

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de la recherche scientifique

UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : GÉNIE DES MATÉRIAUX

PAR :

MR. BAZINE SOFIANE

&

MR. IKHLEF IDIR

Thème

**Caractérisation mécanique d'un dépôt en acier inoxydable réalisé
par la technique de projection Thermique**

Soutenu le2020 devant le jury composé de:

Pr. Sadeddine Abdelhamid	Président
Pr. Bradai Mohand Amokrane	Rapporteur
Dr. Younes Rassim	Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2020-2021

Remerciements

Nous remercions dieu le tout puissant de m'avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Nous tenons tout d'abord à exprimer nos remerciements les plus vifs au professeur. BRADAI Mohand Amokrane, notre directeur de mémoire, ce travail ne serait pas achevé sans son aide

Nous le remercions pour la qualité de son encadrement exceptionnel, sa confiance ses conseils prodigués, ses pertinences et sa persévérance dans le suivi.

On exprime nos vifs remerciements au Dr Younes Rassim de nous avoir aidé à bien mener ce travail. On tient à le saluer pour ces conseils, son aide et sa disponibilité

Nous adressons nos plus sincères remerciements à Mr. BOUKELOUCHE Issam et Professeur KHELOUFI Youcef et M^r AMARI Djamel

On tient à remercier particulièrement au professeur A. SA-DEDDINE d'avoir accepté de présider et juger ce travail.

Nous tenons à remercier également tous les enseignants qui ont contribué dans notre cycle de formation et aussi au responsable du Hall de Technologie (Mr Yousfi Rachid) pour sa serviabilité.

Nous ne pouvons pas oublier de présenter notre gratitude à nos parents pour les efforts inlassables qu'ils ne cessent de déployer pour nous

À tous ces intervenants, nous présentons nos remerciements, notre respect et notre gratitude.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :
La mémoire de ma grand-mère et ma tante.*

A mes chers parents

En témoignant de ma grande affection et ma vive reconnaissance, pour tout ce que vous avez fait pour mon Bonheur et ma réussite. Que dieu vous préserve bonne santé et longue vie. Nulle dédicace ne peut exprimer ce que je vous dois pour vos encouragements et vos sacrifices.

A mes frères et sœurs

A mes oncles et mes tantes

A mes neveux et nièces

En témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de Bonheur, santé et de Réussite.

A TOUT MES AMIS

Pour leur soutien moral

Avec tous mes souhaits de Bonheur, réussite et de Santé.

SOFIANE

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A ma chère mère,

A mon cher père,

Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières a mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs,

Qu'Allah vous protège

A mes chères sœurs

(Mina, Lyna, et Houda)

Pour leurs soutiens et leurs conseils précieux tout au long de mes études,

A ma chère Nadjet

Pour son soutien indéfectible et sa patience infinie,

A mes amis,

Pour leurs aides.

IDIR

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Sommaire

Table des Figures

Liste des Tableaux

INTRODUCTION GENERALE.....	13
CHAPITRE I.....	14
I.1. Introduction.....	15
I.2. Invention et évolution de la projection thermique [1].....	15
I.3. Principe général.....	17
I.4. Place de la projection thermique dans les traitements de surface	18
I.5. Les différents procédés de projection thermique	19
I.5.1. Projection à flamme.....	20
I.5.1.2. Projection flamme-poudre.....	20
I.5.1.2.1. Torches à gaz.....	21
I.5.1.2.2. Pistolet à poudre	22
I.5.1.3. Projection flamme-fil.....	23
I.5.1.3.1. Principe	23
I.5.1.3.2. Pistolets flamme-fil.....	23
I.5.1.4. Projection flamme avec refusion	25
I.5.1.5. Projection hypersonique [1]	25
I.5.1.5.1. Projection hypersonique à tir discontinu.....	25
I.5.1.5.2. Projection hypersonique à tir continu	26
I.5. 1.6. Les gaz de projection	27
I.5.2. Projection par arc électrique entre deux fils	28
I.5.2.1. Principe [1].....	28

I.5.3. Projection plasma	29
I.5.4. La projection à froid	30
I.5.5. La projection par le procédé PROTAL.....	31
I.6. Méthodologie de réalisation de revêtement [1, 4, 5].....	31
I.6.1. Choix du matériau de revêtement.....	31
I.6.2. Le choix de la technique de projection	32
I.6.3. Définition de l'épaisseur optimale du revêtement.....	33
I.6.4. La nécessité du masquage	33
I.6.5. Préparation de la surface.....	33
I.6.5.1. Propreté de la surface.....	33
I.6.5.2. Rugosité [9].....	34
I.6.5.3. Le préchauffage	34
I.6.6. Les modes de préparation [10, 11]	34
I.6.6.1. Le dégraissage	34
I.6.6.2. Le décapage.....	35
I.6.6.3. Le sablage	35
I.7. Formation et caractéristiques du dépôt	36
I.7.1. Structure du dépôt	36
I.7.2. L'adhérence.....	37
I.7.3. La dureté	37
I.7.4. La densité.....	37
I.7.5. Les contraintes résiduelles [13, 15].....	38
I.7.6. L'oxydation et la porosité	38
I.7.6.1. Phénomènes d'oxydation	38
I.7.6.2. Oxydation des gouttelettes en vol.....	39
I.7.6.3. Oxydation lors de la formation du dépôt	40
I.8. Paramètres de projection influant sur le dépôt [16, 17, 18].....	42
I.8.1. Débit des gaz.....	42
I.8.2. Distance de tir	42
I.8.3. Angle d'incidence.....	42
I.8.4. Vitesse de distribution des matériaux.....	42
I.9. Amélioration de la qualité du revêtement [18]	42
I.9.1. Le colmatage	43

I.9.2. L'imprégnation.....	43
I.9.3. Le traitement mécanique.....	43
I.9.4. Le traitement thermique.....	43
I.10.1 Inconvénients de la projection thermique	43
CHAPITRE II.....	45
II.1. Introduction	46
II.2. La tribologie [19]	46
II.2.1. Le circuit tribologique	46
II.2.2. Paramètres fonctionnels.....	47
II.2.3. Mode de contact	47
II.2.4. La charge du contact	48
II.2.5. La vitesse du contact	48
II.3. Les surfaces [21]	48
II.4. Mécanismes d'endommagement des surfaces frottantes	49
II.4.1 Environnement.....	49
II.4.2 Matériaux.....	50
II.5. Le frottement [20]	50
II.5.1. Type de frottement	51
A-Frottement sec	51
B-Frottement hydrodynamique	51
C-Frottement onctueux	51
II.6. Le phénomène d'usure	51
II.6.1 Mécanismes d'usure [20]	52
A-L 'usure par transfert ou adhésion.....	53
B- L'usure par abrasion	53
C-L 'usure par fatigue.....	55
D-L 'usure par réactions tribochimique.....	55
II.6.2. Cartes d'usure	56
II.7. Paramètres influençant l'usure abrasive [11]	57
II.7.1. Caractéristiques des particules abrasives.....	57
A-Influence de la vitesse.....	57
B-Influence de la dureté.....	57
C-Influence de la charge [24].....	58

II.8. Règles fondamentales pour atténuer l'usure [25]	58
II.9. Dépôts résistants à l'usure [17, 23].....	59
CHAPITRE III.....	60
III.1. Introduction	61
III.2. Matériaux utilisés.....	61
III.2.1. Le substrat	61
III.2.2. Dépôts réalisés	61
III.3. Présentation des échantillons.....	62
III.3.1. Élaboration des échantillons	62
III.3.2. Préparation des surfaces à revêtir	62
III.3.2.1. Nettoyage de la surface	63
III.3.2.2. Sablage	63
III.3.2.3. Préchauffage du substrat :	63
III.4. Réalisation des dépôts.....	63
III.5. Les différents réglages des paramètres de projection	63
III.5.1. Pistolet utilisé	63
III.5.2. Avantages	65
III.6. Les tests d'usure	65
III.6.1. Principe du test d'usure	66
III.6.2. Procédure des essais.....	66
5. Nettoyer le cylindre monté sur le mandrin.....	67
III.6.3. Les paramètres à prendre en compte lors des tests d'usure	67
CHAPITRE IV.....	68
IV.1. Introduction	69
IV.2. Observation métallographique	69
IV.3. Perte de masse relative des différents échantillons	70
IV.3.1. Perte de masse relative de l'acier avec revêtement et substrat à la vitesse de glissement de 0,5m/s	70
IV.3.2. Perte de masse relative des différents dépôts réalisés à la vitesse de glissement de 1 m/s	73
IV.4. Mesures de la température de contact vitesse de glissement 0.5m/s	75
IV.5. Mesures de la température de contact vitesse de glissement 1 m/s.....	77
IV.6. Métallographie des dépôts après le test d'usure	78
Conclusion générale.....	79

