surfaces. [4-5-8]

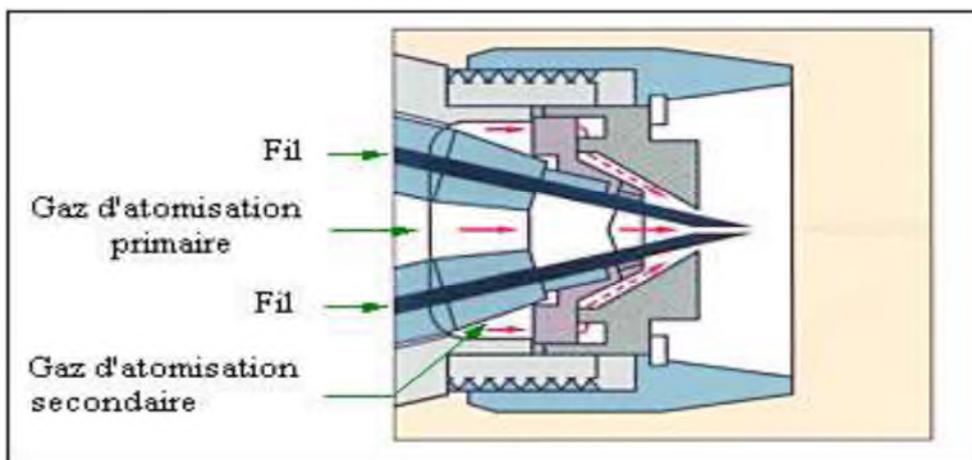


Figure I.10 -Schéma de la tête d'un pistolet de projection Arc-Fil équipé d'un système de gaz d'atomisation secondaire [8].

I-3-4 / Avantages et inconvénients de la projection arc-fil [8]

Les principaux avantages :

- ✓ Taux de débit important de 5 à 40 kg/h.
- ✓ procédé simple et économique la puissance électrique est de l'ordre 5 à 10 KW et le gaz d'atomisation est généralement de l'air comprimé.
- ✓ Un rendement énergétique important : 60 à 70 % de la puissance électrique fournie utilisées pour fondre les files.
- ✓ Le matériau projeté est complètement fondu.
- ✓ Pas nécessaire de refroidir le substrat.

Les principaux inconvénients :

- ✓ La porosité (de l'ordre 10%), et la teneur en oxyde (jusqu'à 25%) est élevée par rapport aux dépôts obtenus avec les autres techniques de projection thermique.
- ✓ Perte des composants les plus volatils (qui transformer en vapeur facilement) ; due à la température élevée au-delà de la température de fusion à l'extrémité des fils.
- ✓ Le procédé est instable due à la fluctuation de la tension ($\Delta V/V \neq 6$), suite à la différence de fusion entre le fil cathode et fil anode.
- ✓ Présence des taches d'impacte sur le substrat relativement large (25 à 50 mm de diamètre à 100 mm de la sortie torche) ; cause de jet de particules divergeant.

I-4/ FILS FOURRES

Le procédé projection thermique Arc-fil, utilise deux types de fils. Fils pleins constitués seulement du matériau à déposer pour les métaux purs et alliages ductiles (peuvent être obtenus à partir d'aciers à forte teneur en carbone et d'alliages métalliques), dont la réalisation de dépôts présentant une dureté élevée et une bonne résistance à l'usure. Toutefois en raison de leur mauvaise plasticité, la fabrication de ces fils est généralement difficile. Cause de l'appariation fils fourrés constitués d'une enveloppe métallique ductile pour les matériaux composites/ou pour des alliages plus complexe.

On distingue plusieurs types de fils fourrés qui se différent par leur mode de fabrication, on trouve des fils fourrés étirés dont la fabrication est limitée car elle est trop coûteuse, et des fils fourrés plissés ou sertis.

Actuellement, les fils fourrés sont élaborés essentiellement par formage au train de galets qui consiste à garnir de poudre métallique, grâce à des trémies, un feuillard métallique mis en forme par des galets puis à calibrer le fil obtenu à travers des filières jusqu'à obtenir le diamètre nominal et ensuite conditionné en bobines après avoir subit un traitement par étuvage et bleuissement au four.

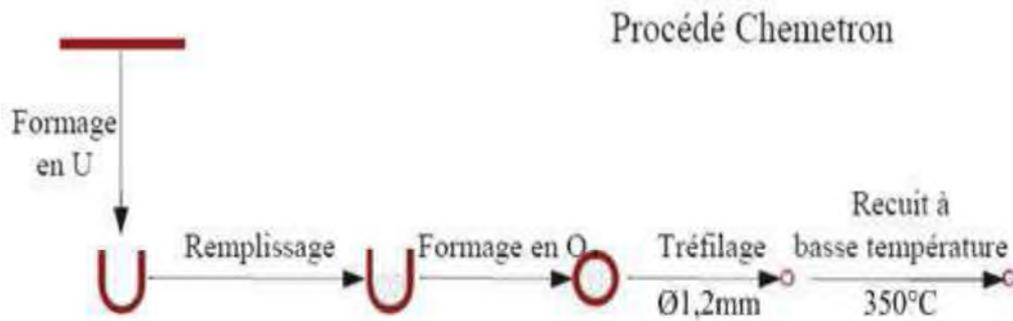


Figure I.11 -Principe du procédé développement d'un fil fourré utilisant la technologie Chemetron [11]

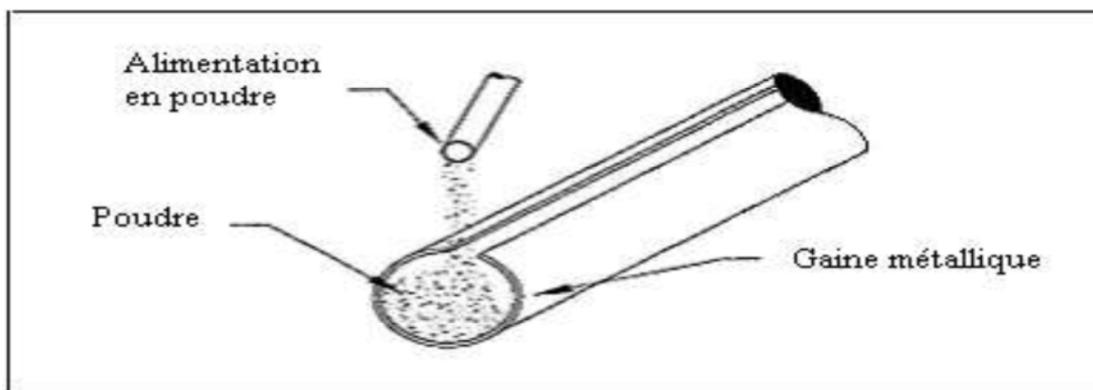


Figure I.12 -Schéma de principe du remplissage d'un fil fourré [8]

A partir des caractéristiques des fils fourrés qui résulte de la composition du fil, de son mode de fabrication ainsi de la condition de projection ; on découle trois types de morphologie de dépôt :

- Un dépôt qui présente une faible cohésion et adhérence en raison du manque d'accrochage entre les particules de la poudre originale et le reste du matériau. est due aux particules de poudre laquelle soient peu fondu au pas, qui éparpillés dans une matrice constituées du matériau de la gaine.
- Pour deuxième type de dépôt est constitué d'un empilement de lamelles provenant de la poudre et du matériau de la gaine ; est due aux particules de la poudre qui arrivent sur le substrat à l'état fondu et elles s'étalent lors de l'impact pour former des lamelles.
- Le troisième type de dépôt présente les meilleures propriétés en fonctionnement, grâce à une parfaite fusion de la poudre dans l'arc électrique. Qui est due au mélange homogène du matériau de la gaine et de la poudre

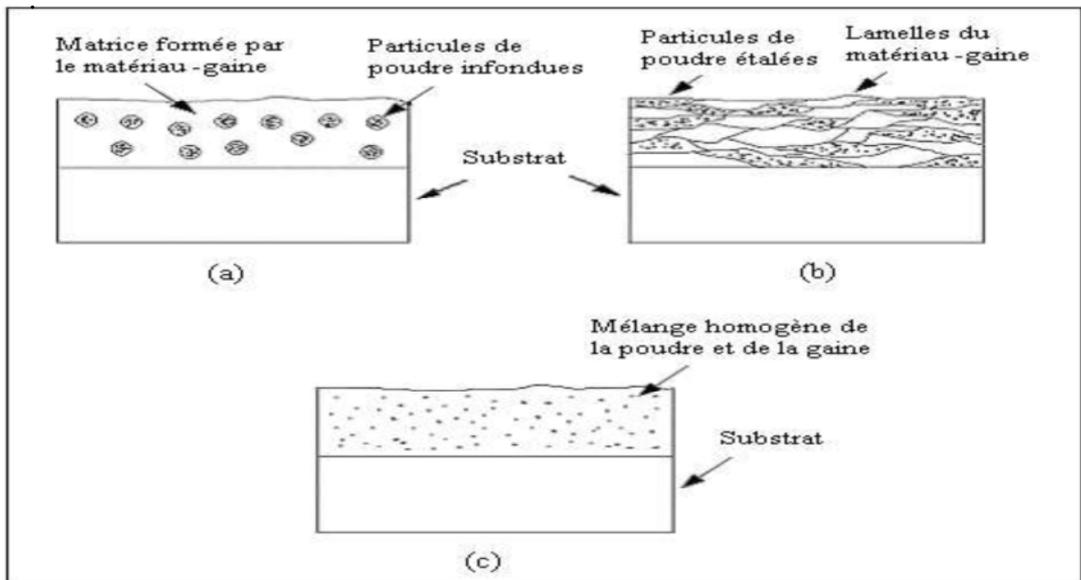


Figure I.13 -Un exemple de morphologies-type de dépôts obtenus avec des fils fourrés de Ni-TiB2 [8]

D'après ces différentes morphologies pour avoir un dépôt homogène, il faut ajuster soigneusement les paramètres de projection afin d'assurer une parfaite fusion de la poudre.

Les principaux avantages :

- La composition chimique peut être adaptée à l'application envisagée.
- Des poudres développées pour d'autres procédés de projection peuvent être utilisées pour remplir les fils fourrés.
- Des matériaux trop difficiles à mettre en œuvre sous forme de fils pleins peuvent être utilisés sous forme de fils fourrés.
- Des dépôts réalisés par arc-fil, permettent de produire des dépôts aux propriétés comparables avec un coût inférieur à ceux obtenus par projection plasma pour certaines applications.
- Les coûts d'équipement et les frais d'exploitation sont respectivement le cinquième et le neuvième de ceux de la technique de projection plasma.

I-5 /CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTES TECHNIQUES DE PROJECTION THERMIQUE

Le tableau suivant les principales caractéristiques des différentes techniques de projection thermique.

Caractéristiques	Flamme-poudre	Flamme-fil	Arc-électrique	Plasma	HVOF	Canon à détonation
Source de chaleur	Flamme oxya-cétylénique	Flamme oxya-cétylénique	Arc électrique	plasma	Flamme oxya-cétylénique	Flamme oxya-cétylénique
Température de Source (flamme) (C°)	3400	3400	10000-20000	8000-14000	2400-3100	3000
Transport des particules	Gaz-flamme	Air comprimé	Air comprimé	Gaz-flamme	Gaz-flamme	Gaz-flamme
Vitesse des particules (m/s)	40	150	250	50-300	400-600	600-1200
Rendement moyens (%)	50	70	80	70	70	70
Produit d'apport	poudre	Fil-cordon	fil	poudre	poudre	poudre
Adhérence(Mpa)	20-40	20-40	40	40-70	50-80	50-80
Matériaux d'apports	Métaux céramique, carbures dans une matrice métallique	Métaux céramique, carbures dans une matrice métallique	Métaux	Métaux céramique, carbures	Métaux carbures	céramique, carbures
Epaisseurs des dépôts (mm)			0.2-3			<300 µm
Porosité (%)	5-10	10-15	5-10	5	< 2	<1
Le taux de dépôt (kg/h)	2-3	1-30	5-30		1-10	3-5

Tableau I.1 -Différentes caractéristiques des techniques de projection thermique [8-12].

I-5.1 / Paramètre de projection influant sur le dépôt

Les caractéristiques du dépôt sont tout d'abord liées à la méthode de projection choisie.

On distingue plusieurs paramètres qui entre en joue dans la qualité des dépôts des différents procédés de la projection thermique, qui sont dépanadant les un des autres tel que :

- ✓ Paramètres de la préparation de surface ;
- ✓ Paramètres de mode fonctionnement de l'appareille utilisé et contrôler par l'opérateur ; comme l'intensité du courant d'arc, les débits ou les compositions des gaz, la tension aux bornes des électrodes, l'efficacité du refroidissement, l'usure des électrodes, etc...
- ✓ Paramètres cinématiques qui est due aux mouvements relatif entre torche et le substrat à revêtir ;
- ✓ Paramètres de la réalisation du dépôt et l'usinage final.
- ✓ paramètres relatifs aux matériaux d'apport ;
- ✓ paramètres d'injection de la poudre ;
- ✓ paramètres relatifs à l'interaction entre le dépôt et le substrat ;
- ✓ paramètres environnementaux et les paramètres énergétiques ;

Le tableau ci-dessous engendre les différents paramètres influant sur la qualité des dépôts, avec les différents procédés de la projection thermique. [5]

Paramètres	Procédés de la projection thermique		
	Pistolet à la flamme	Projection à l'arc électrique	Projection plasma
Débit des gaz	<ul style="list-style-type: none"> - Un excès d'oxygène augmente l'oxydation du dépôt, donc sa dureté et réduit sa résistance mécanique (flamme oxydante). - Un excès d'acétylène, entraîne un charbonnage du revêtement (flamme carburante). 		
Pression des gaz	<ul style="list-style-type: none"> - Une pression trop forte des gaz augmente les pertes de métal donc toutes les consommations. 		
Diamètre du fil ou du cordon	<ul style="list-style-type: none"> - Un diamètre de fil ou de cordon plus grand augmente le grain du dépôt et les pertes. 		
Vitesse du fil ou du cordon	<ul style="list-style-type: none"> - Trop grande, elle augmente la cadence et la grosseur du grain ; trop faible, elle augmente l'oxydation du dépôt. 		
Refroidissement	<ul style="list-style-type: none"> - Trop rapide, il génère le délaminage des couches. - Trop lent, il entraîne une surchauffe et donc une augmentation de l'oxydation du dépôt 		
Pression de l'air (vecteur de projection)	<ul style="list-style-type: none"> - Son accroissement diminue la grosseur du grain, mais augmente l'oxydation du dépôt. 		
Distance de projection	<ul style="list-style-type: none"> - Trop faible, elle crée des turbulences, des pertes et des défauts d'adhérence. - Trop grande, elle augmente le refroidissement des grains et entraîne une mauvaise adhérence. 		
Angle de projection	<ul style="list-style-type: none"> - La projection oblique augmente les pertes et diminue l'adhérence. 		
Vitesse de balayage	<ul style="list-style-type: none"> - Trop rapide, elle augmente les pertes de métal. Trop lente, elle donne des épaisseurs de dépôt irrégulières et élève la température du support. 		

Paramètres	Procédés de la projection thermique		
	Pistolet à la flamme	Projection à l'arc électrique	Projection plasma
Tension électrique à l'arc		<ul style="list-style-type: none"> - Elle doit être constante pour chaque métal projeté. Une baisse de 1 ou 2 volts entraîne le décrochage de l'arc et rend la projection irrégulière, voire impossible. - Les gouttelettes peuvent alors faire place à de petits morceaux de fils projetés. - L'élévation de l'intensité augmente la vitesse du fil, la grosseur du grain et surchauffe le dépôt. 	
Débit des poudres			<ul style="list-style-type: none"> - Il doit être aussi régulier que possible. Son élévation augmente la porosité du dépôt et les particules sont mal fondues.
Nature des gaz du plasma			<ul style="list-style-type: none"> - Un gaz neutre comme l'argon ou l'hélium permet un dépôt peu ou pas oxydé, alors qu'un plasma d'azote peut entraîner un phénomène de nitruration du dépôt.
Température du plasma			<ul style="list-style-type: none"> - Son élévation augmente la vitesse du jet de plasma, donc celle des particules et permet des revêtements plus compacts.

Tableau I.2-Paramètres influant sur la qualité des dépôts, avec les différents procédés de la projection thermique.

I-6 / PARAMETRES DE LA PROJECTION THERMIQUE[5-6-8]

Le phénomène d'adhérence du revêtement au substrat, est la propriété la plus importante dans le procédé de projection thermique. Car il dépend principalement de l'état de surface du substrat d'un point de vue morphologique (rugosité de la surface) et organique (huiles, graisses ...) et de nature chimique.

I-6 .1/ Le substrat

L'état physico-chimique de la surface du substrat joue un rôle très important dans les procédés projection thermique, soient dont la structure des lamelles, la formation du dépôt, et de son adhérence en conséquent. Cette propriété est en effet un critère de qualité car elle assure le bon accrochage du revêtement au substrat.