Conclusion générale	80
Résumé	87

LISTE DES FIGURES

FIGURE I. 1 M.U. SCHOOP ET SA PREMIERE INSTALLATION DE PROJECTION THERMIQUE EN 1914	16
FIGURE I. 2: SECTEURS D'APPLICATION.....	17
FIGURE I. 3: PRINCIPE GENERAL DE LA PROJECTION THERMIQUE.....	18
FIGURE I. 4: PLACE DE LA PROJECTION THERMIQUE DANS LES TRAITEMENTS DE SURFACE	19
FIGURE I. 5: FRONTIERES DES PARAMETRES DES DIFFERENTES TECHNIQUES DE PROJECTION [2].....	20
FIGURE I. 6: SCHEMA DE PRINCIPE D'UN PISTOLET FLAMME-POUDRE [31].	21
FIGURE I. 7: TORCHE A GAZ [6]	22
FIGURE I. 8: PISTOLET FLAMME-POUDRE [7].....	22
FIGURE I. 9: SCHEMA DE PRINCIPE DE LA PROJECTION FLAMME-FIL [8]	23
FIGURE I. 10: PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN PISTOLET FLAMME-FIL [1]	24
FIGURE I. 11SCHEMA DE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN CANON A DETONATION.....	26
FIGURE I. 12: PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN PISTOLET HYPERSONIQUE A TIR CONTINU.....	27
FIGURE I. 13: PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN PISTOLET ARC ELECTRIQUE [1].....	28
FIGURE I. 14: PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE TORCHE PLASMA [1]	30
FIGURE I. 15: PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT LA PROJECTION A FROID	30
FIGURE I. 16. SCHEMA DE PRINCIPE DE LA PROJECTION THERMIQUE COMBINEE A UN TRAITEMENT LASER	31
FIGURE I. 17: L'ADHESION MECANIQUE SUR UN SUBSTRAT SABLE.....	35
FIGURE I. 18COUPE VERTICALE D'UN DEPOT REALISE PAR PROJECTION THERMIQUE [13]..	36
FIGURE I. 19: MOUVEMENTS CONVECTIFS AU SEIN D'UNE GOUTTELETTE [26].....	40
FIGURE I. 20: TYPE DE MORPHOLOGIE DE PARTICULES PROJETEES.	41
FIGURE I. 21SCHEMA D'UN DEPOT ELABORE PAR PROJECTION THERMIQUE [7].	44
FIGURE II. 11 : LES ELEMENTS D'UN SYSTEME TRIBOLOGIQUE	46
FIGURE II. 2: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU CIRCUIT TRIBOLOGIQUE DANS LE CAS D'UN CONTACT ENTRE DEUX SOLIDES. [27].....	47
FIGURE II. 3: L'INTERFACE DE CONTACT DE DEUX SURFACES EN MOUVEMENT [16].	50
FIGURE II. 4 PHENOMENES ELEMENTAIRES DE L'USURE ADHESIVE [8].....	53
FIGURE II. 5 PHENOMENES ELEMENTAIRES DE L'USURE ABRASIVE A DEUX ET TROIS CORPS	54
FIGURE II. 6 PHENOMENE DE L'USURE PAR FATIGUE.....	55
FIGURE II. 7 CARTE D'USURE POUR UN CONTACT ACIER-ACIER A SEC POUR UNE CONFIGURATION PIONDISQUE, D'APRES LIM ET ASHY [19].	56
FIGURE III. 1: ECHANTILLON UTILISE POUR LA PROJECTION	62
FIGURE III. 2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN PISTOLET ARC ELECTRIQUE.....	64
FIGURE III. 3DISPOSITIF D'USURE UTILISE	66

FIGURE IV. 1: MORPHOLOGIE DU DEPOT EN ACIER INOXYDABLE AU CR-NI-MN OBSERVEES AU MICROSCOPE REALISE PAR LE PROCEDE ARC-ELECTRIQUE.....	69
FIGURE IV. 2: EVALUATION DE LA PERTE DE MASSE RELATIVE EN FONCTION DE LA CHARGE APPLIQUEE, POUR DES ECHANTILLONS D'ACIER A60 A UNE VITESSE DE GLISSEMENT DE 0,5M/S.....	70
FIGURE IV. 3: EVALUATION DE LA PERTE DE MASSE RELATIVE EN FONCTION DE LA CHARGE APPLIQUEE, POUR DES ECHANTILLONS REVETUS A UNE VITESSE DE GLISSEMENT DE 0,5M/S.....	71
FIGURE IV. 4 ETUDES COMPARATIVES DE PERTE DE MASSE RELATIVE EN FONCTION DE LA CHARGE APPLIQUEE, POUR DES ECHANTILLONS SUBSTRATS ET AUTRES REVETUS A UNE VITESSE DE GLISSEMENT DE 0,5M/S POUR UNE DUREE DE 30MIN	72
FIGURE IV. 5: EVALUATION DE LA PERTE DE MASSE RELATIVE EN FONCTION DE LA CHARGE APPLIQUEE, POUR DES ECHANTILLONS D'ACIER A60 A UNE VITESSE DE GLISSEMENT DE 1 M/S.....	73
FIGURE IV. 6 : EVALUATION DE LA PERTE DE MASSE RELATIVE EN FONCTION DE LA CHARGE APPLIQUEE, POUR DES ECHANTILLONS REVETUS A UNE VITESSE DE GLISSEMENT DE 1 M/S.....	74
FIGURE IV. 7 EVALUATION DE LA PERTE DE MASSE RELATIVE EN FONCTION DE LA CHARGE APPLIQUEE, POUR DES ECHANTILLONS DU REGLAGE 5 (FLAMME REDUCTRICE) A UNE VITESSE DE GLISSEMENT DE 1 M/S	75
FIGURE IV. 8 : EVALUATION COMPARATIVE L'EVOLUTION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE LA CHARGE APPLIQUEE, POUR UNE VITESSE DE GLISSEMENT DE 0,5 M/S POUR DEUX PION UN AVEC REVETEMENT EST UN SANS REVETEMENT	76
FIGURE IV. 9 EVALUATION COMPARATIVE L'EVOLUTION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE LA CHARGE APPLIQUEE, POUR UNE VITESSE DE GLISSEMENT DE 1M/S POUR DEUX PION UN AVEC REVETEMENT EST UN SANS REVETEMENT	77
FIGURE IV. 10 : OBSERVATION DES TRACES D'USURES AU MICROSCOPE OPTIQUE TRAITER AVEC IMAGEJ.ECHANTILLON (A) ACIER AU CR-NI-MN. (B) SANS REVETEMENT.....	78

Liste Des Tableaux

TABLEAU I. 1 EXEMPLES DE MATERIAUX EMPLOYES DANS LA REPARATION [1]	32
TABLEAU II. 1: ORIGINE ET EFFETS OBSERVABLES DE L'USURE [18]	52
TABLEAU III. 1 ANALYSE DU SUBSTRAT PAR LA FLUORESCENCE DES RAYONS X	61
TABLEAU III. 2: COMPOSITION CHIMIQUE DU MATERIAU D'APPORT DONNEE PAR LE FOURNISSEUR	61
TABLEAU III. 3 CARACTERISTIQUES DES PROCEDES DE PROJECTION THERMIQUE ARC ELECTRIQUE.....	65

INTRODUCTION GENERALE

Les revêtements obtenus par projection thermique sont largement utilisés pour modifier les propriétés physiques, chimiques et mécaniques de la surface des pièces industrielles. La contrainte supportée par le revêtement peut être mécanique, thermique, chimique ou une combinaison de celles-ci. Outre ses caractéristiques inhérentes, les caractéristiques d'application des revêtements dépendent également des caractéristiques de leurs substrats, bien entendu, dans l'ensemble de leur cycle de vie, elles dépendent également de leur adhérence au substrat.

Lorsque le niveau d'action mécanique du substrat est faible, l'adhérence n'est pas le facteur le plus important. Mais lorsque l'intensité de l'effort augmente, cela devient essentiel. C'est pourquoi depuis une trentaine d'années, l'adhérence est devenue un enjeu majeur dans le développement des revêtements obtenus par projection thermique. Il y a deux aspects à considérer ici.

D'une part il est nécessaire d'apprécier l'adhérence des revêtements au moyen d'un essai approprié pour contrôler son aptitude au service. D'autre part, il est nécessaire de comprendre les mécanismes responsables de l'adhérence afin de rechercher plus efficacement les améliorations et les modes d'élaboration les plus à même de conférer au couple substrat - revêtement les meilleures propriétés d'usage.

L'objectif de ce travail est d'étudier un dépôt en acier inoxydable obtenu par projection thermique à l'arc sur de l'acier de construction mécanique A60 (E335).

- ✓ Chapitre 1, nous avons introduit : la définition de la projection thermique, les différents types de procédés de projection thermique et la structure des dépôts, les forces et coefficients de frottement, les mécanismes d'usure, les paramètres agissant sur le frottement et l'usure, ainsi que l'inox et l'inox Généralités informations. Leur alliage
- ✓ Chapitre 2 est consacré à présenter l'usure des surfaces, à savoir : (tribologies, l'environnement, Mécanismes d'endommagement des surfaces et frottements)
- ✓ Chapitre 3 nous vous présentons les matériaux et les techniques expérimentaux, (matériaux utilisés, Les différents réglages des paramètres de projection et les tests d'usures)
- ✓ Chapitre 4 nous décrivons les résultats expérimentaux des analyses réalisées, enfin nous présentons une conclusion générale retraçant l'ensemble des résultats importants obtenus.

CHAPITRE I

I.1. Introduction

Les structures en service sont soumises à différents types d'endommagement qui dépendent de leurs conditions de fonctionnement : chargement, environnement, température...etc. Parmi les types d'endommagements qui sont opérants dans les structures industrielles, on peut citer la corrosion, la fatigue, le fluage et l'usure par frottement.

Souvent la conséquence de ces phénomènes est la mise hors service des machines productives, de plus à défaut de disponibilité des pièces de rechanges et le prix prohibitif de certains organes déterminants non habilités à être remplacés périodiquement.

La rénovation des pièces mécaniques usées est maintenant plus que primordiale sur les plans économique et industriel, pour cela, il faut qu'il y ait un compromis entre coûts de rénovation, la technicité (facile à rénover) et la fiabilité de la pièce rénovée (bonne qualité du revêtement).

De ce fait, la technique de la projection thermique est le procédé le plus indiqué qui offre la possibilité de réaliser des dépôts métalliques très variés.

I.2. Invention et évolution de la projection thermique [1]

La première utilisation de la projection thermique remonte au début du 20^{ème} siècle, en suisse.

M.U. Schoop eut l'idée d'utiliser un chalumeau oxyacétylénique pour projeter un métal à bas point de fusion sur un substrat (Figure I.1). Cette technique s'est développée sous le nom de schoopage et était utilisée pour protéger des pièces en acier par des revêtements de zinc et d'aluminium. Depuis, la projection thermique a donné lieu à de très nombreux développements ayant pour objectif d'étendre le champ d'application de la technique à de nouveaux matériaux et d'améliorer certaines propriétés des revêtements 3. Quelques dates ont particulièrement marqué la projection thermique :

- 1911 : Utilisation de la projection à l'arc électrique par M.U. Schoop
- 1951 : Invention de la projection plasma
- 1955 : Naissance du canon à détonation
- 1975 : Création de la projection plasma sous faible pression de gaz inerte
- 1983 : Début de la projection à la flamme rapide (HVOF)
- 1991 : Emergence de la projection plasma sous gaz neutre à pression supérieure à la pression atmosphérique (système CAPS ®)
- 1993 : Prise de brevet du procédé PROTAL ®

- 1995 : Développement de la projection froide ou "cold spray".

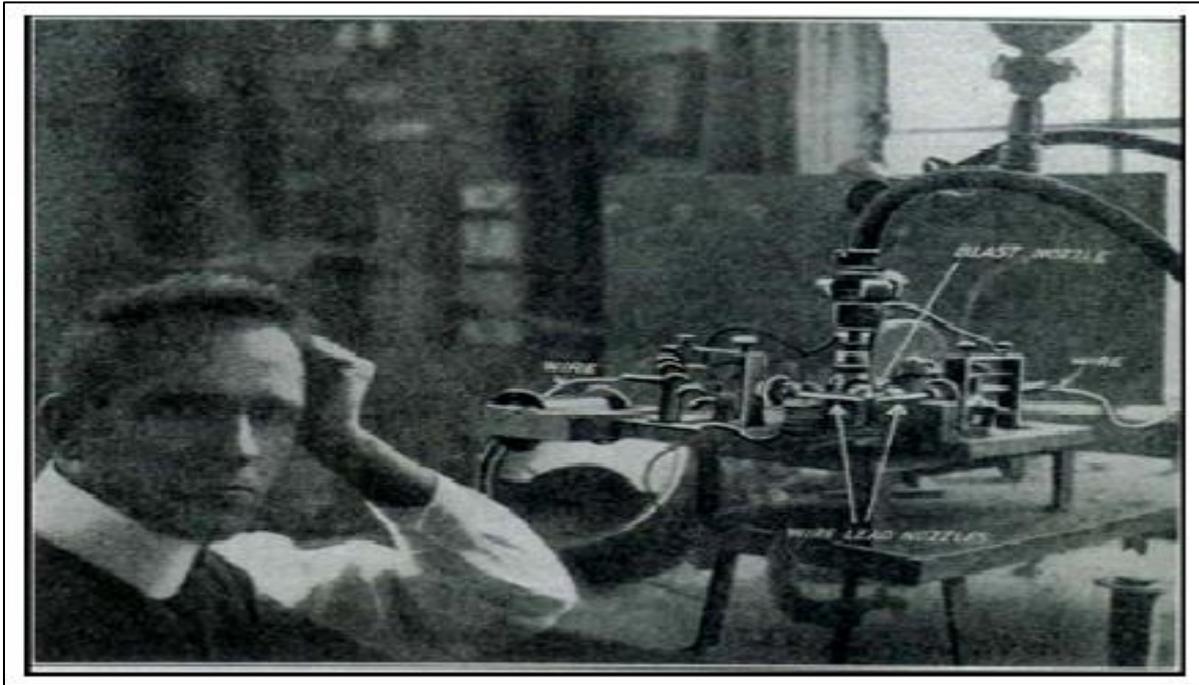


Figure I. 1 M.U. Schoop et sa première installation de projection thermique en 1914

Aujourd'hui les objectifs techniques et économiques des industriels de tous les secteurs vont dans le sens de la réduction des coûts et de l'amélioration des performances. Les pièces constitutives de machines ou équipements, de dimensions de plus en plus réduites, doivent résister à des sollicitations nombreuses :

- sollicitations internes : contraintes mécaniques, fatigue, fluage.
- sollicitations externes : frottement, abrasion, température, érosion, corrosion, usure.
- sollicitations environnementales : corrosion, oxydation, attaque chimique, chaleur.

La projection thermique va permettre de conférer à chaque zone la propriété de surface nécessaire à son fonctionnement, tout en autorisant des choix de matériaux de base compatibles avec les propriétés à cœur recherchées.

Tous les secteurs d'activité sont aujourd'hui concernés par la projection thermique. Si la protection anticorrosion reste le cas d'application le plus fréquent certains secteurs comme l'automobile présentent des applications multiples parmi lesquelles on peut citer à titre

d'exemples : soupapes, segments de piston, anneaux de synchro, disques d'embrayage, sondes lambda, cylindres, pompes, platines d'alternateurs, plaquettes de freins. **La figure. I.2** présente les secteurs d'application de la projection thermique.

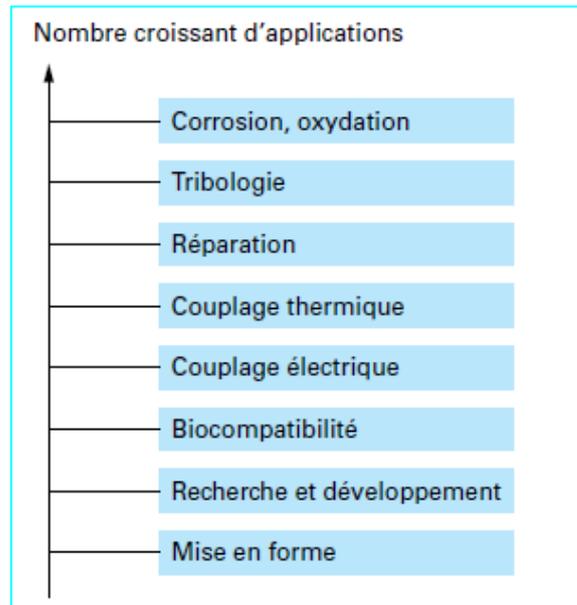


Figure I. 2: Secteurs d'application

I.3. Principe général

Le procédé de projection thermique est un procédé de traitement de surface largement utilisé pour produire divers revêtements métalliques, céramiques ou organiques pour des applications permettant d'améliorer la résistance à l'usure, à la corrosion, à l'érosion ou encore comme protection thermique. Le matériau sous forme de poudre (de taille micrométrique) ou de fil est porté à haute température pour être transformé à l'état fondu ou semi-fondu et projeté alors à grande vitesse sur un substrat solide (Figure I.3). La source de chaleur utilisée principalement est la flamme, l'arc électrique ou le plasma. Un revêtement d'épaisseur variable de quelques dizaines de micromètres à quelques millimètres est ainsi réalisé et caractérisé par une architecture constituée d'un empilement de lamelles écrasées. La projection thermique est une méthode globalement simple de par son principe, à fort rendement qui permet ainsi d'améliorer les propriétés, la qualité et les performances des surfaces.

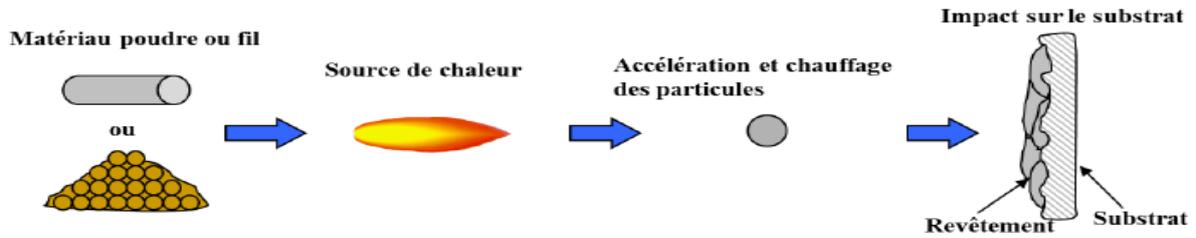


Figure I. 3: Principe général de la projection thermique

I.4. Place de la projection thermique dans les traitements de surface

Les techniques de traitements de surface se répartissent en quatre familles :

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

La **figure. I.4** présente les principales techniques utilisées en traitement de surface.