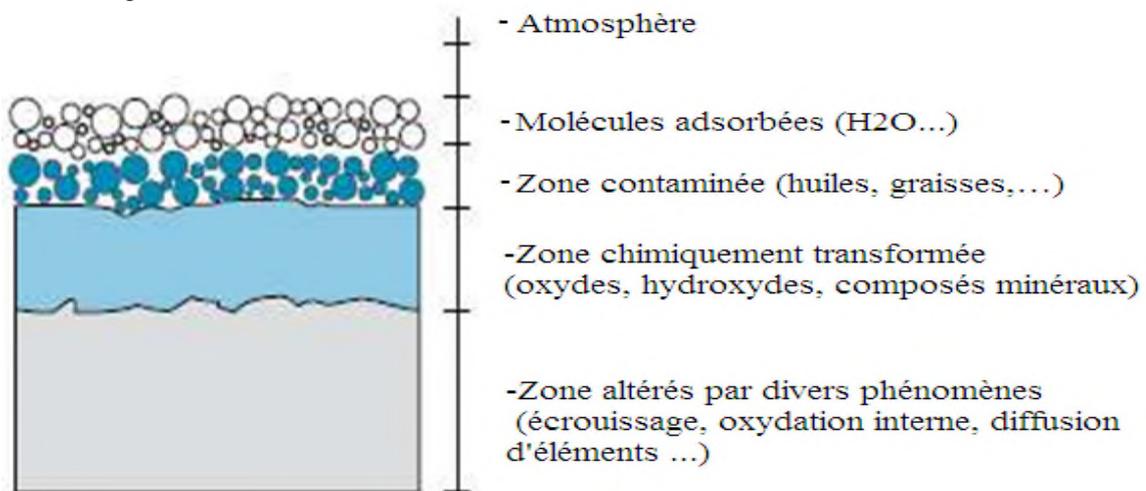


Figure I.14 -Représentation schématique des contaminants d'une surface métallique industrielle [5].

I-6 .2/ Préparation de substrat

La réalisation d'un dépôt par projection thermique commande une série d'opérations dans un ordre bien déterminé et indispensables qui va permettre de nettoyer les matériaux et/ou de modifier l'état géométrique de leur surface, qui est la clé de l'adhésion.

- **Le dégraissage**

Le dégraissage est un procédé chimique qui consiste à éliminer les matières grasses et également les poussières et autres agents formant une couche intermédiaire de faible cohésion (Graisses, inclusions superficielles, etc.). Généralement responsables de la mauvaise tenue des revêtements. On distingue deux types de dégraissage :

- Le dégraissage solvant dont le principe réside dans la capacité du solvant à solubiliser les corps gras sans dégradation du corps dissout ou du solvant lui-même. Il existe sous forme de solvants oxygénés, hydrocarbonés, chlorés, et les solvants fluorés.

- Le dégraissage alcalin tel que les pièces à dégraisser sont immergées dans un bain contenant de la lessive, constituée de 60 à 90 % de matière minérale et de 10 à 40 % de matière organique. Pour la saponification des matières grasses saponifiables, en suite la mise en émulsion des corps gras et particules solides restantes. (au moins deux dégraissages avec un temps de trempage (5 à 30 minutes), pour chacun suivi de deux rinçages).

Vue l'impact de l'utilisation de ces méthodes sur la dégradation environnementales qui deviennent de plus en plus agressives sur l'écosystème et la santé humaine, la réglementation REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restrictions of Chemicals) adoptée depuis 2006 impose aux industriels de renforcer la transparence et la connaissance des substances utilisées et d'encourager des innovations techniques afin de protéger la santé humaine et l'environnement.

- **Le sablage ou « grenailage »**

C'est un traitement mécanique permettant la création de la rugosité au sein d'une surface. Après le nettoyage des pièces, pour permettre et assurer aux particules en fusion ou à l'état pâteux un bon accrochage mécanique, il est nécessaire de créer une rugosité sur la surface à revêtir.

Ce procédé utilise généralement de particules d'abrasifs, qui joue un rôle important dans la qualité du prétraitement le plus souvent de l'alumine Al_2O_3 , ou SiC , SiO_2 , qui sont entraînées par de l'air sous pression et dirigées sur le substrat.

Un nettoyage ultérieur par ultrasons par exemple est indispensable pour éliminer les particules abrasives incrustées dans les creux et toute trace de poussière.

Comme la technique dégraissage le sablage présente de nombreux inconvénients compte tenu du respect de l'environnement et de l'effet négatif des résidus abrasif. Pour cela, de nouvelles techniques alternatives sont donc apparues telles que : le décapage par jet d'eau, le décapage par le gaz carbonique, préparation de surface par haute température ou le préchauffage et enfin le décapage par laser.

I-6 .3/ Caractéristiques du dépôt

Même si certaines méthodes de projection permettent d'obtenir des dépôts aux propriétés assez proches du matériau massif (VPS par exemple), les couches obtenues par projection sont de nature et de qualité très variables: pour les caractériser, une armure de paramètres est utilisée et presque systématiquement mesurée.[17]

a/ Construction du dépôt

La formation du revêtement est obtenue par les particules et/ou gouttelettes qui heurtent sur le substrat et la solidification rapide après leur déformation de manière telle que la phase de solidification débute avant la fin de la phase d'étalement. Ce qui engendre une couche lamellaire ; en fait à mesure les particules impactent sur des lamelles déjà totalement et /ou

partiellement solidifiées résulte un empilement de lamelles donc une structure lamellaire. Comportant éventuellement des oxydes, (présence d'oxygène dans le matériau projeté ou dans

l'environnement), des micro-porosités, des fissurations inter et intra lamellaires, des zones de contact entre lamelles et avec le substrat plus ou moins parfaites.

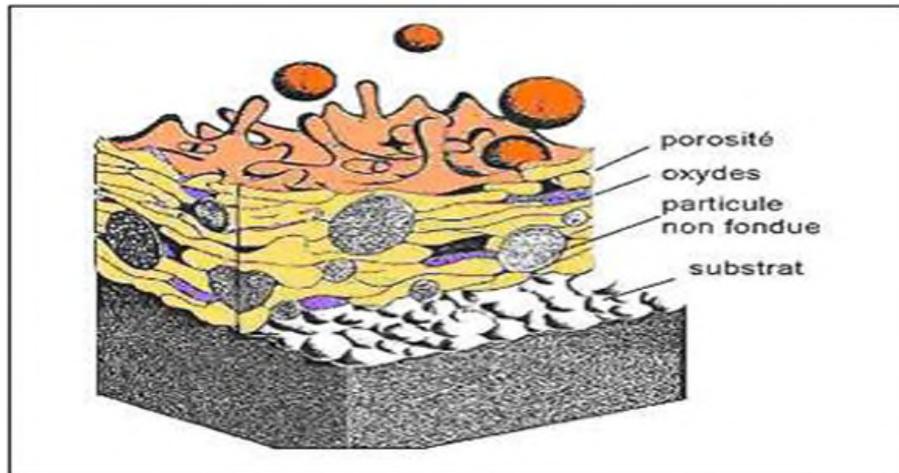


Figure I.15-Illustration schématique de la coupe d'un dépôt en croissance réalisé par projection thermique [8]

Le phénomène de gouttelettes (l'étalement et la solidification), est relativement complexes et joue un rôle très important sur les caractéristiques du dépôt et notamment sur sa porosité, car il dépend :

- De l'énergie cinétique et thermique des gouttelettes ;
- Viscosité et de leur mouillabilité vis à vis du matériau substrat ;
- De la nature et de l'état de surface du substrat ainsi que de sa température ;

Par contre l'éclaboussure peut être limitée en diminuant la taille des gouttelettes et/ou leur vitesse d'impact en jouant sur le débit du gaz d'atomisation ou sur la géométrie des buses. [8-14]

b/ Adhérence et dureté

- Les principaux facteurs qui agissent sur l'adhérence du dépôt au substrat sont, les réactions chimiques, des forces électrostatiques, la diffusion, l'accrochage mécanique, etc.

Comme vue dans le paragraphe précédant (solidification rapide des particules, morphologie des lamelles, des surfaces de contact réel entre les lamelles ainsi que de la rugosité du substrat), l'accrochage mécanique est le mécanisme principal du phénomène d'adhérence, dont le comportement mécanique du dépôt et en particulier son adhésion/cohésion.

Donc l'adhérence permet de caractériser l'accrochage du dépôt au substrat. Elle a l'unité d'une pression car elle correspond à la force par unité de surface nécessaire pour arracher le

revêtement de son substrat. On considère qu'une bonne adhérence se situe au-dessus de 80 MPa, mais en fait, tout dépend de la sollicitation que devra supporter la pièce projetée lors de son utilisation.

Pour bien favoriser ce phénomène Les opérations de préparation du substrat (nettoyage, préchauffage, sablage, etc.), favorisent un bon contact entre les lamelles étalées et le substrat, et l'accrochage mécanique des particules donc en grande partie l'adhérence finale du dépôt.

- La dureté des dépôts dépend de la nature du gaz de projection, dont la teneur en oxydes et la porosité du dépôt. L'augmentation de la porosité se traduit également par une diminution de la dureté moyenne du dépôt.

c/ Porosité et l'oxyde

Donne la proportion de zones vides à l'intérieur du dépôt. Exprimée en pourcentage, elle est mesurée par analyse d'image d'une coupe métallographique du dépôt, ou bien par poussée hydrostatique (écoulement d'un fluide sous pression à travers le dépôt). Une bonne porosité est inférieure à 5 %, tandis qu'un matériau très poreux se situe à plus de 20 %.

On discrimine trois types de porosités :

- ✓ la porosité fermée : dont des pores entièrement inclus dans le dépôt ;
- ✓ la porosité ouverte : avec des pores qui présentent une extrémité fermée et une autre ouverte au niveau de la surface du dépôt ;
- ✓ les pores ou plutôt des fissures qui traversent le dépôt, de sa surface jusqu'au substrat.

Il faut parfois faire la distinction entre porosité ouverte (les zones de vide communiquent) et la porosité fermée (les trous sont isolés les uns des autres). C'est pourquoi nous parlerons également de perméabilité du dépôt à un gaz ou un fluide donné. [17]

L'oxyde dépend des paramètres tels que le diamètre, la vitesse, et la température de surface des particules. L'augmentation de la température des particules se traduit par une diminution de leur viscosité et réduit la rugosité du dépôt.

Pour le procédé projection arc-fil ;les phénomènes d'oxydation mis en jeu qui peuvent intervenir à différents stades du procédé sont :

- Oxydation des gouttelettes métalliques chauffées en vol,
- Oxydation pendant la phase de formation des lamelles sur le substrat,
- Oxydation de la surface du dépôt lors de son refroidissement.

Ce dernier phénomène est généralement négligeable compte tenu de la température atteinte par le substrat (100-200°C).

d/ Corrosion

La corrosion (l'oxydation), est la plus grande ennemie auquel on doit faire face. Elle détruit l'équivalent de 3 à 5 % du produit intérieur brut au sein des les pays développés chaque année.

Les dépôts réalisés par projection thermique peuvent en particulier protégés de la corrosion. Car cette dernière elle dépende de leur microstructure et de la résistance des matériaux qui les constituent à la corrosion. Mais génèrent trois inconvénients quand ils sont utilisés pour lutter la corrosion :

- ✓ Le premier point faible est la teneur en oxydes qui est généré pendant la projection.
- ✓ Le deuxième réside dans la présence de pores ouverts et de fissures entre les lamelles, par lesquelles les environnements corrosifs pénètrent jusqu'au substrat.
- ✓ Le troisième est la dégradation des matériaux constitutifs des dépôts pendant la projection.

I - 7 / REVETEMENT EN MOLYBDENE[18-19-20]

I-7.1/ Définition

Le molybdène vient du mot grec ancien « μόλυβδος » molubdos qui signifie le plomb ; est connu depuis le 3e siècle avant notre ère. Car à l'époque, le terme « molybdaena » désignait le graphite et la galène, qui étaient confondus avec la molybdénite (à l'état naturel).

Il ne fut découvert grâce à son extraction à l'état de minerai que vers 1778, par wilhem Scheele parvient à extraire le molybdène de ces derniers, dont il utilisa l'acide nitrique pour produire de l'oxyde de molybdène blanc (MoO_3). Qui le nomme terre molybdène. Par la suite Peter Jakob Hjelm, en 1781, réussit à réduire l'oxyde de molybdène pour la première fois. Le résultat : du molybdène métallique.

Par contre, le symbole chimique et nos connaissances des propriétés chimiques du molybdène sont dus à Jöns Jakob Berzelius. Cependant si que au début du 20e siècle fut produit pour la première fois le molybdène pur grâce à la réduction du trioxyde de molybdène (MoO_3) avec de l'hydrogène.

La molybdénite (MoS_2) et le minerai de plomb jaune ou wulfénite (PbMoO_4) sont les plus importants minéraux utilisés pour la fabrication du molybdène. Dont la Chine et l'Amérique du nord et sud ont la plus grande réserve de molybdène du monde.

Le molybdène est un métal pur de couleur blanc métallique, le métal de transition. Grâce à ses propriétés mécaniques et chimiques uniques, le molybdène est un matériau exceptionnel qui peut répondre même aux exigences les plus délicates. Comme le molybdène possède un point

de fusion très élevé, un coefficient de dilatation thermique faible, ainsi qu'un haut niveau de conductibilité thermique, il est utilisé dans de nombreux secteurs différents.

Le molybdène est véritablement polyvalent. Il est utilisé pour produire des rubans et des fils pour l'industrie de l'éclairage, des embases semi-conductrices pour l'électronique de puissance, des électrodes pour la fusion du verre, des zones thermiques pour les fours

haute-température et des cibles de pulvérisation pour le revêtement des cellules solaires et des écrans plats.

De plus c'est un complément alimentaire, car le molybdène bien que peu connu fait pourtant partie de la famille des oligo-éléments, il possède des qualités thérapeutiques comme antioxydant et comme détoxifiant de l'organisme. Le molybdène permet une meilleure absorption du fer évitant ainsi les problèmes relié à une anémie, il est bénéfique contre les cancers. Le molybdène soigne les caries et aide dans les troubles de la digestion il collabore au métabolisme de la taurine. Cet oligo-élément est important pour la santé il prévient les risques d'impuissances.

I-7.2/ Caractéristiques :

Le tableau suivant illustre quelques caractéristiques :

Symbole	Mo
Nom	Molybdène
Numéro atomique	42
couleur	Gris métallique
Groupe	6
Période	5 périodes
Bloc	d
Famille d'éléments	Métal de transition
configuration électronique	[Kr] 5s ¹ 4d ⁵
Electron par niveau d'énergie	2, 8, 18, 13, 1
Masse atomique	95,95 ± 0,02 u
Point de fusion	2620 °C
Energie de fusion	26,4 kJ·mol ⁻¹
Point d'ébullition	5560 °C
Volume atomique	0,015 3 [nm ³]
Densité à 20 °C	10,2 [g/cm ³]
dureté	5,5
Volume molaire	9,38×10 ⁻⁶ m ³ ·mol ⁻¹
Nbr isotopes connus	33
Nbr isomères	8
Masse volumique	10,22 g·cm ⁻³ (20 °C)
Etat ordinaire	solide
Structure cristalline	structure cubique centrée
Constante du réseau cristallin	0,314 7 [nm]

Tableau I.3 - caractéristiques de molybdène.

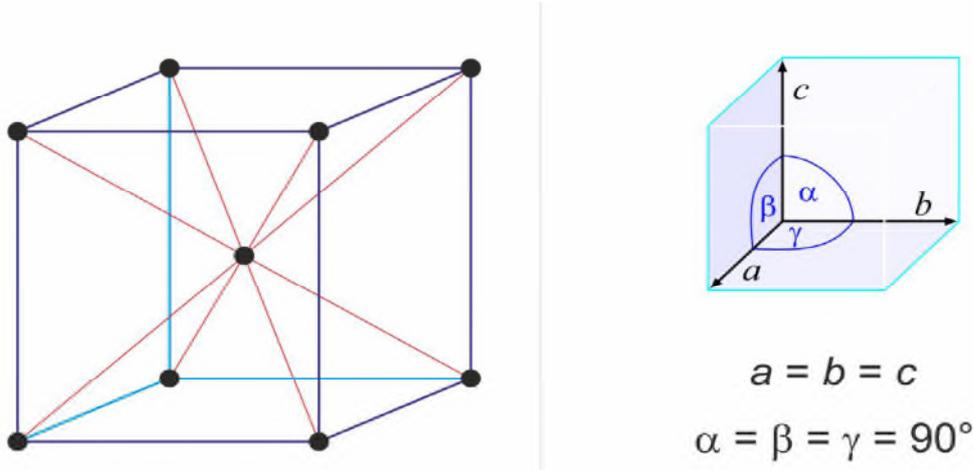


Figure I.16 - Structure cristalline Molybdène.

I-7.3/ Applications

Les applications industrielles de molybdène sont aussi variées que ses propriétés :

- **Haut degré de pureté et excellente résistance au fluage :** (molybdène est particulièrement pur, supporte des températures très élevées et est cependant facile à usiner. Par exemple, pour produire des creusets pour tous les procédés couramment employés dans le domaine de la croissance des saphirs. Grâce à leur pureté exceptionnelle, ces creusets ont fait leurs preuves en tant qu'outils de fusion et de solidification optimisés.) ;
- **Une stabilité dimensionnelle élevée et une excellente résistance à la corrosion :** (Grâce à son excellente stabilité dimensionnelle et son excellente résistance à la corrosion provoquée par les métaux et les verres en fusion, garantit un brassage optimal ainsi qu'une longue durée de vie des produits) ;
- **Conductivité thermique élevée et faible dilatation thermique :** (Grâce à ses bonnes propriétés de conductivité thermique et de dilatation thermique, adaptées aux matériaux semi-conducteurs en question, le molybdène et ses alliages constituent des substrats parfaits pour l'électronique de puissance. Utilisé comme embase, le molybdène dissipe la chaleur de manière fiable) ;
- **Du molybdène pur ou peut-être un alliage :** (Molybdène se comporte parfaitement dans toutes les applications. Grâce à l'ajout d'alliages divers ; on peut avoir par exemples :
 - **TZM (Titane-Zirconium-Molybdène)**
Plus résistant que le molybdène pur et possède une température de recristallisation plus élevée ainsi qu'une meilleure résistance au fluage. Il est utilisé dans des applications haute température faisant intervenir des charges mécaniques exigeantes,

par exemple pour les outils de forgeage ou les anodes rotatives dans les tubes à rayons X. Les températures d'utilisation recommandées se situent entre 700 et 1 400 °C.

- **MHC (Molybdène-Hafnium-Carbone)**

Ce matériau bénéficie d'une résistance exceptionnelle à la chaleur et au fluage et à 1 550 °C, la température d'utilisation maximale recommandée est supérieure de 150 °C. Il est utilisé, par exemple, dans les applications de mise en forme de métaux. Dans les filières d'extrusion, il peut supporter des charges thermiques et mécaniques extrêmes.

- **MoCu (Molybdène-Cuivre)**

Ce composite associe la conductivité thermique élevée du cuivre et la faible dilatation thermique du molybdène. Convient parfaitement à la fabrication d'éléments de refroidissement passifs (dissipateurs thermiques et répartiteurs de chaleur) dans les composants électroniques. De par leur faible poids, les composites molybdène-cuivre sont particulièrement adaptés pour ce type d'applications où chaque gramme compte : dans l'industrie automobile, ils sont utilisés comme plaques de support pour les modules IGBT en tant qu'onduleurs dans es pilotages électriques.

- **MoW (Molybdène-Tungstène)**

Utiliser pour la fabrication du zinc ainsi que pour les outils mélangeurs dans l'industrie du verre. En outre, il est utilisé pour produire des cibles de pulvérisation pour le revêtement des écrans plats. Les couches de MoW possèdent une résistance aux attaques améliorée, une propriété précieuse pour la fabrication des transistors à couche mince.

I-7.4/ Propriétés

- Propriétés thermophysiques

Ce matériau est également caractérisé par un haut niveau de conductivité thermique et une résistance électrique spécifique faible. Les atomes de molybdène sont fortement liés et l'élément possède un module d'élasticité plus élevé que beaucoup d'autres métaux. Les propriétés thermophysiques du molybdène changent en fonction de la température.

- Propriétés mécaniques

Grâce à son point de fusion élevé de 2620 °C, le molybdène conserve sa solidité et sa résistance au fluage même à haute température. La résistance du molybdène augmente encore plus selon le degré de travail à froid du matériau. Les matériaux à base de molybdène, contrairement à d'autres métaux, ont une ductilité qui augmente également avec le travail à froid. Le module d'élasticité du molybdène et de ses alliages est, comparé à d'autres métaux, très élevé, du fait des liaisons fortes existant entre les atomes de molybdène.

- **Température de transition fragile-ductile**

Si on chauffe le molybdène au-delà d'une certaine température, il perd sa fragilité et devient ductile. Cette température nécessaire pour provoquer la transition de la fragilité à la ductilité est appelée température de transition fragile-ductile.

- **Résistance chimique**

L'excellente résistance chimique du molybdène et de ses alliages est particulièrement appréciée dans l'industrie chimique et l'industrie du verre. Si l'humidité atmosphérique est inférieure à 60 %, le molybdène est résistant à la corrosion.. Les verres fondus, l'hydrogène, l'azote, les gaz nobles, les fusions de métaux et les céramiques en oxyde n'attaquent pas le molybdène même à très haute température.

I - 8 / TRIBOLOGIE [15-16, 23-30]

Le mot tribologie a été proposé par Peter Jost¹ en 1966 qui constitue de deux mots grec (tribos qui signifie frotter, et logie qui signifie science, étude). Donc, il s'agit de la science qui étudie les phénomènes capables de se produire entre deux systèmes matériels en contact, immobiles ou animés de mouvements relatifs. Dans le but est de regrouper sous une seule terminologie l'ensemble des sciences du frottement, on peut dire que c'est une science pluridisciplinaire faisant intervenir des notions de mécanique, physicochimie et de science des matériaux en général.

Au début du vingtième siècle, la tribologie s'intéresse spécialement au volume des matériaux en contact par la détermination des lois de comportement de frottement et d'usure (approche mécanique).

Au milieu du vingtième siècle, la tribologie s'est tournée vers l'étude des surfaces grâce aux concepts de la physique des surfaces. Et depuis une vingtaine d'années, la recherche en tribologie porte sur l'étude de la dynamique des interfaces avec la prise de conscience du rôle fondamental des éléments interfaciaux dans un contact. Cette dernière notion a permis une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et d'usure.

D'une manière générale, La tribologie est la branche de génie mécanique qui étudie le frottement, l'usure et la lubrification des surfaces de contact entre deux solides. Elle s'intéresse principalement aux corps solides ou à l'interaction entre un solide et un lubrifiant liquide (huile), onctueux (graisse) ou granulaire (poudre).

Les notions de tribologie sont définies comme suit :

- Surfaces
- Pertes par frottement
 - ✓ frottement de glissement
 - ✓ frottements de roulement, visqueux
- Usure des surfaces :
 - ✓ adhérence, abrasion, érosion, fatigue et fretting
- Lubrifiants :
 - ✓ Solides : types et propriétés
 - ✓ Onctueux : mécanismes d'action, types et propriétés
 - ✓ Liquides (huiles minérales et synthétiques) :

Les manifestations du frottement sont intégrées à nos comportements quotidiens. Car le frottement est très utile lorsque l'on cherche à immobiliser deux solides l'un par rapport à l'autre. En revanche nous sommes en général conscients des inconvénients qui résulte dès que on mais en mouvement relatif deux solides, qui conduit à une perte d'énergie mécanique qui est transformée en chaleur, et d'autre part, il conduit à une détérioration des surfaces par usure, fissuration thermique, fatigue, etc...

On peut schématiser les relations qui existent entre les trois aspects de la tribologie.

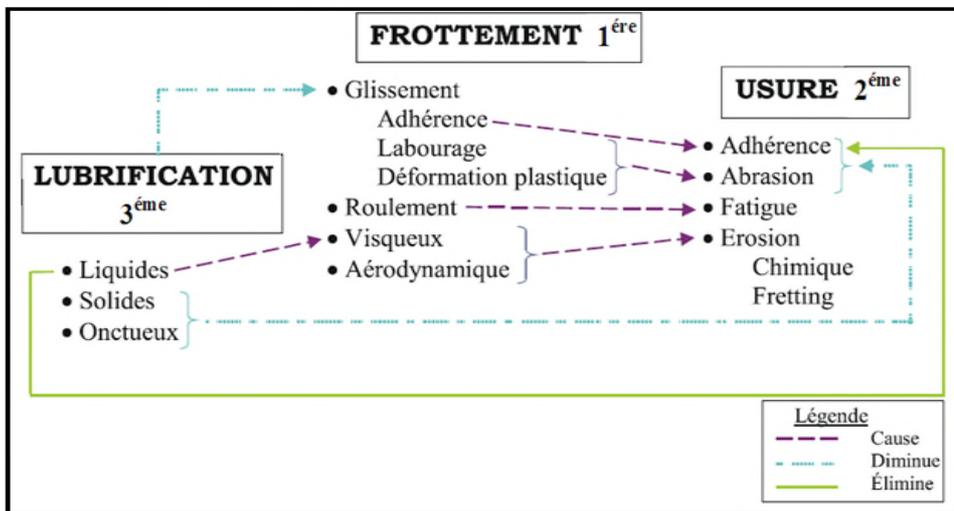


Figure I.17 - Relations entre les trois aspects de la tribologie [25].

Une étude récente de Holmbeg et al. [Référence] a montré que dans une voiture moyenne qui se déplaçant à une vitesse 60 km/h, les pertes par frottement représentaient 43% de l'énergie mécanique fourni par la moteur. Pour l'année 2009, 208 milliards de litres de carburant auraient été brûlés pour vaincre le frottement. Sur ce on comprend aisément l'intérêt que présente la tribologie et la maîtrise des frottements aussi bien pour les aspects économiques qu'environnementaux.

Les phénomènes de frottement sont multiformes, et complexes, ne se laissent pas découvrir facilement, car ils ne sont pas décrits par des propriétés principaux des matériaux. Dont on distingue deux phénomènes : le frottement et l'usure qui sont quasiment indépendants

A fin de bien comprendre et de permis une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et d'usure, l'introduction de la notion de contact à trois corps, qui s'articule autour des concepts de triplet tribologique, de circuit tribologique et de mécanisme d'accommodation de vitesse, est primordiale.

On commencer par une présentation des surfaces solides. Car en effet, c'est au niveau des ces derniers que vont s'initier tous les phénomènes physiques mis en jeu en tribologie.

I - 8.1/ Surface

L'ensemble des propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux en présence, et les caractéristiques géométriques du contact définies la notion de surface.

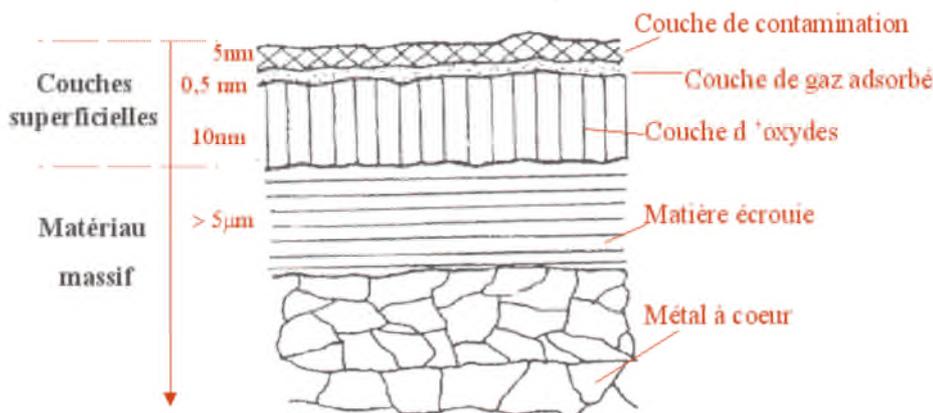


Figure I.18 - Structure de surface d'un métal [25].

Une surface réelle usinée n'est jamais parfaite, Quelque soit le moyen de mise en œuvre utilisé, elle présente toujours des défauts (des écarts Géométriques / par rapport à leur forme théorique) par suite des erreurs systématiques d'imperfections, acceptables dans la production, ces dernier joue un rôle primordial en tribologie.

On distingue deux types de défauts ; Les défauts peuvent être de forme (défauts macro-géométriques, ondulations), ou de petits défauts (défauts micro-géométriques) désignés plus communément sous le nom de rugosité.

Ces deux types de défauts peuvent être distingués de la manière suivante, en considérant le schéma (Figure I.3), relatif à l'état de surface :

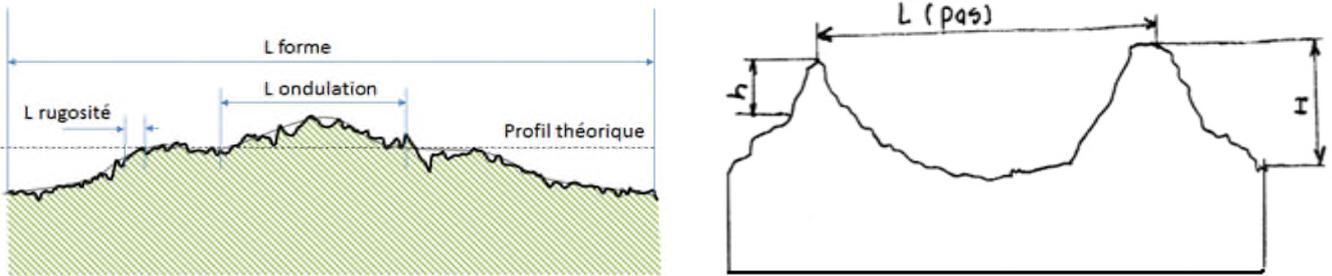


Figure I.19 - Défauts géométriques d'une surface [22-27].

On peut classer les défauts en fonction de leurs longueurs d'onde

- L : Longueur.
- H : hauteur d'onde.
- h : hauteur de rugosité.
- Si $L/H = 50$ à 1000 on a une ondulation.
- Si $L/H < 50$, on a une rugosité.

Donc la rugosité ou l'état de surface est caractérisée par des défauts de surfaces de faibles amplitudes.

I - 8.2/ Quelques propriétés des surfaces

Nous présentons quelques propriétés de surfaces qui jouent un rôle fondamental en tribologie

• Dureté des surfaces

La dureté caractérise la capacité d'un matériau (et donc de sa surface) à résister à la pénétration. Elle est généralement mesurée en appliquant un effort au moyen d'un poinçon (plus dur que le matériau à tester) de façon à laisser une empreinte sur la surface. La taille de l'empreinte laissée est inversement proportionnelle à la dureté. Il existe plusieurs types d'essais qui se différencient par la forme du poinçon utilisé et la force appliquée :

- dureté Brinell avec une bille (HB) ;
- dureté Vickers avec une pyramide (HV) ;
- dureté Rockwell avec un cône (HRC) ou une bille (HRB) ;
- dureté Shore (Matériaux mous).

- **Énergie de surface**

Les surfaces présentent une énergie qui provient des atomes en surface qui sont libres d'interagir avec l'environnement contrairement à ceux qui sont localisés au cœur du solide. Cette énergie joue un rôle fondamental dans de nombreux phénomènes tribologiques (adhésion, usure, mouillabilité).

Des théories plus avancées ont été proposées pour décrire le problème du frottement, parmi lesquelles on trouve la théorie du troisième corps

I - 8.3/ Le concept du triplet tribologique, et accommodation de vitesse

➤ Godet et Berthier, introduit le concept de la notion de troisième corps et le triplet tribologique (mécanisme, premiers corps, troisième corps) qui implique la superposition de phénomènes à trois échelles différentes.

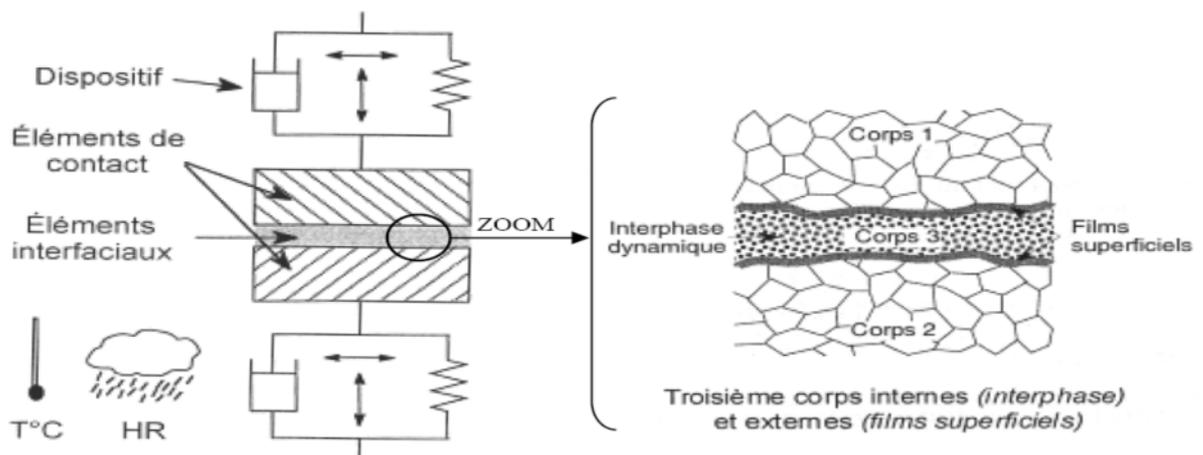


Figure I.20 - Le triplet tribologique de troisième corps [28].

Ce concept composé de :

- Mécanisme (élément de la machine) : qui sollicite le contact et transmettant les charges statique ou dynamique (F), Imposant une cinématique (v), Un environnement contenant le mécanisme « frottement (HR, T) » ;
- Les deux premiers corps constitués par les matériaux en contact qui supportent les sollicitations imposées par le mécanisme ;
- Le troisième corps est l'élément intercalaire méthodiquement présent dans le contact et qui transmet la charge (portance) d'un premier corps à l'autre.

Ce dernier représente ainsi l'ensemble des éléments s'intercalant entre les deux premiers corps, il est constitué :

- De films superficiels (contaminants, molécules absorbées, films d'oxydes...), induits par la réactivité des surfaces,
- De particules détachées (débris) s'accumulant lors du frottement, induits par les processus de dégradation des surfaces.

➤ Berthier considère aussi que l'étude du frottement et de l'usure passe par l'identification des mécanismes d'accommodation de vitesse activés dans le contact ou aux interfaces.

Il émet l'hypothèse de l'existence de plusieurs sites (S_i) où peut s'effectuer l'accommodation de vitesse (Figure 1.5).

Pour réaliser ce mécanisme, il met l'hypothèse de l'existence des sites (S_i), et modes (M_j), tel que Chaque site est susceptible d'accommoder les vitesses selon quatre modes différents (M_j) qui sont définies comme suite ;

Les sites :

- S_1 et S_2 : les premiers corps ;
- S_3 : le troisième corps ;
- S_2 et S_4 : la notion d'écrans notés, qui constituent la frontière entre premiers corps et troisième corps.