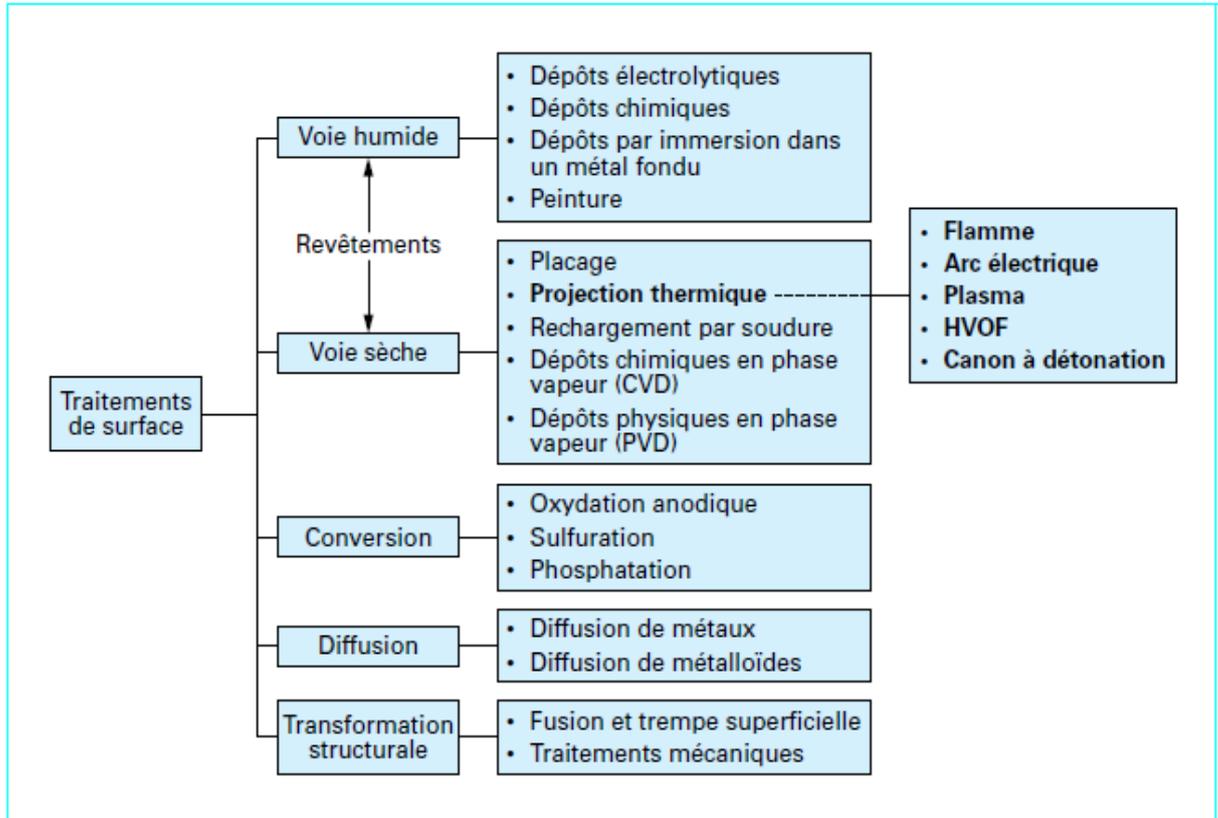


Figure I. 4: Place de la projection thermique dans les traitements de surface

I.5. Les différents procédés de projection thermique

Cette technologie regroupe une large gamme de procédés. Ils peuvent être classés en trois groupes selon le procédé de génération de la source d'énergie. On distingue : la projection par combustion (projection à la flamme, projection à la flamme supersonique et projection par détonation), la projection par arc électrique (projection à l'arc électrique et projection plasma) et la projection à froid.

La figure. I.5 présente la large gamme de température et de vitesse des principaux procédés de projection thermique. Chacun d'entre eux se distingue par des caractéristiques propres de jet énergétique (température ou vitesse) qui conditionne ainsi la nature des matériaux susceptibles d'être mis en forme

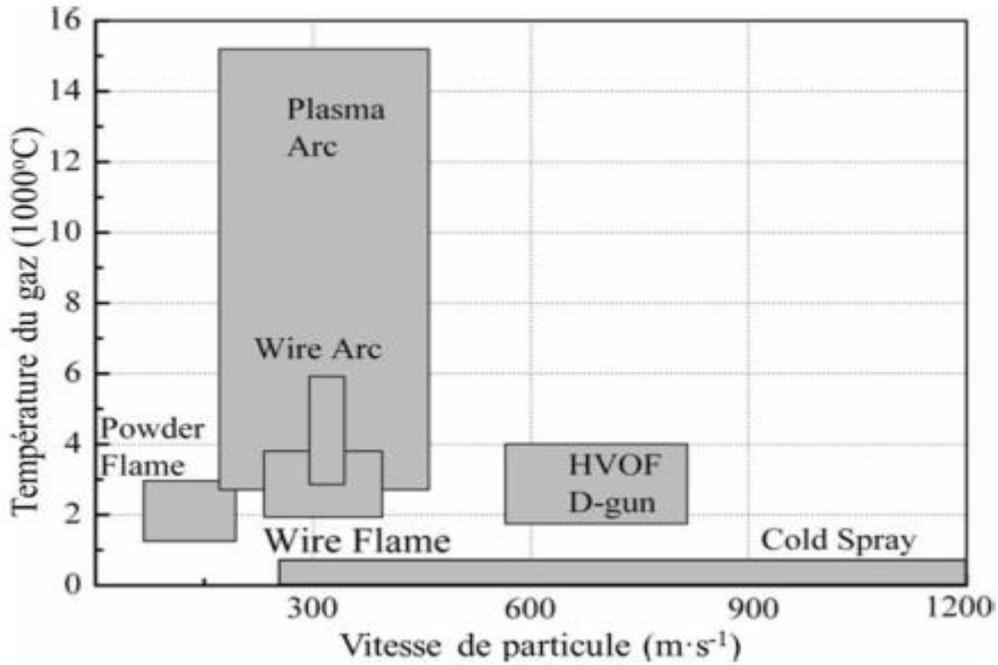


Figure I. 5: Frontières des paramètres des différentes techniques de projection [2]

I.5.1. Projection à flamme

I.5.1.1 Principe

C'est un procédé de projection à chaud dans lequel la chaleur nécessaire à la fusion du métal d'apport est obtenue par la combustion d'un mélange d'oxygène avec le gaz combustible considéré (acétylène ou propane).

La température d'une flamme oxycombustible varie de 2800°C (oxypropane) à 3150°C (oxyacétylène). De ce fait, les matériaux à point de fusion inférieur à 2800°C et non sublimable peuvent être projetés à la flamme.

I.5.1.2. Projection flamme-poudre

On désigne généralement sous le nom de projection flamme-poudre le procédé de projection thermique le plus ancien, consistant à introduire un matériau sous forme de poudre dans une flamme oxycombustible et à le véhiculer grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion (**figure 1.6**).

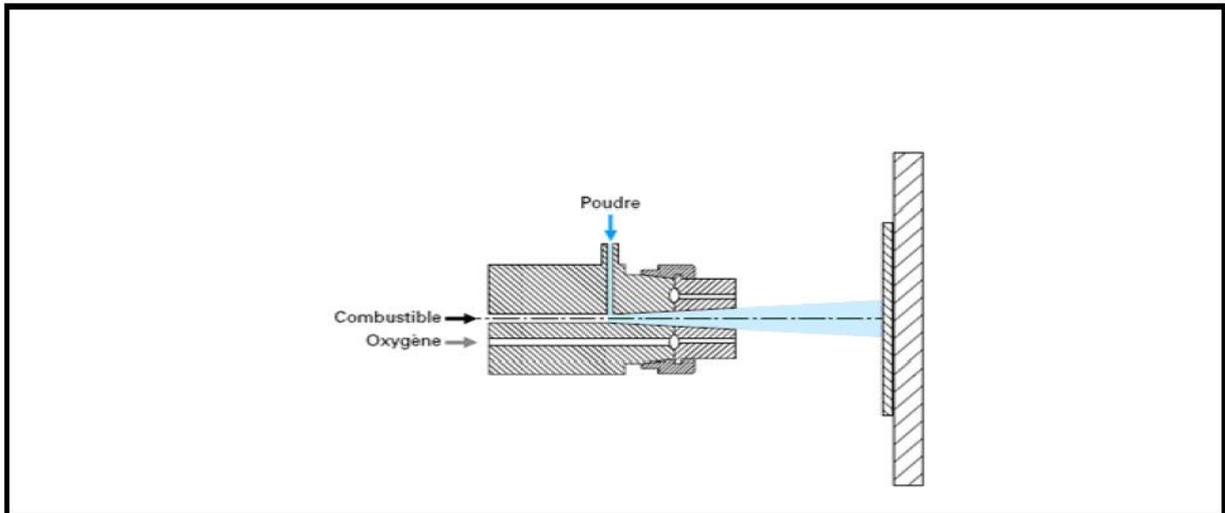


Figure I. 6: schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre [31].