Les modes :

- M_1 : la déformation élastique ;
- M_2 : la fissuration ou rupture normale ;
- M_3 : le cisaillement ;
- M_4 : le roulement.

Il a définie le mécanisme d'accommodation comme étant l'association d'un site et d'un mode d'accommodation.

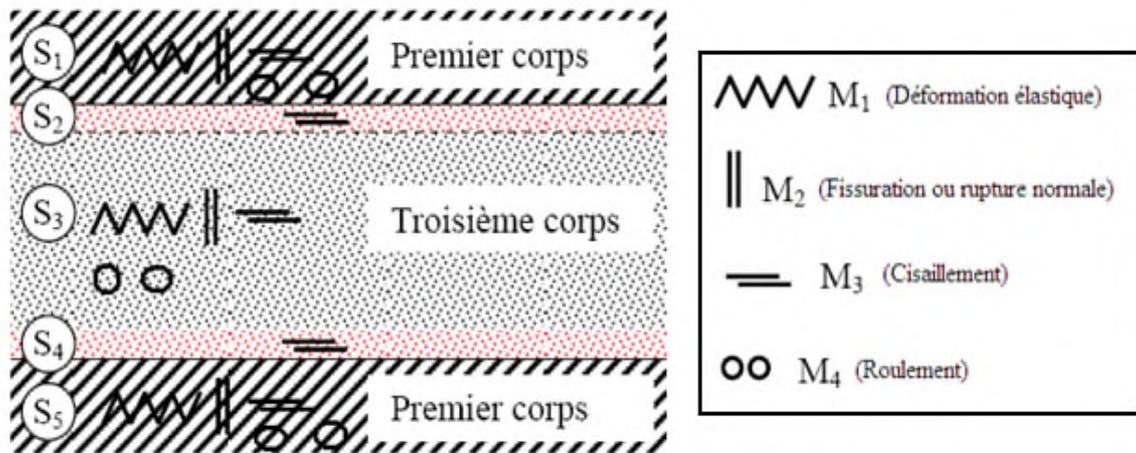


Figure I.21 - Représentation schématique des mécanismes d'accommodation de vitesse[22].

I - 8.4/ Le circuit tribologique

Le déplacement des deux corps premiers résulte un frottement dont les particules du troisième corps sont constamment en mouvement et sont soumis à des gradients de vitesse. Cette circulation de matière à l'intérieur et à l'extérieur du contact est définie sous le terme de circuit tribologique, a fin de comprendre la relation entre le troisième corps et l'usure dans un contact donné. Une représentation en deux dimensions des débits de troisième corps dans un contact élémentaire suivant les mécanismes de dégradation de surface.

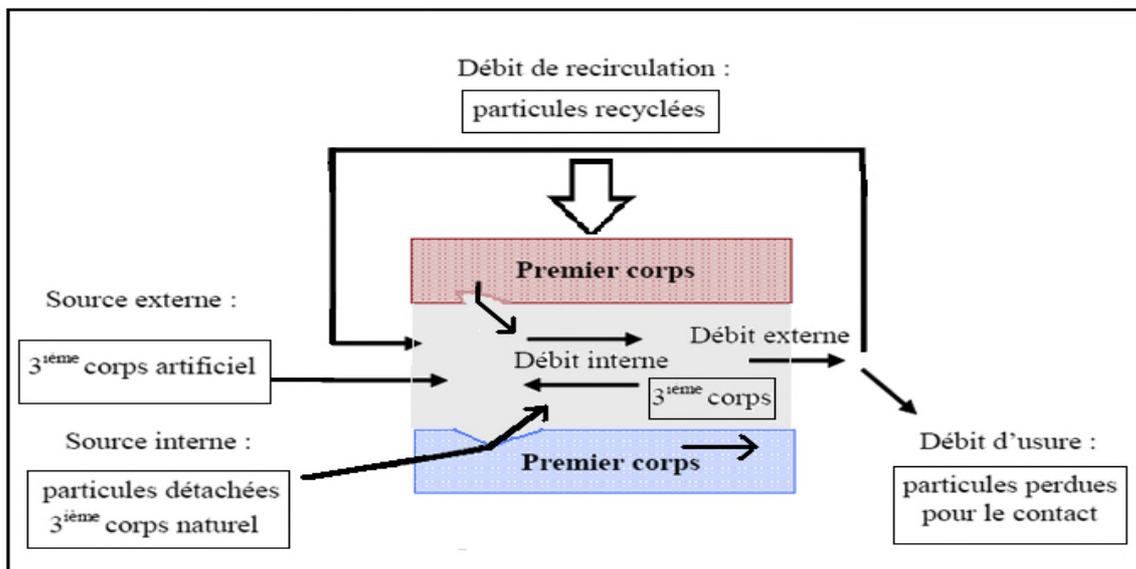


Figure I.22 -Schéma du circuit tribologique dans le cas d'un contact entre deux solides et 3^{ème} corps [23-22].

Des particules peuvent se détacher des premiers corps du fait de leur dégradation (usure), induit une source interne qui conduit à la formation d'un troisième corps naturel dans le contact (débit source interne), ce débit interne représente la circulation du troisième corps dans le contact ; tel que l'étude du contact revient à étudier l'écoulement de ce troisième corps et plus particulièrement les différents débits. L'introduction d'un troisième corps artificiel (lubrifiant solide ou liquide) correspond à une source externe (débit source externe), Ces particules vont s'écouler sous l'effet du cisaillement résultant du glissement des deux premiers corps. Dont certaines particules vont être éjectées du contact d'autres vont être recyclées (entrer à nouveau dans le contact). . On parlera alors de débit interne et externe. Il se divise en deux composantes : un débit de recirculation lorsque les particules sont réintroduites dans le contact et un débit d'usure lorsque les particules sont définitivement perdues pour le contact et ne participent plus à l'accommodation de vitesse. Dans cette approche (production du troisième corps), l'usure n'est pas relative à la dégradation des premiers corps (ce qui correspondrait au débit interne de troisième corps), Elle est ici représentée par la sortie des particules hors du contact, qui deviennent alors

Des particules d'usure (débris). Pour les particules restent dans le contact, elles peuvent avoir un rôle actif à jouer (support de charge, accommodation des vitesses,...).

I - 9 / MECANISME DE DEGRADATION DE SURFACE

I - 9.1 / Usure :

L'usure est définie généralement comme étant un ensemble complexe de phénomènes conduisant à des pertes de matières. Un mouvement de matière ou une transformation de matière en surface (physiques et chimiques) sous l'effet d'une interaction avec un autre milieu.

I - 9.2 / Mécanismes de dégradation de surface :

Les mécanismes de dégradation des matériaux provoquant le détachement des particules des premiers corps (débit source interne) et conduisant à l'usure. Cornet et Deville ont proposé une répartition des mécanismes à l'origine de l'usure dans l'ensemble des milieux industriels dont ils sont classés selon plusieurs familles dont les principales sont décrites ci-dessous :

- L'adhérence (Adhesive wear) : usure produite par le bris de point de soudure entre les surfaces ;
- l'abrasion (Abrasive wear) : usure de coupe produit par des éléments durs et saillants ;
- L'érosion (Erosive wear) : usure abrasive produite par des particules solides se déplaçant dans le contact ;
- La fatigue (Fatigue wear) : usure produite par des cycles répétés de chargement/déchargement, source de fissure et débris.
- Le fretting (Fretting wear) : usure produite par de petits déplacements successifs, produisant indirectement de l'usure par abrasion, par adhérence et favorisant la corrosion ;

- La corrosion (Corrosive wear) : usure de nature chimique qui se manifeste principalement par de l'oxydation ;
- Usure thermique : liée à une fusion locale d'un des matériaux.

Ces phénomènes d'usure sont proportionnels à la charge appliquée au contact et à la distance cinématique (distance effective de glissement cumulé) ;

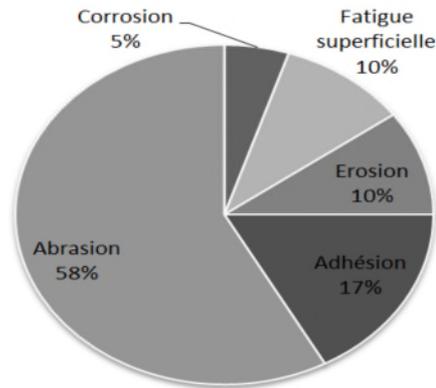


Figure .I.23 -Importance relative des mécanismes d'usure dans l'industrie [22].

Comme ces mécanismes de dégradation sont nombreux et variés, on se limite au :

➤ Usure adhésive

Les forces d'adhésion entre les surfaces mises en contact se développent. La rupture de ces liaisons adhésives nécessite d'exercer une contrainte de cisaillement dont l'origine du frottement. Elle peut s'exprimer comme suite :

$$\tau_a = f_a p_m$$

Tel que; p_m : la pression moyenne de contact ;

f_a : la contribution adhésive du coefficient de frottement. ;

τ_a : contrainte de cisaillement.

D'après le mécanisme illustré sur la figure ci-après on remarque que qu'il est plus facile de rompre le matériau (le moins résistant) sous sa surface plutôt que de rompre la liaison adhésive. Il est due aux joints d'adhérence qui est formé aux points de contact situés sur les aspérités des surfaces de deux corps frottant. La résistance de la jonction adhésive est en fonction de la nature physico-chimique des matériaux en contact.

L'usure adhésive se caractérise donc par des arrachements de matière irréguliers sur les surfaces. Les particules d'usure arrachées du matériau le plus tendre vont adhérer sur l'adversaire. L'usure adhésive est donc à la fois d'origine mécanique et physicochimique.

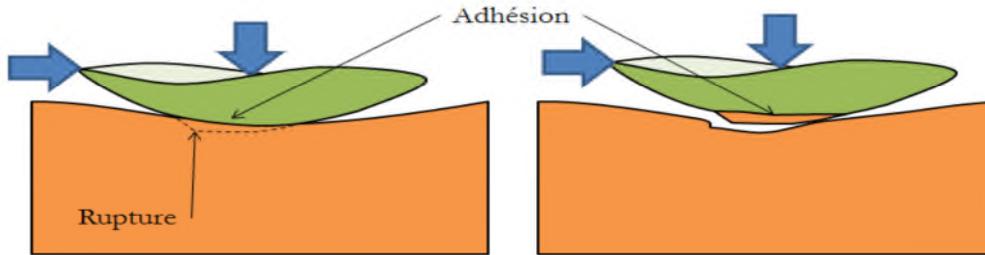


Figure I.24 - Mécanisme de l'usure adhésive [22].

Energie de surface des matériaux jouent un rôle très important dans L'adhésion et particulièrement leur travail qui dépendent de la pression de contact. C'est cette dernière élevée, il possible d'atteindre un régime sévère d'adhésion où les surfaces sont soudées. Le mécanisme est alors complètement bloqué, on parle de grippage.

➤ Usure abrasive

Le mécanisme de l'usure abrasive est défini lorsqu'un corps dur (un solide) déforme un autre corps plus mou plastiquement, avec ou sans arrachement de matière.

On parle d'abrasion à trois corps, si le corps rigide peut être une particule dure qui s'est introduit dans le contact. Et on parle du d'abrasion à deux corps si le corps rigide peut être un des deux protagonistes du contact.

L'usure abrasive est généralement limitée en augmentant la dureté du matériau le plus tendre. Dans le cas d'abrasion à deux corps, il est souhaitable de réduire l'index de plasticité afin de rester en régime élastique et limiter le labourage d'une des surfaces.

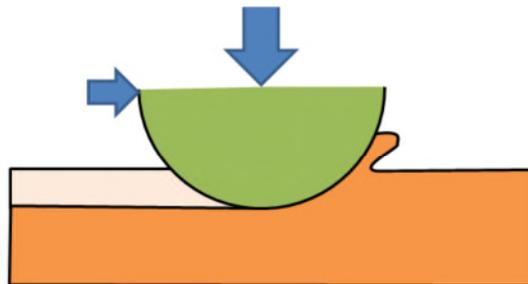


Figure I.25 - Mécanisme de l'usure abrasive [22]

I - 10/ LUBRIFICATION

I - 10.1 / Définition

Il y a plus de 4000 ans que les Égyptiens utilisaient des lubrifiants pour diminuer les efforts nécessaires au transport de gros blocs de pierres et de sculptures entières sur des patins de bois.

Un lubrifiant est une substance qui va être déposée dans un contact pour permettre la séparation des surfaces, c'est à dire l'interposition d'une couche fluide entre les sur faces frottantes qui permet de diminuer considérablement la résistance au glissement donc de protéger contre l'usure adhésive les pièces en contact, et de les protéger principalement contre des réactions chimiques avec l'environnement (corrosion, oxydation), et évacuer les débris (particule d'usure ou autres), les polluants, la chaleur générée, etc.

En plus, il est indispensable que le milieu résistant inter-facial possède une épaisseur suffisante pour éviter tout contact entre les aspérités des surfaces frottantes quelles que soient les valeurs des charges appliquées.

On peut résumer ces différentes fonctions comme suite :

➤ **Refroidir :**

La circulation de l'huile évacue les calories, et élimine les risques de fusion et de détérioration.

➤ **Etancher :**

Protection contre l'entrée d'impuretés. Il contribue à compléter l'étanchéité du moteur tel que l'huile protège constamment les pièces d'agressions comme les poussières aspirées par le moteur, l'eau et l'acide résultant de la combustion...).

➤ **Nettoyer :**

L'évacuation des impuretés telles que par exemple l'huile maintient en suspension et véhicule les imbrûlés issus de la combustion. (C'est à ce niveau qu'elle a de l'importance car il n'a plus d'étanchéité. Le moteur consomme anormalement. Il arrive même qu'il ait des grippages. C'est le phénomène d'usure par polissage).

➤ **Lubrifier :**

Diminuer les frottements, l'usure, et les résistances passives dans les machines, tel que améliorer leur rendement et économiser l'énergie. (La viscosité d'une huile moteur devrait rester constante malgré des écarts de température. L'huile ne doit pas figer au froid, elle ne doit pas se liquéfier à la chaleur).

Elles permettent aussi de :

- Contribuer à la longévité (Augmenter la durée de vie) des organes dont il les protéger contre les diverses formes de corrosion et d'usure;
- Transmettre de l'énergie ou de la chaleur ;
- Assurer l'isolation électrique ;
- Améliorer l'état de surface des pièces usinées ;

Chapitre II

Matériaux et Techniques
Expérimentales

II- INTRODUCTION

Le premier objectif de notre étude expérimentale est de réaliser un revêtement en molybdène sous forme d'un fil sur un substrat en acier de type A 60, (E335). Pour ce faire, nous avons utilisé le dépôt par projection thermique selon le procédé pistolet d'arc électrique entre deux fils, dont la réalisation est faite au niveau de l'entreprise privé «Algérie métallisation» sise à Rouïba spécialisée dans la rénovation et la récupération par métallisation des pièces mécaniques usées ; après avoir confectionner les échantillons au niveau du Hall de Technologie de l'Université de Bejaia.

Le second objectif est l'étude de la structure et la caractérisation mécanique basée sur l'essai d'usure par abrasion type disque-pion dans des conditions à sec, lequel est effectué en variant l'effort normal, et ceci afin d'étudier le comportement tribologique du revêtement du molybdène projeté flamme-fil.

Ce chapitre comprend en plus la présentation du matériau utilisé fils et substrat, le pistolet de projection thermique utilisé pour l'élaboration des dépôts, et les différentes techniques de caractérisation.

II-1 MATERIAUX UTILISES

II-1.1 Substrat

Le matériau de base utilisé dans cette étude comme substrat pour réaliser les dépôts, est un acier de construction mécanique d'usage général de type A60 / ou de type E335. C'est un acier doux ordinaire hypoeutectoïde qui présente une bonne ductilité, sa composition chimique est donnée dans le tableau ci-après : [38-39-40]

Eléments	C	Ni	Mn	Cu	Si	Fe
Compositions	0,14	< 0,03	0.90 à 1.30	0,119	0.27 à 0.33	Bal

Bal : pourcentage du fer élevé dans l'acier.

Tableau II.1 - La composition chimique de l'acier E335.

Dans le cadre de notre expérience, les échantillons du substrat utilisés pour la projection thermique ont été usinés et confectionner au niveau du Hall de Technologie de l'université de Bejaia, avec le tour parallèle pour avoir une forme de pion ; dont on a effectué un épaulement pour fixer l'échantillon lors de la projection, et un dressage pour avoir un bon état de surface.

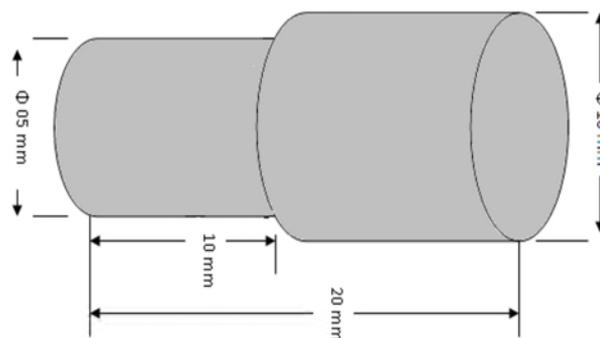


Figure II.1 - Echantillon utilisé pour la projection.

II-1.2 Préparation du substrat

Dans le cas de la projection thermique, L'état de surface du substrat joue un rôle très important sur la formation du dépôt car c'est la clé de l'adhésion. Pour cette raison, nos éprouvettes (échantillons) ont subi tout d'abord un usinage pour donner un état de surface favorisant l'adhérence du dépôt au substrat en Acier A 60, puis suivie d'une série d'opérations indispensables à réaliser dans un ordre bien établi avant la projection tel que :

- Un dégraissage : c'est la première étape de préparation des échantillons, qui consiste à débarrasser la surface de la plupart des impuretés (graisses, inclusions superficielles, etc.) généralement responsables de la mauvaise tenue des revêtements. Les échantillons sont dégraissés et nettoyés avec de l'éthanol.
- Un sablage (Grenaillage) : après avoir nettoyé les échantillons, il est nécessaire de créer une rugosité sur la surface à revêtir afin de permettre aux particules en fusion ou à l'état pâteux de venir épouser les rugosités de la surface et réaliser ainsi un bon accrochage mécanique. Le principe consiste à cribler la surface à revêtir par un jet de particules à une pression d'air de 5 bars. A la fin de cette opération, on nettoie les échantillons avec de l'éthanol pour éliminer les souillures.
- Un préchauffage : L'accrochage avec le substrat peut être favorisé si celui-ci a été préalablement soumis à un préchauffage. Pour cette raison, et avant la déposition du molybdène, les éprouvettes ont été préchauffées pour améliorer l'adhérence d'une part et éliminer en partie les oxydes et diminuer la porosité du dépôt d'autre part.

II-1.3 Le dépôt considéré pour le revêtement

Nous avons utilisé pour notre expérience un fil en molybdène. Ce matériau est projeté thermiquement sur les surfaces des échantillons par le pistolet arc électrique, ce qui permet d'avoir une couche de 1 mm. Il est conçu pour avoir une surface très dure qui se caractérise par ces propriétés de résistance à l'usure et au frottement et à la corrosion à haute température.

Type	Application et caractéristiques	Composition	Dureté	Température max d'utilisation
Fil molybdène	Rechargement dur, résistant à la corrosion et à l'abrasion. Pièces de frottement. Fourchettes de boîte de vitesses. Segments. Fusées de roues	Mo 99% trace 1%	450 HB	450°C

Tableau II.2 - Compositions et caractéristiques du fil utilisé pour le dépôt donné par le fournisseur [40].

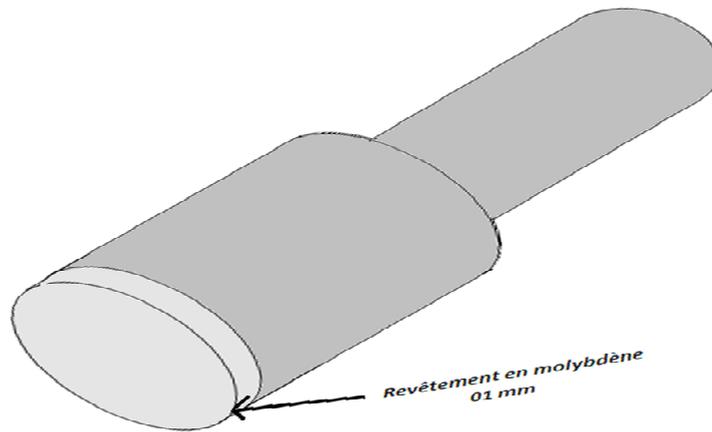


Figure II.2 - Echantillon utilisé pour la projection, revêtu en molybdène de 01 mm.

II-1.4 Paramètres de projection

Dans ce type de projection, nous avons utilisé un pistolet arc électrique entre deux fils qui se compose d'un pistolet qui assure la fusion et la projection du matériau d'apport (molybdène en fil) fondu, et un système d'avancement des fils à l'aide d'un générateur de courant continu.

La projection du molybdène a été effectuée à la température de la flamme de 6000 °C avec une vitesse des particules de 2 m/min. Les paramètres de la projection de l'arc électrique entre deux fils des éprouvettes d'une épaisseur de 01 mm sur l'acier A60 sont illustrés dans le tableau ci-dessus

Paramètres de la projection Arc entre deux fils		
Métal d'apport (Mo)	(%)	99
Diamètre fil	(mm)	1,6
Distance projection	(mm)	140
Vitesse projection	(m/min)	2
Surface dépôt	(m ² /h)/ m	8m ² /h /0,1m
taux de Dépôt	(%)	60
Intensité	(A)	100
Voltage	(V)	35
Pression de l'air	(bar)	4,5

Tableau II.3 - Paramètres de la projection Arc électrique entre deux fils de l'entreprise privé «Algérie métallisation»

Ces paramètres ont été optimisés industriellement pour donner une bonne adhérence du revêtement sur l'acier. Le choix des conditions de projection pour réaliser ce dépôt a résulté de l'expérience acquise par l'entreprise privée «Algérie métallisation» située à Rouïba dans le domaine de projection arc fil.



Figure II.3 : Pistolet arc électrique entre deux fils.

II-2 PROCEDE TRIBOLOGIQUE

La préparation des échantillons, les testes tribologique ont été réalisées au niveau du Hall de technologie de notre Université.

II-2 .1 Préparation des échantillons pour les essais d'usure :

Les échantillons revêtus par le procédé de projection Arc fil ont été d'abord soumis à un polissage mécanique. Cela consiste à rendre les surface uniforme afin d'avoir un maximum de contact entre le pion et le cylindre. Le polissage a été réalisé par une polisseuse, en se servant du papier abrasif en carbure de silicium de grades progressifs (180, 320, 400, 600, 1000, 1200 grains/ cm²) sous lubrification de l'eau.



Figure II.4 - Photos de la polisseuse.

Afin de suivre le comportement d'usure des surfaces des différents échantillons, l'essai est réalisé à l'aide d'un tribomètre pion-cylindre. On a fait subir aux éprouvettes (pions) les essais d'usure par abrasion en fonction du temps ; tel que les échantillons sont soumis à des charges de compression axiale et au mouvement rotatif (frottement) avec un cylindre en graphite, ce qui provoque l'usure des échantillons. Tout cela est accompli en faisant varier ces paramètres : le temps, la vitesse et la charge. Ces essais ont été réalisés sans lubrification et dans les conditions de température ambiante et de pression atmosphérique.

Pour déterminer la perte de masse, on fait appel à la relation:

$$\text{Perte de masse (\%)} = (\text{Perte de masse (g)} / \text{Masse initiale(g)}) \times 100.$$

C'est une méthode d'analyse quantitative qui consiste à faire fonctionner un mécanisme pendant un temps, et de déterminer sa perte de masse.

II-2 .2 Description du matériel d'expérience :

- ✓ Il comporte un dispositif d'usure qui est constituée d'une tige articulée à son extrémité disposant d'un porte-échantillon, dans lequel on fixe l'échantillon qui est sous forme du pion revêtu du molybdène, en contact avec un disque en graphite qui est en mouvement rotatif à une vitesse déterminée (90tr/min ou 180 tr/min), sous l'effet d'une charge variante. Pour une période de temps. Le dispositif au complet est monté sur un tour. Figure II.5

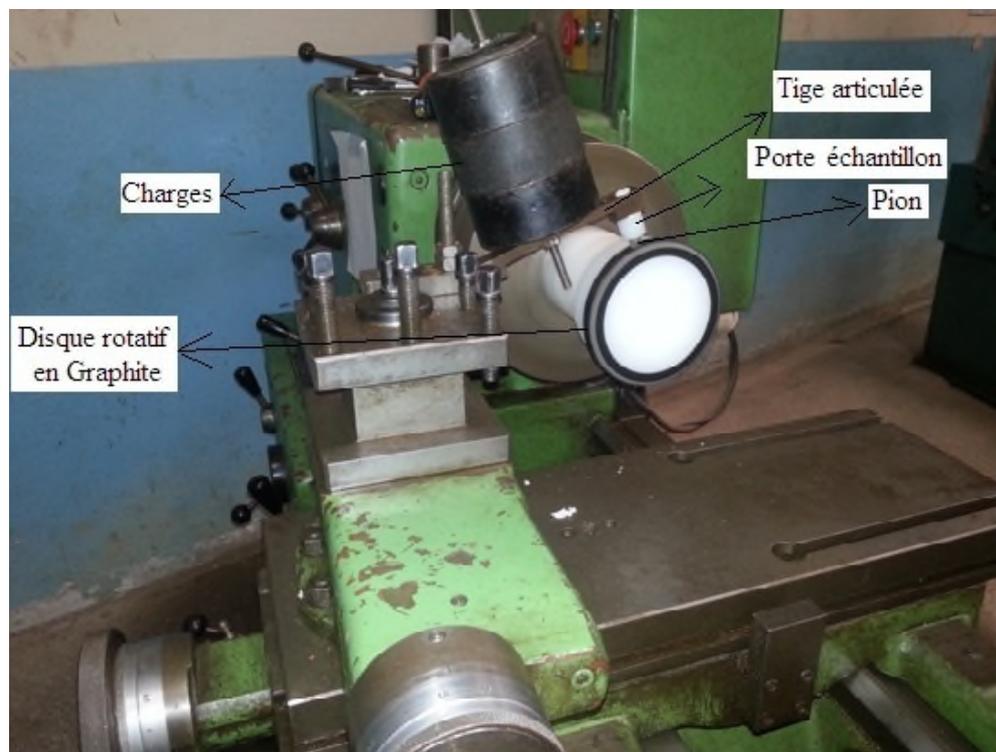


Figure II.5 - Représentation du dispositif d'usure utilisé.

- ✓ Une balance analytique de type OHAUS Pioneer, qui sert à détecter une éventuelle perte de matière de précision mg. Figure II.6



Figure II.6 - Représentation de la balance utilisée.

- ✓ Un microscope optique (Figure II.7), outre sa grande facilité d'utilisation, il permet de collecter des informations globales sur l'aspect de la surface observée. C'est à l'aide de ce microscope qu'on pu observer les effets causés par le test d'usure.

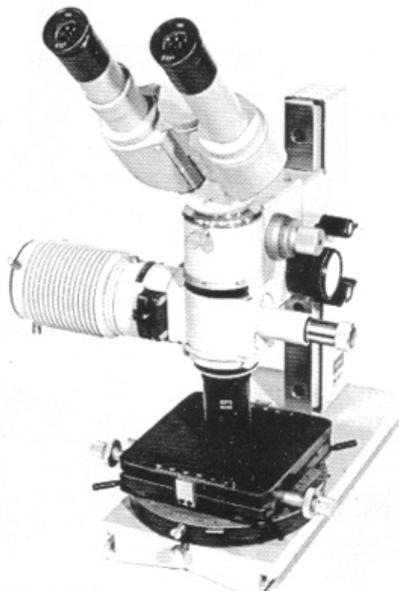


Figure II- 7 : Microscope métallographique.

II-2 .3 Procédure des essais :

- 1- Avant de commencer les essais d'usure, on nettoie la surface des échantillons revêtis en molybdène avec de l'éthanol. Puis, on essuie le cylindre en graphite à chaque fin de manipulation
- 2- A l'aide d'une balance analytique on prend la masse initiale (m_0) de l'échantillon.
- 3- On introduit l'échantillon dans le dispositif, et on actionne le tour.
- 4- On mesure la température de l'échantillon pendant chaque étape.
- 5- Après la fin du temps de chaque essai (manipulation), on prend la nouvelle valeur de sa masse (m_f), tout en nettoyant l'échantillon des additifs.
- 6- On observe les phénomènes d'usure à l'aide d'un microscope optique.

II-2 .3.1 Les paramètres à prendre en compte lors des tests d'usure :

- La première manipulation : on fixe la vitesse à 90 tr/min (0.5 m/s), pour des durées variantes de (1-3-5-10-15-20-30 min) pour des charges différentes (5-30 N) ;
- La deuxième manipulation : on fixe la vitesse à 190 tr/min (01 m/s), pour des durées variantes de (1-3-5-10-15-20-30 min) pour des charges différentes (5-30 N) ;
- La troisième manipulation : on fixe la durée à 30 min pour des charges variantes de (5-10-15-20-40 N), pour des vitesses différentes (90-180 tr/min).

Toutes les manipulations d'usure se sont déroulées dans un régime sec, à l'air ambiant.

II.3. OBSERVATION METALLOGRAPHIQUE

II.3. 1. Le microscope électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage (MEB) constitue un excellent prolongement de la microscopie optique, elle a été utilisée pour des observations fines. Son principe consiste à produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électron-matière. L'interaction entre la seconde électronique fine (fuseaux d'électrons) et l'échantillon génère des électrons secondaires de basse énergie qui sont accélérés vers un détecteur d'électron secondaires qui amplifie le signal. A chaque point d'impact correspond un signal électrique. L'intensité de ce signal électrique dépend à la fois de la nature de l'échantillon au point d'impact qui détermine le rendement en électrons secondaire et de la topographie de l'échantillon au point considéré. Il est ainsi possible en balayant le faisceau sur l'échantillon, d'obtenir une cartographie de la zone balayé.

Le microscope électronique à balayage (MEB) de marque PHILIPS, de type FEI QUNTA 200 est un appareil qui permet de réaliser des observations microscopiques. Les différentes micrographies sont obtenues à l'aide des électrons secondaire (SE) avec une énergie de 10 kV, suffisante pour obtenir des rayonnements caractéristique de tous les éléments présents dans nos échantillons.

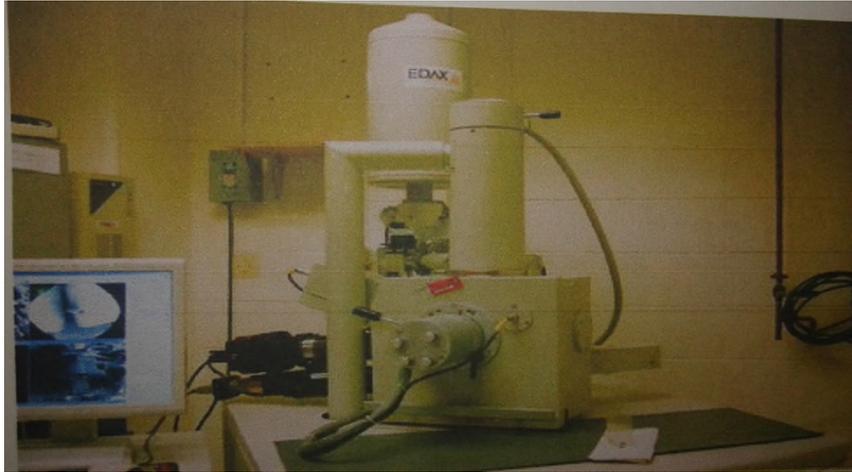


Figure II.8 - Microscope électronique à balayage (Philips type FEI Quanta 200).

II.4. ESSAI DE VICKERS

Le principe de l'essai consiste à appliquer une charge progressive sur la surface polie de l'échantillon, pendant 15s suivie d'une décharge. La réglette et la forme de l'empreinte imprimée dans l'échantillon après essai sont représentées dans la figure II.9.



Figure II.9 Essai de dureté Vickers.

Dans l'essai de Vickers, une pyramide à base carrée en diamant est utilisée comme pénétrateur.

La dureté Vickers HV est définie par :

$$HV = \frac{\text{la charge appliquée}}{\text{la surface de l'empreinte}}$$

Des précautions opératoire nécessaire à l'essai Vickers tel que : Les empreintes étant petites, les irrégularités de la surface prennent une importance plus grande encore que dans les essais précédents, particulièrement pour les fortes duretés et faibles charges aussi parfait.

La distance entre le centre d'une empreinte et le bord de la pièce ou les cotés d'une autre empreinte ne doit pas être inférieure à 2,5 fois la diagonale. L'épaisseur de la pièce doit être supérieure à 1,5 fois la diagonale de l'empreinte. La pièce doit reposer sur le support de façon régulière et uniforme.

Chapitre III

Résultats et Interprétations

III. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présentons, en premier lieu la caractérisation microstructurale du dépôt en molybdène moyennant le microscope électronique à balayage. Ces revêtements déposés sont élaborés par le procédé de projection thermique à arc électrique. En second lieu nous traiterons les résultats de microdureté, en suite nous décrivons les résultats obtenus de l'observation métallographique sur les dépôts, ainsi que ceux que nous avons obtenus lors des tests de perte de masse relative [41].