Ce sous procédé utilise un pistolet flamme-poudre à réservoir séparé ou intégré. La poudre constituant le métal d'apport, tombant par gravité, se trouve aspirée par les combustibles et véhiculée par un gaz porteur (air, gaz neutre) vers la flamme ou elle sera fondue et enfin projetée sur le substrat.

Il est nécessaire de rappeler que ce dernier est probablement le plus simple des procédés de projection thermique. Mais cela n'empêche qu'il soit apprécié par les services de maintenance pour sa facilité d'emploi et pour le grand intérêt qu'il représente dans la résolution des problèmes comme le rattrapage des côtes et les problèmes d'abrasion ou de corrosion.

I.5.1.2.1. Torches à gaz

Il s'agit d'un chalumeau oxy-gaz (en général oxyacétylénique équipé d'un petit récipient contenant la poudre. celle-ci « tombe par gravité » (ou est entraînée par dépression dans la canalisation de l'un ou de l'autre des gaz) et est amenée jusque dans la flamme. La poudre traverse la flamme et est projetée à faible vitesse sur le support à recharger (**Fig. I.7**).

Distance de la buse au support est très faible (quelques centimètres maximum) ce qui fait que la chaleur de la flamme assure, d'une part la fusion de la poudre et, d'autre part le chauffage du support, ce qui permet d'assurer la liaison du métal d'apport avec le métal de base sans pour autant ce dernier.

Les alliages utilisés dans ce type de matériel sont dits des alliages «auto fusibles» à base de nickel ou de cobalt additionnés de chrome, tungstène, silicium, bore, etc.

Ce matériel facile d'emploi et peu cher, est très largement appliqué au cas de revêtements de petites et moyennes pièces. C'est un outil très apprécié des ateliers d'entretiens.



Figure I. 7: Torche à gaz [6]

I.5.1.2.2. Pistolet à poudre

Ce matériel, comme le précédent, est généralement alimenté avec des fluides tels que l'oxygène comme comburant et l'acétylène ou le propane comme combustibles. Certains modèles utilisent en plus de l'air comprimé.

La poudre peut être distribuée par gravité comme dans le cas des torches décrites plus haut, ou par un distributeur assez élaboré, désolidarisé du pistolet utilisant de l'air ou un gaz neutre.

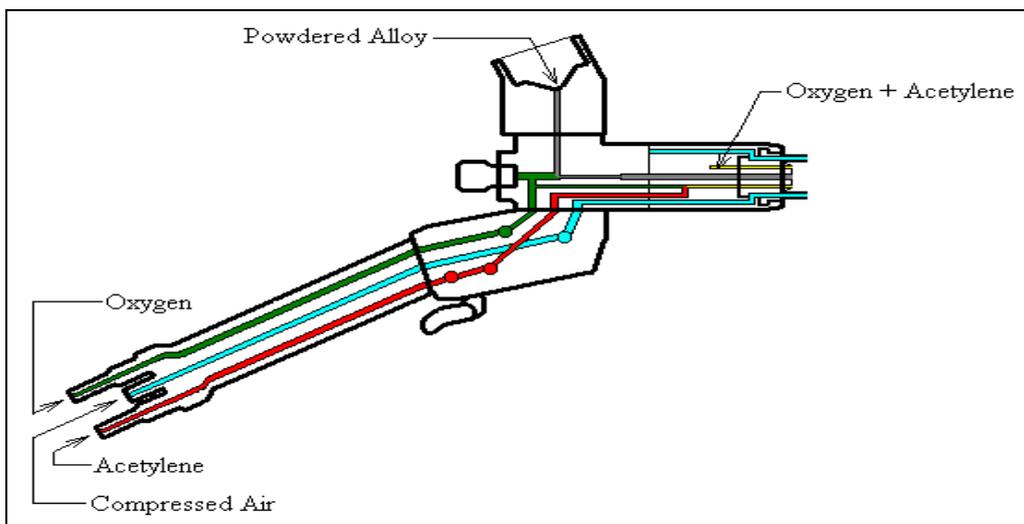


Figure I. 8: Pistolet flamme-poudre [7]

I.5.1.3. Projection flamme-fil

I.5.1.3.1. Principe

Contrairement au procédé flamme-poudre, la flamme ne sert en projection flamme-fil qu'à fondre le métal d'apport, introduit sous forme de fil, de cordon, ou de baguette, en son centre. Une fois fondu, le matériau d'apport est projeté sur le substrat par un courant d'air comprimé. La **figure I. 8** illustre le principe de la projection flamme-fil.

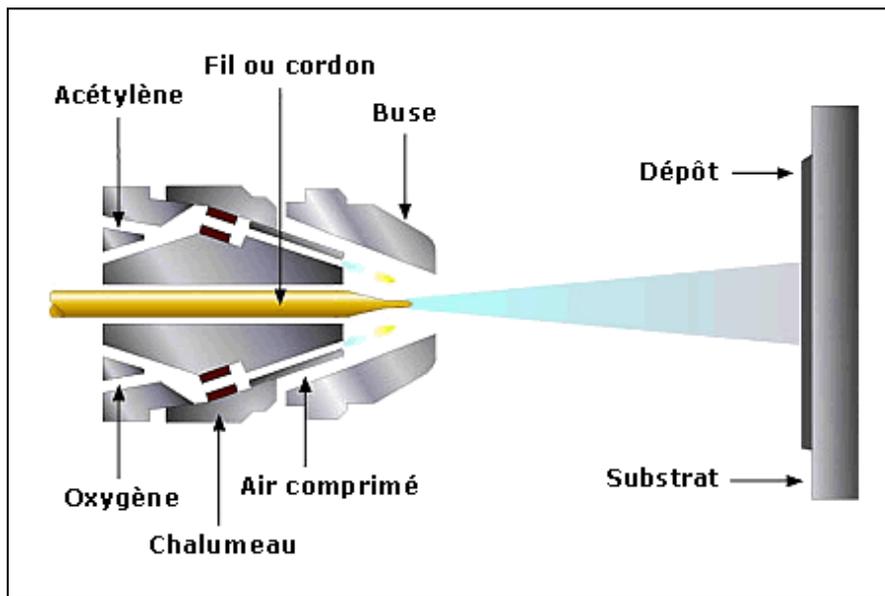


Figure I. 9: Schéma de principe de la projection flamme-fil [8]

I.5.1.3.2. Pistolets flamme-fil

Les pistolets de projection flamme-fil se composent de deux parties :

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

La partie chalumeau comprend un mélangeur de gaz, une buse à gaz, une buse à air. Elle est alimentée par les mêmes gaz que ceux utilisés en projection poudre (oxygène + gaz combustible), auxquels s'ajoute l'air comprimé servant à la pulvérisation du matériau d'apport fondu. Des buses à gaz différentes permettent l'utilisation de gaz tels que acétylène, propane par exemple, alors que différentes buses à air modifient l'aspect et les caractéristiques du dépôt.

De même, des rallonges, à jet droit ou à jet dévié, autorisent les dépôts dans des alésages ou dans des zones difficilement accessibles.

La partie entraînement de fil peut être animée soit par une turbine à air, soit par un moteur électrique. Le système d'entraînement par moteur électrique permet une régularité parfaite de l'avance du fil, en particulier grâce à un couple moteur constant, quelles que soient les variations de traction du fil en amont du pistolet. L'avantage du système d'avance par turbine est le poids et le coût inférieurs de l'appareil.

Suivant les pistolets, la vitesse d'avance du fil sera fixe (cas des pistolets pour anticorrosion seule) ou variable avec commande par sélecteur de vitesse mécanique ou par boîtier électronique, avec contrôle et affichage de la vitesse. Ces appareils sont utilisés manuellement ou sur machines entièrement automatisées. Les installations comprennent :

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

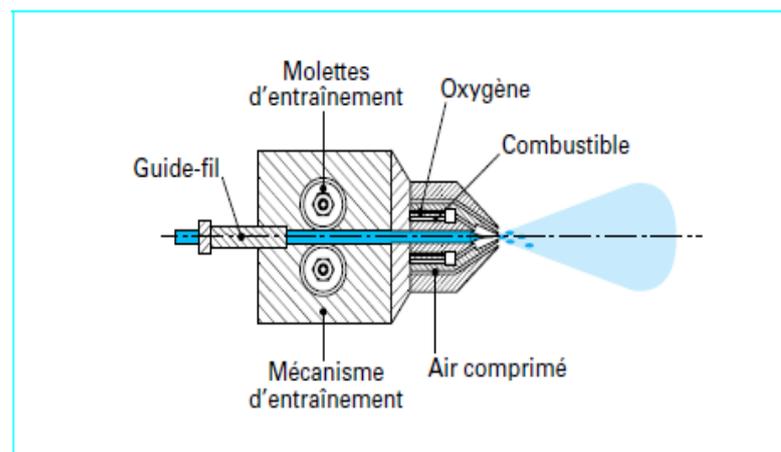


Figure I. 10: Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil [1]

La vitesse des particules est d'environ 150 m/s et la distance entre buse et substrat est comprise entre 100 et 200 mm. Les épaisseurs déposées peuvent aller de quelques dixièmes de millimètre à quelques millimètres, à des taux horaires très variables suivant les matériaux, les diamètres de fil utilisés, et les propriétés de dépôts recherchées : de 1 kg/h, pour certaines céramiques préparées sous forme de cordon souple ou de baguette, à plus de 30 kg/h pour des fils anticorrosion tels que le zinc.