III.1 Caractérisation microstructurale

A travers la coupe transversale du revêtement de molybdène déposé par le procédé Arc-fil sur l'acier A 60 (E335), et avec le microscope électronique à balayage (MEB) nous avons pu mettre en évidence trois zones distinctes

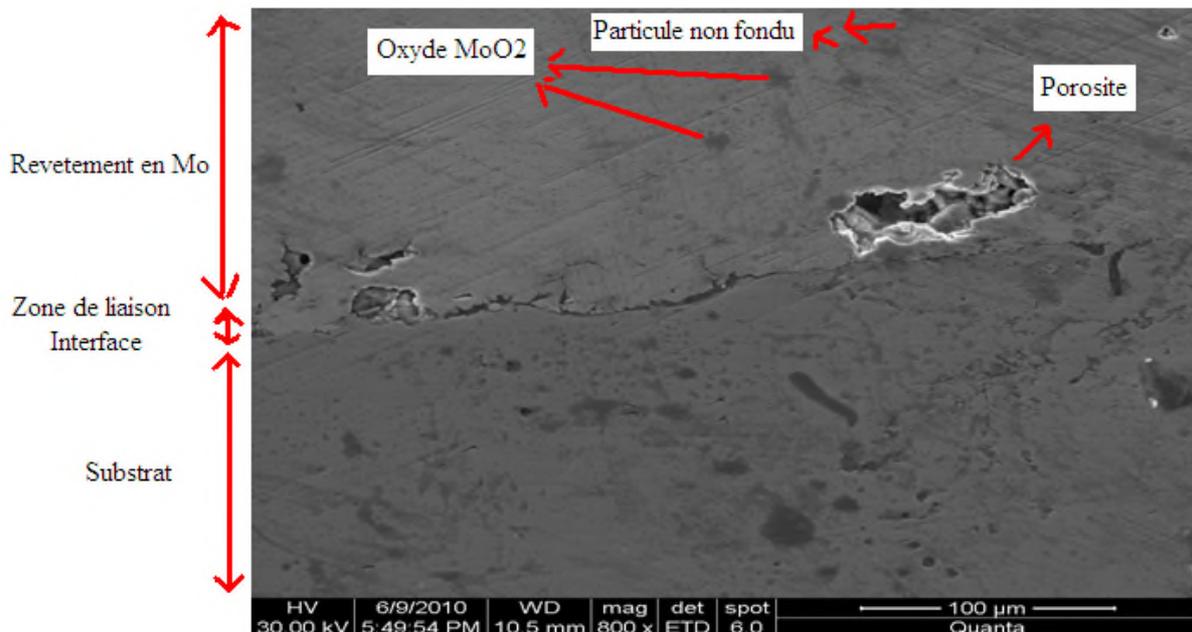


Figure III.1- Microstructures des différentes zones de l'acier revêtu.

- Zone substrat, de type acier A 60 (E335) doux ordinaire hypoeutectoïde qui présente une bonne ductilité ;
- Zone intermédiaire (de liaison) où le dépôt de molybdène semble adhérent au substrat en Acier ;
- la troisième zone est celle de revêtement de molybdène à structure lamellaire, les dépôts formés par des empilements successifs de gouttelettes de matériau fondu. Le revêtement renferme une certaine quantité de porosités ; ces pores sont dus à un manque de propagation. Ainsi qu'à d'autres phases telles que les oxydes provenant de l'oxydation atmosphérique au cours du processus de projection Arc-fil. Après refroidissement, quelques particules de molybdène se trouvent à l'état non fondu

et partiellement fondu. La présence de ces particules est dû au fait qu'elles soient initialement à l'état semi fondu à la sortie de la buse.

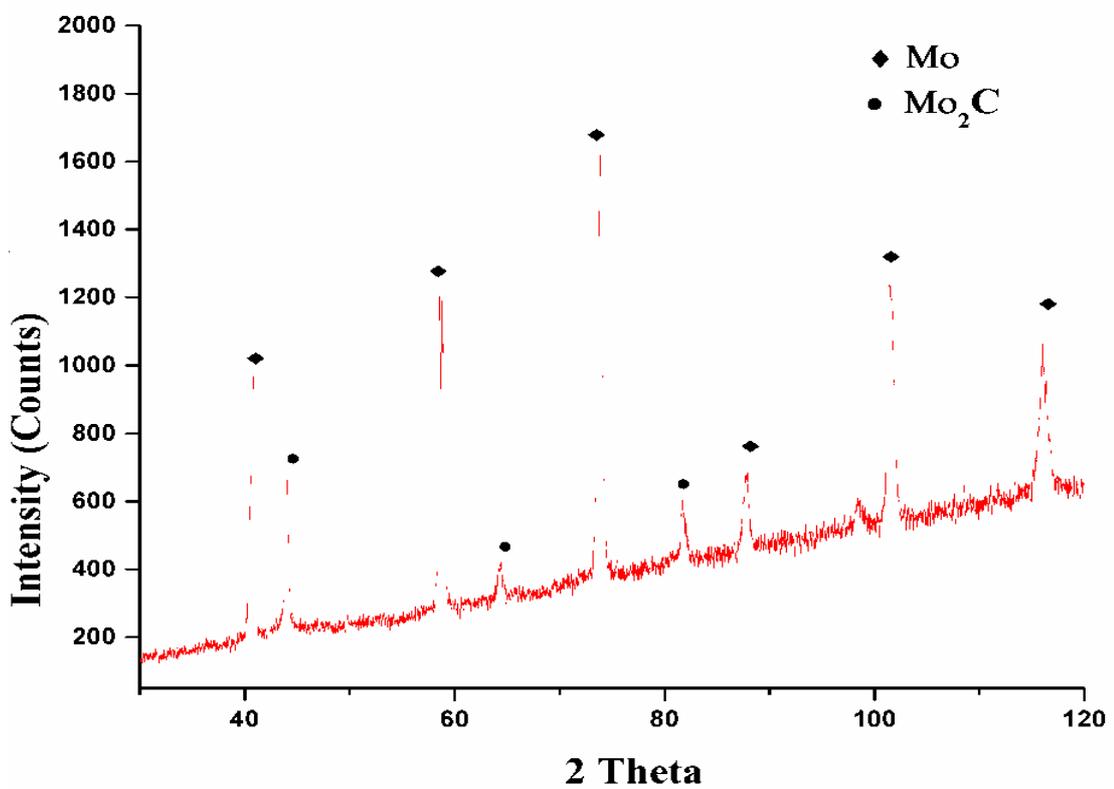


Figure III.2- Spectre des rayons X obtenu après projection thermique.

Comme le montre la figure III.2, les diagrammes DRX des revêtements montrent les pics correspondant à ceux du cristal de molybdène ayant une structure cubique à face centrée. Les pics de diffraction 2θ à 41° , 62° , 78° , 89° , 105° et 117° correspondent aux plans cristallins de (1 1 0), (2 2 0), (2 1 1), (2 2 0) (310) et (2 2 2) respectivement. Cette identification a été possible grâce à la base de données PDF2 de Highscore. Les spectres DRX révèlent que les revêtements de molybdène sont hautement cristallins, ceci est démontré par l'épaisseur des pics apparents. Au cours de la projection, une fraction du matériau d'apport a également été transformée en carbure de molybdène de type Mo₂C en structure hexagonale et nous avons également noté la présence de structure orthorhombique des oxydes.

III.2. DETERMINATION DES PROPRIETES MECANIQUE

III.2.1. Microdurete Vickers

D'après les travaux de C.S. Ramachandran [32] et F.H. Yuan et al [33], il a été confirmé que la microdureté est une caractéristique fondamentale et un indice de qualité pour connaître la microstructure et les propriétés du revêtement par projection thermique. Ce qui nous a incités à déterminer la microdureté Vickers du dépôt. Nos mesures de microdureté du dépôt de molybdène ont été effectuées sur des surfaces polies à l'aide d'un microduromètre, tel que la charge appliquée est de 250 g (équivalente à 2.49 N). Les valeurs obtenues représentent la moyenne de trois essais sur chaque échantillon et sont illustrées sur la figure (III.3).

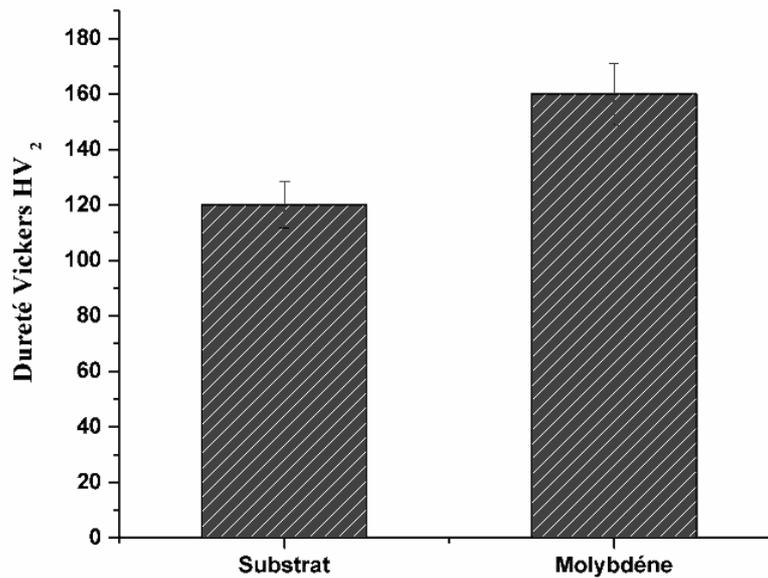


Figure III.3 - Micro-Dureté Vickers des différents échantillons.

A travers les histogrammes de Micro-dureté Vickers, on remarque que les différents échantillons présentent différentes valeurs. Dans le cas du substrat la valeur est : $120\text{Hv} \pm 7$, alors que pour le dépôt en molybdène obtenue grâce à la projection arc fil sa micro dureté sous une charge de 250 g elle est de $175\text{Hv} \pm 12$. On peut expliquer la micro dureté élevée du molybdène grâce à la présence des oxydes, particulièrement « l'oxyde MoO_2 » suite à la combinaison des particules fondues du molybdène avec l'oxygène de l'air avant contact et avec le substrat lors de la projection Arc-fil. [36,37].

Néanmoins, les travaux réalisés par M.F. Morks et I. Ozdemir et Al. [34,35] ont montrés que la présence des porosités ainsi que les particules non fondues (Figure III. 1) contribuent à la diminution de dureté au niveau du revêtement de molybdène.

III.3. DETERMINATION DES PROPRIETES TRIBOLOGIQUE DU COUPLE MOLYBDENE GRAPHITE

III.3.1 Influence du temps sur la perte de masse relative

Dans le but d'évaluer le comportement d'usure abrasive des surfaces revêtues en molybdène, nous avons considéré pendant ces essais, la variation de la perte en masse en fonction du temps.

Ces tests d'usure ont été effectués dans les conditions de température ambiante. A partir des résultats obtenus, nous avons présenté la perte de masse relative sous forme de courbes en fonction du temps sous une vitesse de glissements de 0,5 m/s (90tr/min), et 01 m/s (180tr/min). D'après la figures III – 4 obtenue on remarque que :

La variation de la perte de masse est considérable avec l'augmentation de la charge. On constate que la perte de masse relative est de 0.0003% et 0.0010% à la 5 min et 07 min respectivement pour une vitesse de 0.5 m/s. Et plus de 0.00012% pour une vitesse de glissement égale à 01 m/s. Par conséquent, on remarque une augmentation progressive linéaire considérable de la perte de masse à partir de la 15 min pour les deux vitesses de glissement.

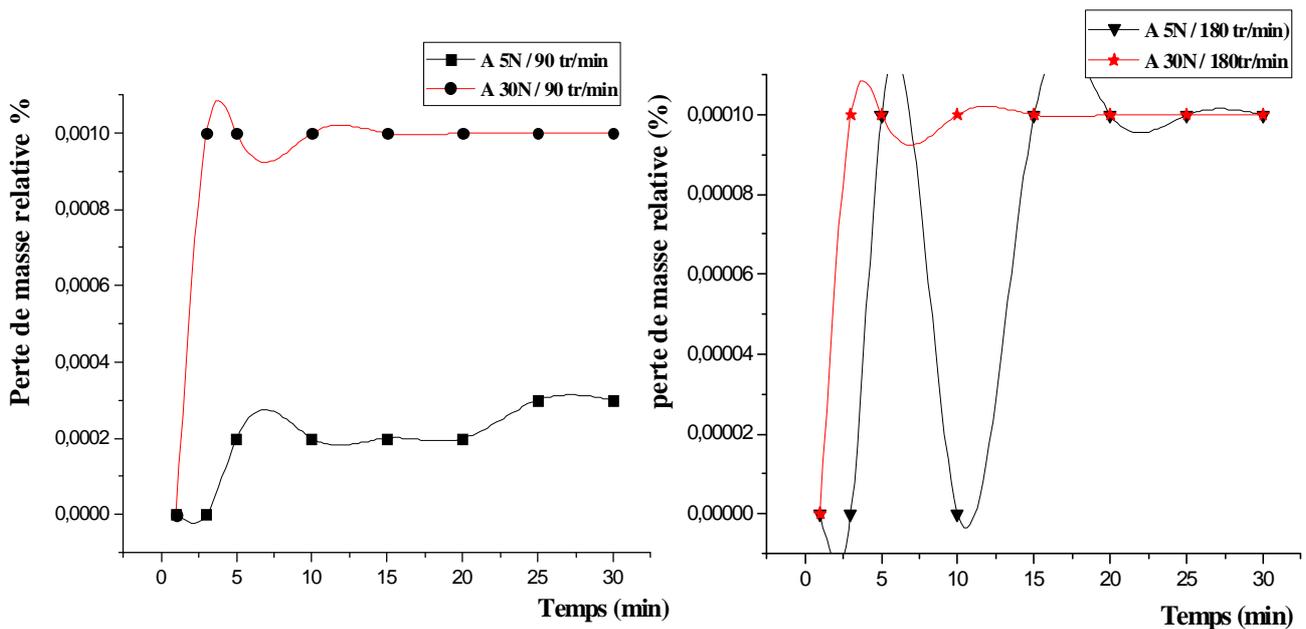


Figure III. 4 - Variation de la perte de masse relative, en fonction du temps sous un couple de 5 et 30N, a) pour 90 tr/min (0.5 m/s), b) pour 180 tr/min (01 m/s).

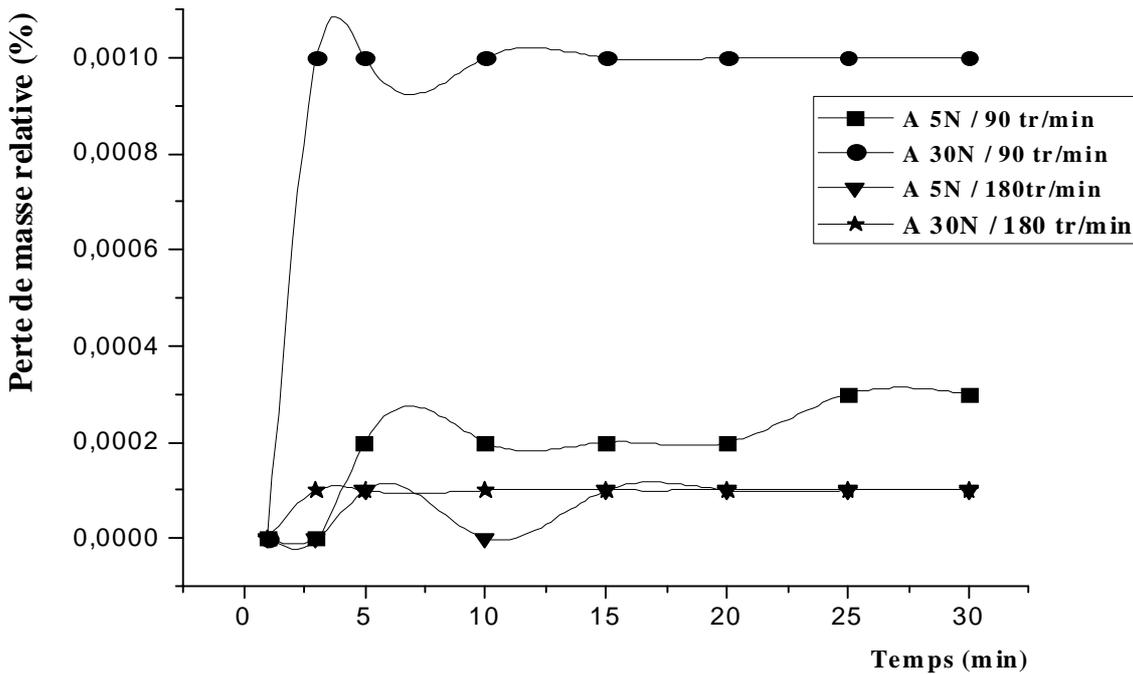


Figure III.5 - Variation de la perte de masse relative en fonction du temps sous un couple de 5 et 30N pour des vitesses de glissement de 90 tr/min (0.5 (m/s), et 180 tr/min (01 (m/s).

La perte de masse relative en fonction du temps dans le régime sec avec une vitesse de glissement de 0.5m/s et 01m/s, nous permet de conclure que les facteurs influençant la perte de masse relative sont la charge appliquée, ainsi que le temps d'écoulement. Pour les échantillons « Mo 30 N/ 90 tr/min, et 180tr/min » (voir figure III-5), on remarque une perte de masse trop importante, ce qui est dû à la charge appliquée qui est de (30N). Cela est relié à sa mauvaise résistance à l'usure.

Par contre, les échantillons « Mo 05 N/ 90 tr/min, et 180tr/min » possèdent une bonne résistance à l'usure, résultat dû à la perte de masse trop faible causé par les petites charges 05 N.

III.3.2. Influence de la charge sur la perte de masse relative

Dans ce qui suit, on présentera la perte de masse relative figure III.6 sous forme de courbes pour les différentes charges suivantes (5,10,15,20,24,30,et 40N) sous deux vitesses de glissement : 0.5 m/s (90 tr/min), et 1 m/s (180tr/min) .