Ces pistolets projettent, pratiquement tous les matériaux tréfilables, métaux alliages ainsi que des matériaux céramiques sous forme de cordons ou de baguettes.

Les matériaux les plus souvent projetés sont des matériaux anticorrosion : zinc, aluminium ou alliage zinc-aluminium [1, 5].

I.5.1.4. Projection flamme avec refusion

Les revêtements réalisés par projection thermique sont poreux et leur liaison avec le substrat est purement mécanique. Pour des problèmes de corrosion et/ou adhérence insuffisante, un traitement de refusion peut compléter la gamme opératoire de manière à densifier le dépôt (la porosité ouverte disparaît) et assure une liaison de type brasage.

Dans ce type de projection un apport d'énergie calorifique adapté remet en solution l'agglomérat de particules et porte le support à une température élevée supérieure à 950°C, ce qui a pour conséquence de lier le dépôt au substrat créant ainsi une liaison de type métallurgique [1, 5].

I.5.1.5. Projection hypersonique [1]

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

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

I.5.1.5.1. Projection hypersonique à tir discontinu

Cette technique de projection consiste à introduire le matériau d'apport (sous forme de poudre) dans un tube appelé canon à détonation, en même temps que le gaz de combustion (oxygène, acétylène). Ce mélange explose grâce à une étincelle, à la fréquence de 8 allumages par seconde. La poudre est ainsi chauffée et éjectée à très grande vitesse (950 m/s) par l'onde de choc créée. Le régime de projection est donc discontinu. Entre chaque tir, un balayage avec un gaz neutre est pratiqué (**Fig. I.11**).

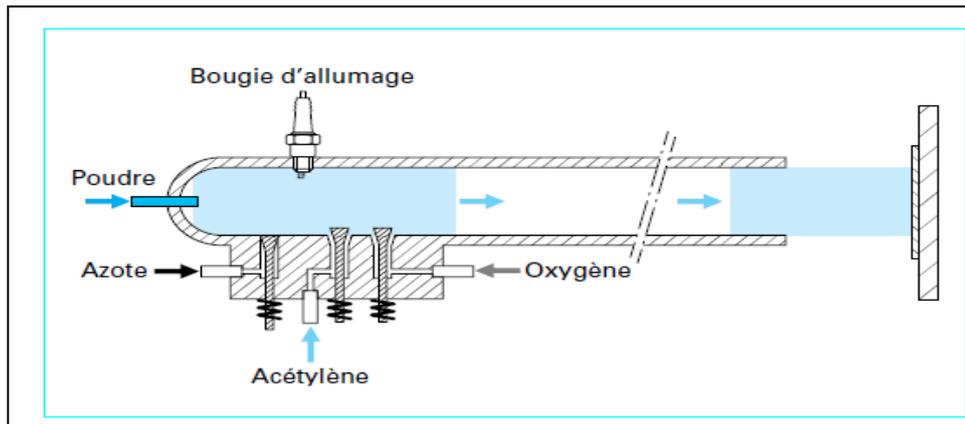


Figure I. 11 Schéma de principe de fonctionnement d'un canon à détonation

Ce type d'installation permet d'obtenir des dépôts de caractéristiques remarquables du point de vue de la compacité, de l'adhérence (souvent supérieur à 80 MPa) et de la rugosité ($R_a = \pm 3 \mu\text{m}$), à des taux horaires de dépôts compris entre 3 et 5 kg/h. Les épaisseurs de dépôts sont en général limitées à 0.2 mm.

Les matériaux les plus fréquemment utilisés sont les carbures de Cr ou de W avec liant métallique Ni ou Co, l'alumine, l'oxyde de chrome.

I.5.1.5.2. Projection hypersonique à tir continu

Cette variante des procédés flamme classiques réside dans la vitesse très élevée acquise par les particules projetées grâce aux importantes pressions régnant dans la chambre de combustion.

Deux procédés sont développés, leur différence tenant essentiellement à des critères d'ordre économique :

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

L'HVOF utilise la combustion de deux gaz : d'une part O_2 et, d'autre part, propane, propylène, t'étrène ou hydrogène. L'HVAF utilise quant à lui un mélange kérosène - air comprimé pour la combustion.

Les gaz de combustion pénètrent dans la chambre de combustion puis sont éjectés du pistolet sous l'effet de la pression élevée (5 à 7 bar). La poudre est injectée à l'aide d'un gaz neutre dans la flamme où elle est fondue et accélérée dans la tuyère à une vitesse proche de la vitesse hypersonique (**Figure. I.12**).

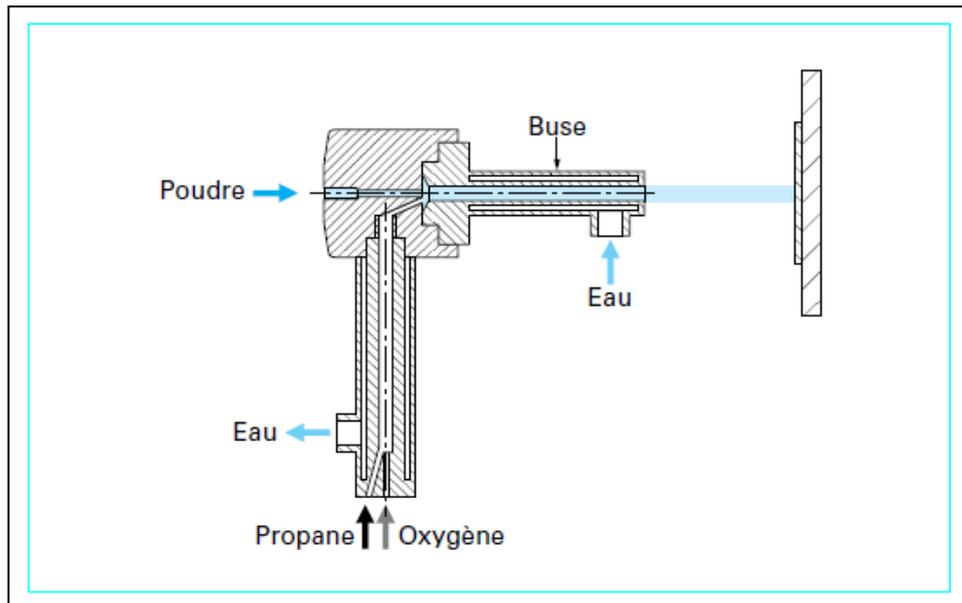


Figure I. 12: Principe de fonctionnement d'un pistolet hypersonique à tir continu

I.5. 1.6. Les gaz de projection

Tous les procédés présentés précédemment utilisent une flamme oxy-combustible comme source de chaleur. Si l'oxygène est généralement utilisé comme comburant de préférence à l'air pour l'obtention de performances thermiques élevées, le choix des combustibles sera dicté par des critères de paramètre de procédé (température de flamme, pression de travail), de coût, de stockage ou de sécurité.

Les principaux gaz combustibles sont l'acétylène, le propylène, des mélanges acétylène éthylène propylène. Des mélanges méthyle-acétylène propadiène hydrocarbures ou encore des hydrocarbures tels que le propane. L'ensemble des propriétés des différentes flammes est lié à la structure moléculaire des combustibles utilisés.

L'acétylène possède des performances thermiques exceptionnelles qui en font le gaz le plus employé en projection flamme-fil. En revanche, son instabilité sous pression élevée ne permet pas son utilisation en projection hypersonique, ou dans la recherche d'amélioration de performances de pistolets flamme liée à une augmentation des pressions de travail.

Le choix du gaz combustible influencera directement le rendement de projection, le taux de dépôt, la qualité du revêtement (finesse du grain, cohésion...). Cette influence est due, d'une part, aux propriétés thermiques de chaque flamme et, d'autre part, à la matière et au contrôle de la régularité des débits et pressions qui peuvent découler du choix des gaz [1].

I.5.2. Projection par arc électrique entre deux fils

I.5.2.1. Principe [1]

Le principe de la projection par arc électrique consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux fils consommables, un jet d'air comprimé pulvérisant le métal fondu et le projetant sur le substrat.