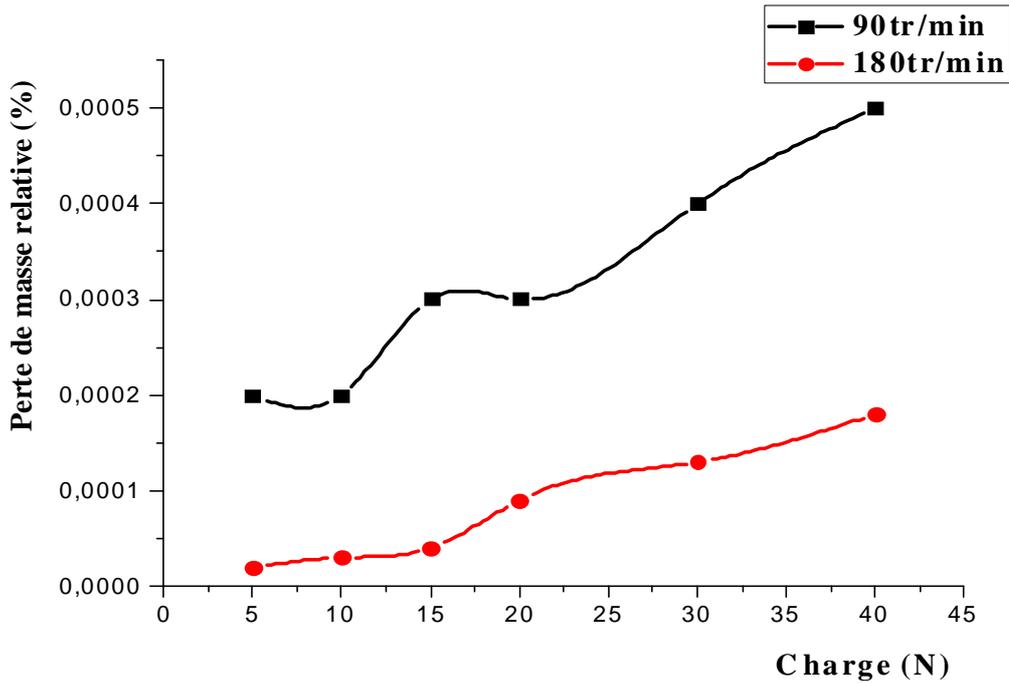


Figure III.6 -Variation de la perte de masse relative en fonction de la charge sous un couple de glissement de 90 tr/min (0.5 (m/s), et de 180 tr/min (01 (m/s).

On remarque le même comportement d’usure abrasive avec les résultats obtenus des essais de la variation de la perte en masse en fonction du temps. On trouve que la perte de masse est de 0.002% (resp. de 0.0002%) à la 5 N pour la vitesse de glissement 0.5m/s (resp. de 01m/s), suivi d’une augmentation considérable progressive à partir 10 N.

De même pour le cas de la perte de masse en fonction de la charge sous un couple de glissement de 90 tr/min (0.5 (m/s), et de 180 tr/min (01 (m/s), le facteur influençant sur cette perte est toujours la charge appliqué.

On remarque que l’échantillon « Mo 90tr/min » possède une mauvaise résistance à l’usure qui est dû à la perte très importante de masse. Pare contre, l’échantillon « Mo 90tr/min » subit une très faible perte de masse relative, ce qui résulte d’une bonne résistance à l’usure.

III.4 DETERMINATION DES TEMPERATURES DE CONTACT DU COUPLE Molybdène/ graphite

III.4.1. Influence de la charge sur la température de contact du couple Mo/ Gr

Dans ce paragraphe, on va illustrer le comportement des surfaces des échantillons revêtus en molybdène en fonction de la charge et du temps pour des vitesses de glissement 1m/s et 0.5 m/s, et du temps par rapport à la charge 5N et 30N.

Ces graphes ont un aspect général similaire, quelque soit la charge appliqué, ou la durée de temps. D'où résulte une variation linéaire.

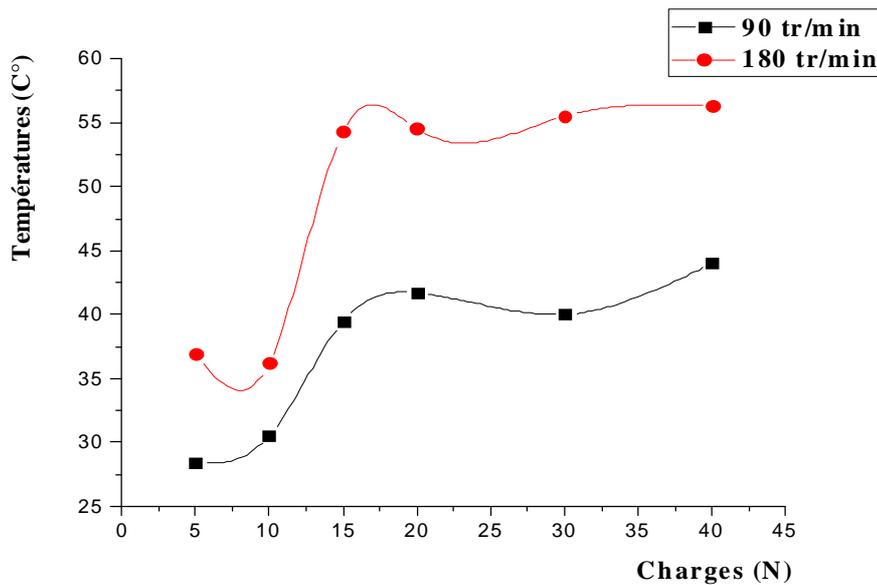


Figure III- 7 : Variation de la température en fonction de la charge sous un couple de glissement de 90 tr/min (0.5 (m/s), et de 180 tr/min (01 (m/s).

D'après les graphes, on constate que la température augmente d'une manière progressive en fonction de la charge appliquées et de la vitesse de glissement. Pour une charge de 05 N la Température est de 25 C° (resp. de 35 C°) pour la vitesses de glissement 0.5m/s (resp. de 01 m/s), suivi d'une augmentation graduelle de la température à partir de 20 N.

La variation de la température en fonction de la charge en régime sec dépend du couple de glissement et de la charge. L'échantillon « Mo 180 tr/min » possède une température plus élevée en fonction de la charge appliquée sous une vitesse de glissement de 180 tr/min, ce qui implique un coefficient de frottement plus élevé. Ceci nous permet de dire que la vitesse de glissement est un des paramètres influençant le comportement thermique et tribologique dans le couple Mo/Gr, qui est un couple de matériaux très utilisé dans les pompes de SONELGAZ. Pare contre L'échantillon « Mo 90 tr/min », il est identifié comme étant un bon revêtement contre l'usure, résultat du faible coefficient de frottement causé par la température qui est petite.

III.4.2. Influence du temps sur la température de contact du couple Mo/ Gr

Dans ce paragraphe, on va présenter le comportement des surfaces des échantillons revêtus en molybdène par rapport au temps en fonction de la température pour des vitesses de glissements de : 05 et 01 m/s.

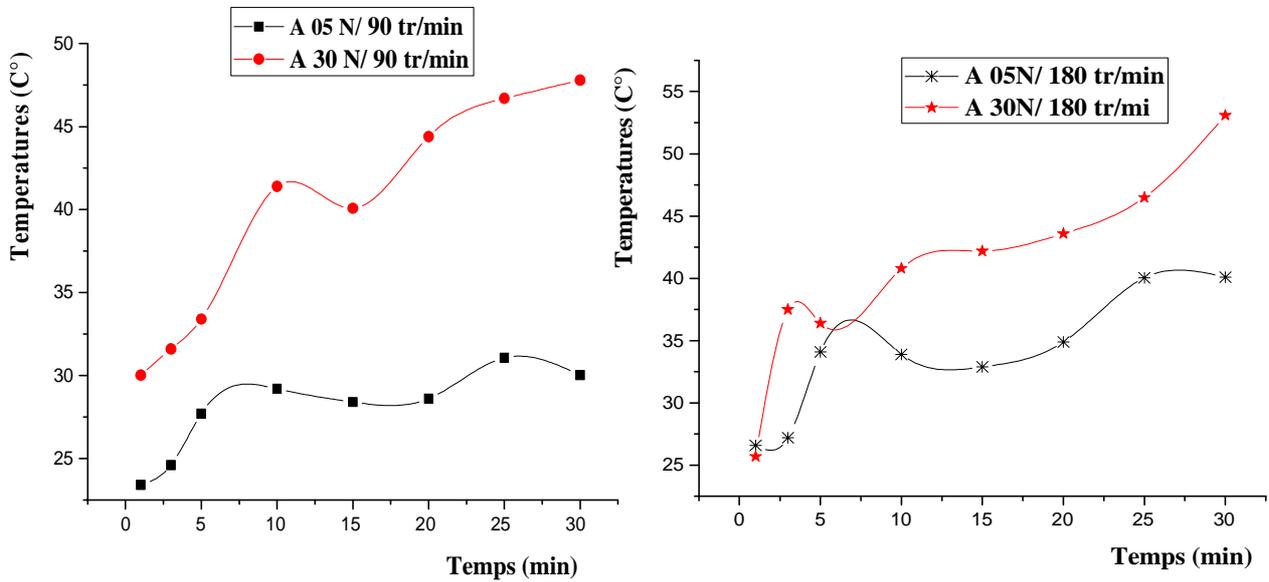


Figure III.8-1- Variation de la température en fonction du temps sous un couple de glissement de 90 et 180 tr/min, pour les charges 5 et 30N.

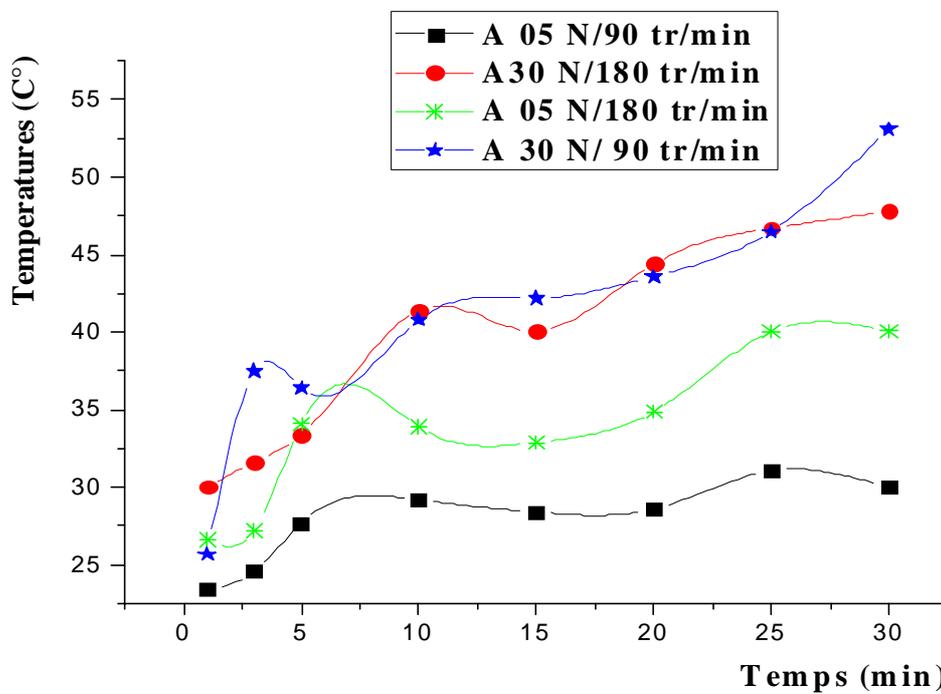


Figure III. 8-2- Variation de la température en fonction du temps sous un couple de glissement de 90 et 180 tr/min, pour les charges 5 et 30N.

Les graphes ont les mêmes allures et on remarque que la température augmente d'une manière progressive en fonction du temps. La température atteint 43 C°, et 28 C° pour des périodes de 15 et 10 min, pour des vitesses de glissement 1m/s et 0.5 m/s. Par contre, à partir de 20 min on observe une augmentation progressive pour les différents graphes.

Dans ce cas, on remarque que la température s'accroît d'une manière linéaire en fonction du temps. On conclut que la variation de la température au régime sec dépend du couple de glissement et du temps d'écoulement.

Les échantillons Mo / 180 tr/min et Mo / 30N possèdent une température plus élevée en fonction temps, ce qui explique qu'ils détiennent un coefficient de frottement plus élevé. Ce qu'on remarque clairement, c'est qu'une évolution de la température en fonction de la charge est la même pour les deux couples, mais la différence est remarquable en terme de valeurs. Celle-ci est plus importante pour Mo / 90 tr/min 30N. Il faut noter aussi que les deux matériaux utilisés sont considérés comme des lubrifiants solides, ce qui implique des températures maximales assez faibles pour les cas extrêmes telles qu'une température de 60°C pour Mo / 180 tr/min.

Par contre, l'échantillon « Mo / 90 tr/min, et Mo / 05N » est identifié comme étant un bon revêtement contre l'usure, chose qui s'explique par le bas de frottement qui résulte de la faible température.

III.5. CARACTERISATION MICROSTRUCTURALE

Les différentes microstructures des échantillons observées ont été observées en utilisant le microscope optique (MO).

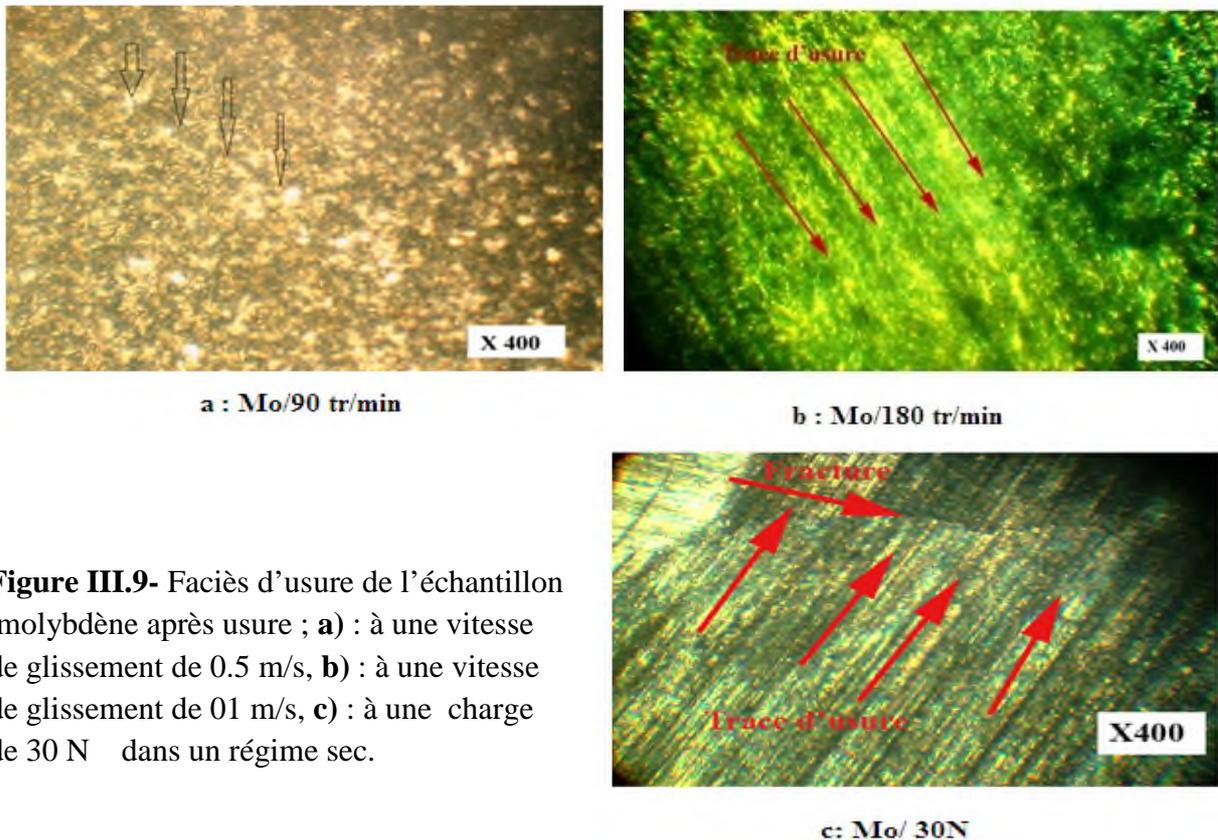


Figure III.9- Faciès d'usure de l'échantillon molybdène après usure ; **a)** : à une vitesse de glissement de 0.5 m/s, **b)** : à une vitesse de glissement de 01 m/s, **c)** : à une charge de 30 N dans un régime sec.

D'après la figure III.9, on remarque :

- (1) Apparition d'usure sous forme de rayure sur toute la surface ;
- (2) Usure propagée sous forme de sillons et stries qui sont dirigés dans le sens de glissement dans une zone large ;
- (3) Formations des stries et propagation des fissures.

La microstructure (MO) de la figure III.9, met clairement en évidence que la présence du taux d'usure est importante dès qu'on augmente la charge et la vitesse de glissement. En général, on peut conclure que l'usure par abrasion, est produite par le frottement et la vibration à sec, ce qui a provoqué les fissurations.

Conclusion

Générale

Conclusion

Parmi les techniques de traitements de surface les plus recommandées aujourd'hui, on trouve les procédés de projection thermique. Deux grands domaines d'application de ces méthodes de projection sont l'étude des frottements et de l'usure. La protection contre l'usure par abrasion est considérée comme l'un des plus importants objectifs.

Notre travail est consacré aux traitements de surface, dans le but de durcir et d'améliorer les propriétés tribologiques des surfaces de contact et leurs propriétés mécaniques. Il est structuré autour de deux phases :

1. La première concerne le processus conduisant à la production d'un revêtement de molybdène par projection à arc électrique. Grâce à leurs différentes propriétés telle que la résistance à l'usure, haute température supportée, résistance à l'érosionetc. Ces revêtements sont souvent utilisés dans de nombreux secteurs industriels à savoir le secteur automobile (têtes de soupape, pistons...) aéronautique (ailettes de turbines fixes, chambre de combustion..).