Les pistolets à arc électrique sont alimentés par des générateurs à courant continu, sous des tensions d'arc comprises entre 25 et 40 V, pour des intensités allant de 100 à 500 A (**Fig. I.12**).

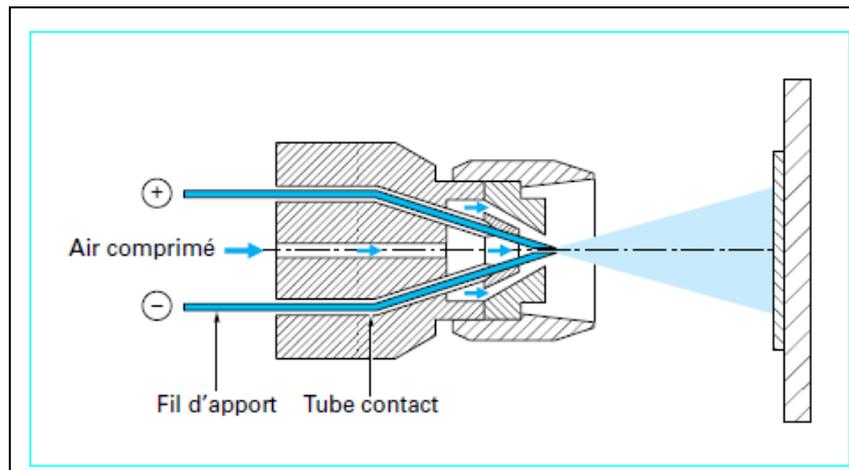


Figure I. 13: Principe de fonctionnement d'un pistolet arc électrique [1]

L'application d'un courant électrique sur les fils génère un arc électrique qui permet de les fondre (température d'environ 6000 °C). Les fils fondus sont alors pulvérisés grâce à un jet d'air comprimé et projetés sur le substrat pour former le dépôt.

La température atteinte et l'énergie cinétique élevée acquises par les particules grâce au jet d'air comprimé permettent des projections avec des caractéristiques de dépôts performantes :

- Porosité de 5 à 10%,
- Epaisseur des dépôts de 0,2 à 3mm,
- Force d'accrochage : 20 à 40 MPa,
- Taux horaire de dépôt de 5 à 30 kg/h.

Les seuls freins à son utilisation résident dans la nature des matériaux à projeter qui doivent être conducteurs, dans la structure grossière obtenue et le taux d'oxydation des dépôts relativement élevé en raison du transport des particules dans l'air comprimé.

Le procédé de projection par arc est un procédé manuel ou automatique, très simple à mettre en œuvre et particulièrement bien adapté aux impératifs de fiabilité et de reproductibilité imposés par la production en moyenne et grande séries.

I.5.3. Projection plasma

Un plasma est un gaz ionisé constitué d'électrons libres, d'ions, d'atomes et de molécules dans des états excités ou non. C'est à cause de ses propriétés uniques qu'on l'a baptisé le 4^{ème} état de la matière. La projection par plasma d'arc soufflé consiste à utiliser une torche à plasma pour fondre et accélérer le matériau afin de former un dépôt, après étalement et refroidissement des particules.

Un arc électrique de forte intensité (plusieurs centaines d'ampères), généré entre les deux électrodes de la torche, permet d'ioniser partiellement un mélange gazeux à base d'argon, d'hydrogène, d'hélium et/ou d'azote Fig. **I.14**. Le milieu ainsi créé est électriquement neutre et se compose d'un mélange d'atomes, d'ions et d'électrons proche de l'équilibre thermodynamique. Parmi toutes les sources de chaleur utilisées dans les divers types de projection thermique, ce plasma, dit "thermique", permet de fondre la plus grande variété de matériaux (polymères, métaux, céramiques).

Les propriétés du plasma thermique sont favorables à des transferts thermiques et cinétiques.

Ils présentent une forte densité d'énergie (avec des flux de l'ordre du MW.m⁻²), une température élevée (environ 15000 °C à cœur), de bonnes conductivités thermique et électrique, une viscosité élevée ainsi qu'une vitesse des gaz élevée (de 200 à 1000 m.s⁻¹)

La projection plasma a l'avantage d'être un procédé versatile capable de fondre des matériaux à haut point de fusion comme des matériaux réfractaires tel le tungstène ou des céramiques telle la zircone. Un désavantage du procédé est qu'il est coûteux [**1,4**].

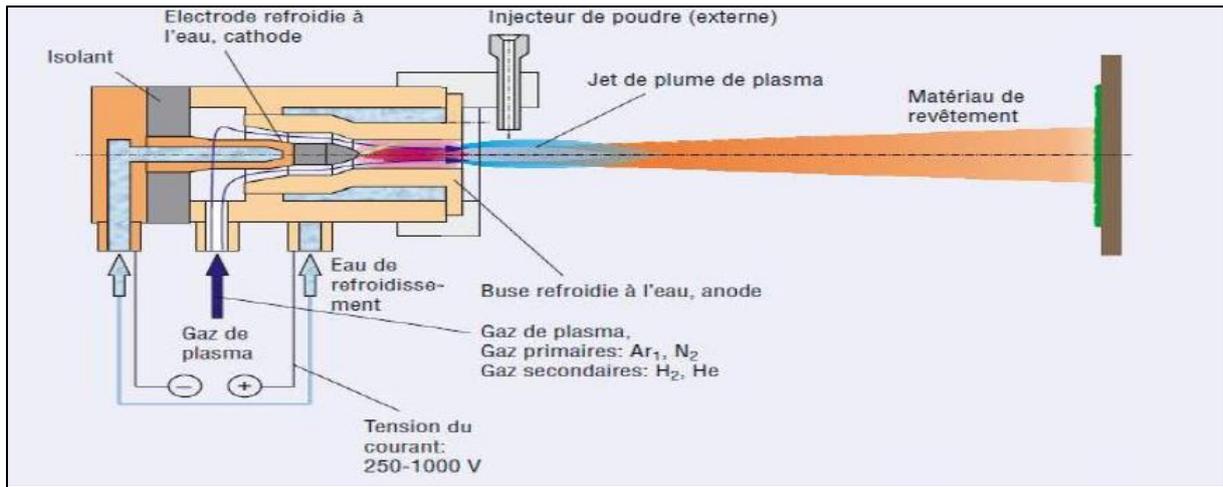


Figure I. 14: Principe de fonctionnement d'une torche plasma [1]

I.5.4. La projection à froid

La projection à froid est un procédé d'élaboration de revêtements par la projection à haute vitesse (200-1200m/s) [15-19] d'un matériau métallique ou non-métallique sur un substrat. Ce jet de petites particules (1-100 μm) est accéléré par un jet supersonique de gaz comprimé. Ce procédé est fondé sur le choix de la combinaison de la température, de la vitesse et de la taille des particules qui permet une projection à une température la plus basse possible. Dans ce procédé de projection, les particules de poudre sont accélérées à une température toujours inférieure au point de fusion du matériau. Le revêtement se forme donc à partir de particules à l'état solide. En conséquence, les effets délétères de la haute température, des gaz, et des autres problèmes traditionnels de la projection thermique sont éliminés ou réduits au minimum. L'élimination des effets détériorant de la haute température sur le revêtement et sur les substrats offre des avantages significatifs. Ces avantages font de la projection à froid un procédé prometteur pour de nombreuses applications industrielles.

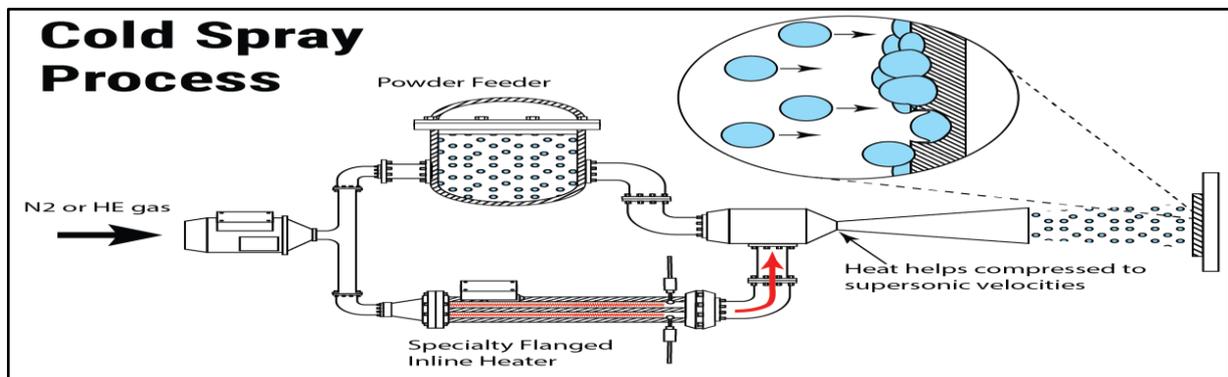


Figure I. 15: Principe de fonctionnement La projection à froid

I.5.5. La projection par le procédé PROTAL

C'est la projection qui peut modifier la surface du substrat juste avant l'étalement des particules, la projection PROTAL (Projection Thermique Assistée par Laser) consiste à coupler un dispositif de projection thermique à un laser, elle utilise le procédé de projection thermique par plasma sous air (APS). Ce n'est que très récemment, grâce à une augmentation de la surface irradiée par le laser que des projections HVOF ont pu être couplées au traitement laser PROTAL [12]. L'intérêt attendu de ce procédé est de pouvoir réaliser la projection sans préparation préalable du substrat. Le sablage et le dégraissage ne sont alors plus nécessaires à la bonne adhérence des dépôts. [13-14]