2. La deuxième section concerne l'étude tribologique du revêtement en molybdène sur un substrat en acier de construction mécanique d'usage général de type E335, qui également très utilisé dans l'industrie mécanique, afin d'évaluer la résistance à l'usure et de déterminer les quantités de pertes de masses. Les différentes observations métallographiques d'usures ont été réalisées par la microscopie optique (M.O) et la microscopie électronique à balayage (MEB). Sans oublier la mesure de la microdureté.

Les résultats microstructural et structural obtenus ont montré que :

Les observations microstructurales ont montré que les dépôts en Molybdène présentent une morphologie lamellaire homogène, dense et compacte avec la présence de quelques porosités. Les diagrammes DRX des revêtements montrent Les spectres DRX révèlent que les revêtements de molybdène sont hautement cristallins, le dépôt présente une matrice forme en Molybdène alors que une fraction du matériau d'apport a également été transformé en carbure de molybdène de type Mo_2C en structure hexagonale.

Les essais tribologiques ont montrés que :

- On remarque également, suite aux essais de microdureté, que ce revêtement a une excellente dureté qui se situe en moyenne aux alentours de $175\text{Hv} \pm 12$.

- Une faible différence entre les résultats des tests de perte de masse en fonction des paramètres des expériences : charge appliquée, durée des tests, la vitesse de rotation et enfin la température prélevée. Ce qui nous permet de conclure que le molybdène a une bonne résistance au frottement à sec.

- La baisse du taux d'usure après les tests d'usure dans le système disque-pion contribue à la formation d'un film sur la surface, qui joue le rôle d'un lubrifiant. Cette propriété procure au molybdène d'être identifié comme un bon revêtement contre l'usure.

- Le frottement des échantillons dans un régime sec à l'air ambiant provoque l'apparition d'usure abrasive. Celle-ci conduit à des pertes de masse sous forme de stries, sillons et détachement de matière. Ces pertes ont été observées par la microscopie (MO). L'usure a une relation linéaire avec les paramètres suivants : la charge et la vitesse de glissement, induite par le frottement et la vibration à sec. En plus on a remarqué avec le MEB, la présence des particules d'oxydes durs, des porosités et des particules non fondues.

On conclut qu'il joue un rôle comme lubrifiant solide et il est utilisé en remplacement ou bien en complément des méthodes de lubrification conventionnelles. Car il offre une meilleure longévité et reste performant dans des conditions/environnements extrêmes.

Références

Bibliographiques

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Technologie de revêtement par projection thermique l'ASM. International Thermal Spray Society www.tss.asminternatioal.org.
- [2] Lamraoui A. ; « traitement de surface par texturation laser : une alternative 'propre' de préparation de surface pour la projection thermique », thèse de Doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2009
- [3] Ouellet T. ; « Etude e l'utilisation de la projection plasma pour une application de résistance à la corrosion dans un milieu industriel », thèse de la maîtrise d'Ingénierie, Université à Trois-Rivières du Québec Canada, 2015
- [4] Dmitry Evgueivith S. ; « Contribution au développement de la projection thermique à très faible pression » : thèse de Doctorat, Université de Belfort – Montbéliard, 2009
- [5] Chouit F. ; « Elaboration et caractérisation des matériaux de revêtements de types (Ni-Al-Zn) par projection thermique (torche) »; thèse Magister, Université Badji Mokhtar ANNABA, 2008
- [6] Zirar A. ; « Etude de la projection thermique par plasma d'arc », Mémoire de fin d'études de Master, Université Abou BakrBelkaid– Tlemcen, 2016
- [7] Alfonso Quintero M. ; « Caractérisation des revêtements par projection thermique à haute vitesse obtenus à partir de différentes poudres de WC-10Co-4Cr pour des applications en aéronautique», Mémoire de la maîtrise en génie mécanique M.Sc.A, Ecole de technologie supérieur Université du Quebec, CANADA, 2016
- [8] Salman N. ; «Contribution a l'étude du procède Arc-fil pour la réalisation de dépôt métalliques durs résistants a l'usure abrasive », thèse de Doctorat, Université LIMOGES, France, 2004
- [9] Tlili- Djaouahdou S. ; « Elaboration et caractérisation des revêtements durs et molybdène et des couches nitrocarbures déposés sur une fonte grise », thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar du Annaba, ALGERIE, 2013
- [10] Tebri F - Amirouche A. ; « Optimisation des températures des post-traitements sur la dureté d'un dépôt en superalliage à base Nickel obtenu par le procédé de projection thermique », thèse Projet de fin d'étude master II, Université Abderrahmane Mira BEJAIA, 2017
- [11] Vincent V, Frédéric D, Fabien J, Jean-Marie F, Gilles F, Sébastien R. ; « Développement de nouveaux fils fourrés pour le soudage à l'arc d'aciers inoxydables ferritiques destinés à la fabrication des parties chaudes de ligne d'échappement automobile », HAL Id: hal-00808058 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00808058>; Submitted on 4 Apr 2013
- [12] Proner A. m 1645- « Revêtements par projection thermique ». Paris, Technique de L'ingénieur, 1999
- [13] Ben Ettouil F. ; « Modélisation rapide du traitement de poudres en projection par plasma d'arc», HAL Id: tel-00345752 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00345752v1>; Submitted on 9 Dec 2008 (v1), last revised 13 Jan 2009 (v2)
- [14] Larabi N, Chalal O. ; « Contribution à l'optimisation des pertes d'énergies d'une pièce tournante à l'aide d'une lubrification optimale combiné d'un dépôt obtenu par projection thermique », thèse Projet de fin d'étude master II, Université Abderrahmane Mira BEJAIA, 2017
- [15] Noël B. ; « Introduction à la TRIBOLOGIE » ; univ-poitiers, France ; 2016
- [16] M. Cartier, P. Kapsa, Usure des contacts mécaniques – Eléments de tribologie, Techniques de l'Ingénieur BM5066, (2001) 1-13.
- [17] Sébastien B. ; « Etude des phénomènes thermiques dans les cavités accélératrices supraconductrices en niobium ngidifiées par projection thermique », thèse de Doctorat, Université Paris XI du France, 2000

- [18] A.A. Opalowski, V.E. Fedorov *Izv. Akad.Nauk.SSSR Neorg.Mater.*, 2–3 (1966), p. 443
- [19] T. Ya. Velikanova, B. V. Khaenko, V. Z. Kublii, and S. I. Makhovitskaya, in: “Transformations in the Carbide W_2C at Low Temperatures,” *Inst. Probl. Materials Sci., National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev* (1991), pp. 127–132.
- [20] T. Ya. Velikanova, V. Z. Kublii, and B. V. Khaenko, “Transformations in the solid state and phase equilibria in the molybdenum — carbon system,” *Poroshk. Metall.*, No. 11, 61–67 (1988)
- [21] Christian.C, *La lubrification, TPM Attitude*, 01 Aout 2011.
- [22] L. Ceschini G. Palombarinia, G. Sambognaa, D. Firraob, G. Scavinob, G. Ubertallib, *Friction behavior of sintered steels submitted to sliding and abrasion tests, Tribology International*. Vol 39 (8) (2007) 748-755.
- [23] Mélissa D. ; « Influence de la microstructure sur le comportement tribologique de dépôts composites projetés plasma », *Mécanique [physics.med-ph]*, École Nationale Supérieure des Mines de Paris Français, 2008, site web : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00266009>
- [24] A. Ruggiero, M. Merola, P. Carlone, V.M. Archodoulaki, *Tribo-mechanical characterization of reinforced epoxy resin under dry and lubricated contact conditions, Composites Part B: Engineering*, Vol 79 (2015) 595-603
- [25] F. P. BOWDEN, D. TABOR, *The Friction and Lubrication of Solids I*, Clarendon Press, Oxford 1950
- [26] Paul.E.V, *Les principaux dispositifs de lubrification à l’huile*, Doc, OBERNAI 067210.
- [27] Said B, et Bouziane M.T. ; « Tribologie_Principes_Et_Matériaux » ; site web https://books.google.com/books/about/Tribologie_Principes_Et_Matériaux.html?id.
- [28] Etcheverry B. ; « Adhérence, mécanique et tribologie des revêtements composites NiP-talc multifonctionnels à empreinte écologique réduite », thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, France, 2006
- [29] Les lubrifiants et leurs applications ; www.vss-lubes.ch.
- [30] Lauric G. ; « Etude du phénomène de lubrification électroactive à l’aide d’actionneurs piézoélectriques. Application à la réduction des forces de frottement sec dans un moteur à combustion interne ». Submitted on 19 Sep 2006. Site web <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00096517>
- [31] H.J. Kim, Y.G. Kweon, 342(1-2), (1999), pp. 201-206.
- [32] C.S. Ramachandran, V. Balasubramanian, P.V. Ananthapadmanabhan, *Journal of Thermal Spray Technology*, (2010).
- [33] F.H. Yuan, Z.X. Chen, Z.W. Huang, Z.G. Wang, and S.J. Zhu, *Corros. Sci.*, (2008), pp. 1608-1617.
- [34] M.F. Morks, Akira Kobayashi., *Materials Science and Engineering*, B 139, (2007), pp. 209–215.
- [35] I.Ozdemir, C.Tekmen, S.C.Okumus, E.Celik, *Thermal behaviour of plasma-sprayed Mo coating on cast-iron substrate, Surface and Coatings Technology* 173–174, (2003), 1064 – 1069.
- [36] Molybdenum 99E coating characteristics, Technical, Bulletin of Metalisation Spray Co, (7/03-96).
- [37] N I. Iordanova, K.S. Forcey, B. Gergov, V. Bojinov, *Characterization of flame-sprayed and plasma-sprayed pure metallic and alloyed coatings, Surf. Coat.Technol.*, (1995), pp. 23-29.
- [38] Site web; DOCPLAYER.fr/20955679-Chapitre-3-etude-du-diagramme-fer-carbone-contenu-transformations-allotropi
- [39] Site web; http://www.ats-ffa.org/fiches/designation_symbolique.htm, Fédération Française de l’Acier ,6 rue André Campra 93212 La Plaine Saint- Denis Cedex

[40] DJEDDI F. ; « Caractérisation des dépôts à base de molybdène sur les substrats en acier inox 316 L et E335», thèse Projet de fin d'étude master II, Université Abderrahmane Mira BEJAIA, 2014

[41] Rassem Y. ; « Etude du comportement mécanique et microstructural des revêtements en céramiques Obtenus par projection thermique », Thèse de doctorat, Université de Bejaia, Algérie 2016.

Annexe

Résultats des tests d'usure

La charge (N)	Masse initiale M_0 (g)	Masse finale M_i (g)	T (c°)	ΔM	$\Delta M/M_0$ (%)	Vitesse de rotation (tr/min)
5	10,1977	10,1955	28,40	0,0022	0,0002	90
10	10,1977	10,1950	30,50	0,0027	0,0002	90
15	10,1977	10,1941	39,50	0,0036	0,0003	90
20	10,1977	10,1937	41,70	0,0040	0,0003	90
30	10,1977	10,1930	40,01	0,0047	0,0004	90
40	10,1977	10,1924	44,01	0,0053	0,0005	90

Variation de la charge en fonction de la vitesse de la vitesse de glissement 90 tr/min

La charge (N)	Masse initiale M_0 (g)	Masse finale M_i (g)	T (c°)	ΔM	$\Delta M/M_0$ (%)	Vitesse de rotation (tr/min)
5	10,1924	10,1922	36,90	0,0002	0,00002	180
10	10,1924	10,1920	36,20	0,0004	0,00003	180
15	10,1924	10,1919	54,30	0,0005	0,00004	180
20	10,1924	10,1914	54,50	0,0010	0,00009	180
30	10,1924	10,1910	55,50	0,0014	0,00013	180
40	10,1924	10,1905	56,30	0,0019	0,00018	180

Variation de la charge en fonction de la vitesse de la vitesse de glissement 180 tr/min

La charge (N)	Masse initiale M_0 (g)	Masse finale M_i (g)	T (c°)	ΔM	$\Delta M/M_0$ (%)	Vitesse de rotation (tr/min)
5						
Temps						
1	10,4901	10,4901	23,40	0,0000	0,0000	90
3	10,4901	10,4897	24,60	0,0004	0,0000	90
5	10,4901	10,4882	27,70	0,0019	0,0002	90
10	10,4901	10,4885	29,20	0,0016	0,0002	90
15	10,4901	10,4883	28,40	0,0018	0,0002	90
20	10,4901	10,4876	28,60	0,0025	0,0002	90
25	10,4901	10,4873	31,07	0,0028	0,0003	90
30	10,4901	10,4870	30,02	0,0031	0,0003	90

Variation du temps en fonction de la vitesse 90 tr/min, pour la charge 05 N

La charge (N)	Masse initiale M_0 (g)	Masse finale M_i (g)	T (c°)	ΔM	$\Delta M/M_0$ (%)	Vitesse de rotation (tr/min)
30						
Temps						
1	10,4972	10,4972	30,02	0,0000	0,0000	90
3	10,4972	10,4871	31,60	0,0101	0,0010	90
5	10,4972	10,4870	33,40	0,0102	0,0010	90
10	10,4972	10,4866	41,40	0,0106	0,0010	90
15	10,4972	10,4865	40,08	0,0107	0,0010	90
20	10,4972	10,4864	44,40	0,0108	0,0010	90
25	10,4972	10,4863	46,70	0,0109	0,0010	90
30	10,4972	10,4862	47,80	0,0110	0,0010	90

Variation du temps en fonction de la vitesse 90 tr/min, pour la charge 30 N

La charge (N)	Masse initiale M0 (g)	Masse finale Mi (g)	T (c°)	ΔM	$\Delta M/M0$ (%)	Vitesse de rotation (tr/min)	
5 Temps							
	1	10,0741	10,0743	26,60	0,0002	0,0000	180
	3	10,0741	10,0745	27,20	0,0004	0,0000	180
	5	10,0741	10,0734	34,10	0,0007	0,0001	180
	10	10,0741	10,0740	33,90	0,0001	0,0000	180
	15	10,0741	10,0735	32,90	0,0006	0,0001	180
	20	10,0741	10,0733	34,90	0,0008	0,0001	180
	25	10,0741	10,0735	40,05	0,0006	0,0001	180
	30	10,0741	10,0735	40,09	0,0006	0,0001	180

Variation du temps en fonction de la vitesse 180 tr/min pour la charge 05 N

La charge (N)	Masse initiale M0 (g)	Masse finale Mi (g)	T (c°)	ΔM	$\Delta M/M0$ (%)	Vitesse de rotation (tr/min)	
30 Temps							
	1	10,0735	10,0735	25,70	0,0000	0,0000	180
	3	10,0735	10,0729	37,50	0,0006	0,0001	180
	5	10,0735	10,0728	36,40	0,0007	0,0001	180
	10	10,0735	10,0727	40,80	0,0008	0,0001	180
	15	10,0735	10,0724	42,20	0,0011	0,0001	180
	20	10,0735	10,0724	43,60	0,0011	0,0001	180
	25	10,0735	10,0724	46,50	0,0011	0,0001	180
	30	10,0735	10,0723	53,10	0,0012	0,0001	180

Variation du temps en fonction de la vitesse 180 tr/min pour la charge 30 N

Résumé

L'objectif de l'étude est de réaliser sur un substrat en acier type A60 des dépôts par projection thermique devant conduire à un durcissement superficiel tout en améliorant les propriétés tribologiques et thermique. Dans la présente étude, les dépôts métalliques réalisés sont des dépôts en molybdène lesquelles on était mis en glissement rotatif avec des disques en graphite, ces couples sont très utilisés dans les machine tournante, l'utilisation des matériaux telle que Graphite ont un apport calorifique qui servira de réduire les températures de contacte lors d'utilisation dans des paramètres sévère (haute vitesse de glissement, coefficient de frottement élevé, utilisation sans lubrification ... etc)

Les différentes techniques de caractérisation utilisé dans notre étude est L'analyse microstructurale, morphologique et la caractérisation basée sur les tests tribologique et les tests de micro-duretés. Les tests tribologiques montrent que notre dépôt à base de molybdène présente une excellente dureté qui se situe en moyenne aux alentours de $175Hv \pm 12$, formation d'un film sur la surface, qui joue le rôle d'un lubrifiant. En plus on a remarqué avec le MEB, la présence des particules d'oxydes durs, des porosités et des particules non fondues. On conclut qu'il joue un rôle comme lubrifiant solide.

Mot Clés : *projection thermique, surface, Dépôts, Molybdène, usure, teste tribologique, pion disque.*

Summary

The objective of the study is to make thermal spray deposits on a type A60 steel substrate, leading to a superficial hardening while improving the tribological and thermal properties. In the present study, the metallic deposits made are molybdenum deposits which were rotated with graphite disks, these couples are widely used in the rotating machine, the use of materials such as graphite have a heat input which will serve to reduce contact temperatures when used in severe parameters (high sliding speed, high coefficient of friction, use without lubrication, etc

The different characterization techniques used in our study are microstructural, morphological and characterization based on tribological tests and micro-hardness tests. The tribological tests show that our molybdenum deposit has an excellent hardness which averages around $175Hv \pm 12$, forming a film on the surface, which acts as a lubricant. In addition, the presence of hard oxide particles, porosities and unmelted particles has been noted with MEB. It is concluded that it plays a role as a solid lubricant.

Key words: *thermal projection, surface, deposits, molybdenum, wear, tribological test, disc pawn.*