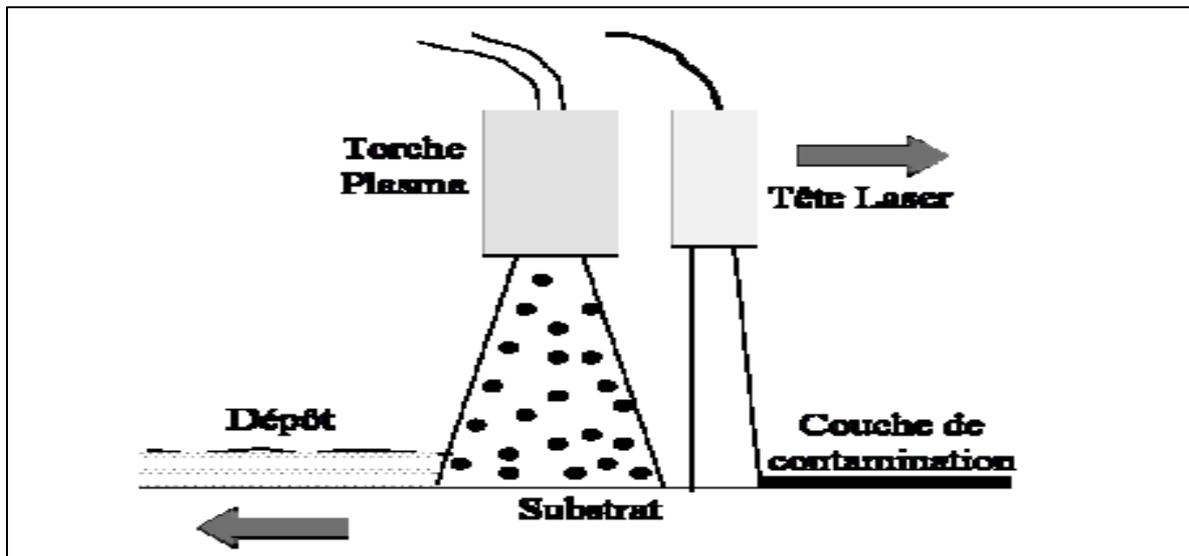


Figure I. 16. Schéma de principe de la projection thermique combinée à un traitement laser

I.6. Méthodologie de réalisation de revêtement [1, 4, 5]

I.6.1. Choix du matériau de revêtement

Le choix des matériaux ne pourra être effectué qu'après étude complète des conditions d'utilisation de la pièce traitée, et notamment :

- De la pièce traitée elle-même (composition chimique, finesse, traitements complémentaire...)
- du milieu environnant (nature, température...)
- de l'antagoniste éventuel (forme, composition chimique...)
- des conditions d'utilisation (vitesse relatives, chocs, pression...)
- du mode de dégradation (dans le cadre de réparation)

Le **tableau I.1** donne quelques exemples de matériaux couramment employés dans le cadre de la réparation.

Type d'utilisation/matériau	FP	FF	FC	AE	P	H	PR	Remarques
Réparation								
Alliages antifriction		X			X			Facilement utilisables en rénovation
Abradables	X				X			Revêtements permettant le contrôle de l'usure de pièces fixes par rapport à une pièce en mouvement
Autoadhérents	X				X			Facilement utilisables en réparation locale (propriétés de sous-couche et propriétés particulières suivant les éléments d'addition)
Aciers		X		X				Revêtements de pièces mécaniques (propriétés différentes suivant les éléments d'addition)

Tableau I. 1 Exemples de matériaux employés dans la réparation [1]

FP : flamme poudre ; **FF** : flamme-fil ; **FC** : flamme-cordon ; **AE** : arc électrique ; **P** : projection plasma ; **H** : projection hypersonique ; **PR** : projection refusion.

- **Abradable** : caractère d'un revêtement dont la coupe par un élément dur (aube, ailette) doit pouvoir se faire sans dommage pour la structure de la couche tout en libérant, avec un minimum d'énergie, des particules qui ne doivent pas provoquer de dégâts mécaniques en aval du compresseur ou de la turbine.

I.6.2. Le choix de la technique de projection

Elle est sélectionnée en fonction du matériau et des caractéristiques du revêtement recherché.

I.6.3. Définition de l'épaisseur optimale du revêtement

Elle est définie par le composant et ses sollicitations de fonctionnement. Dans le cas d'une surface qui subit l'usure l'épaisseur minimale est déterminée, par le maximum d'usure autorisée et une épaisseur minimale de dépôt uniforme, et aussi essentiellement par le coût. Le surplus d'épaisseur nécessaire à l'usinage final ou à la rectification ou rodage doit être correctement estimé ; il est important d'apprécier que si à la suite de l'usinage final la côte n'est plus bonne pour l'utilisation de la pièce traitée toute l'opération de traitement de surface est à refaire, il faut donc prévoir une marge de sécurité. La rugosité du revêtement est alors un paramètre à prendre en compte pour la mesure des épaisseurs déposées. Typiquement des épaisseurs de 150 microns à plus d'un millimètre (voir plusieurs millimètres dans le cas de certains matériaux et certaines techniques de projection).

I.6.4. La nécessité du masquage

Il est nécessaire pour empêcher le métal projeté d'adhérer sur les parties de la pièce qui ne doivent pas être traitées. Il est généralement appliqué après l'opération d'usinage avant le sablage ou la projection de la sous-couche. Il peut être sous forme de rubans adhésifs, de produits appliqués au pinceau ou par spray ou alors particulièrement dans le cas de production sous forme de parties métalliques pouvant être clipsées.

I.6.5. Préparation de la surface

S'il y a une étape que l'on peut qualifier de très importante dans le processus de projection thermique, c'est bien la préparation du substrat. Tout comme tous les autres procédés de déposition ou de revêtements de surface, une préparation non satisfaisante peut être pénalisante pour l'adhésion du revêtement sur son substrat.

La préparation de surface proprement dite a pour but :

- de nettoyer la pièce,
- de créer un relief favorisant l'adhérence mécanique du dépôt.

I.6.5.1. Propreté de la surface

Comme dans tout traitement de surface, le subjectile doit être débarrassé des huiles ou graisses provenant des stockages temporaires ou des procédés d'usinage. Cette propreté au sens large, peut être contrôlée par des méthodes comme le test du film d'eau ou la méthode rubans adhésifs transparents.

I.6.5.2. Rugosité [9]

Pour obtenir une bonne adhérence, la propreté est nécessaire, mais pas suffisante. Il faut créer un accrochage mécanique entre le produit et le support. Celui-ci s'obtient par la réalisation d'une rugosité sur toute la surface.

La rugosité est le résultat de la modification micro géométrique d'une surface, provoqué par le bombardement intensif de projectiles dans le cas du sablage, ou par l'enlèvement organisé de matière créant un relief, dans le cas d'un usinage.

Dans les deux cas, le résultat à pour effet :

- d'augmenter l'aire de contact entre le substrat et le futur revêtement, car l'adhérence est directement liée à l'étendue de la surface.
- de créer un maximum d'aspérités, où le matériau déposé viendra s'ancrer. La rugosité est complémentaire de la propreté.

I.6.5.3. Le préchauffage

Comme nous l'avons vu précédemment, suivant la différence de température entre le métal d'apport et celle du support, on obtiendra un accrochage plus ou moins important. Raison pour laquelle, un léger préchauffage de la pièce à traiter, est toujours conseillé afin d'augmenter le pouvoir d'adhérence.

Il devient indispensable pour les revêtements à partir de poudre et surtout pour les matières plastiques qui ne sont pas conductrices de chaleur. Le préchauffage peut aussi être employé pour la dessiccation de certaines pièces poreuses, imprégnées en profondeur d'eau ou de graisse ou d'huile, que le nettoyage n'a pas atteint. Il permettra de faire sortir les liquides absorbés, afin que la métallisation adhère efficacement.

I.6.6. Les modes de préparation [10, 11]

I.6.6.1. Le dégraissage

Ce que l'on cherche à éliminer dans cette opération, ce sont des graisses animales, végétales ou minérales ainsi que leurs produits de dégradation et toutes les souillures qu'elles retiennent. Le dégraissage s'effectue soit par dissolution en milieu de solvants organiques, soit par saponification (donc en milieu alcalin), soit par émulsifiations à l'aide d'un tensioactif.

Dans la plupart des cas, on aura recours à une élévation de température suffisante pour ramollir la souillure grasse. De même un effet mécanique (jets, brosses, ultrasons, bulles de gaz

émis par électrolyse) est souvent nécessaire. Suivant les besoins, le dégraissage sera plus ou moins profond. Pour un dégraissage très poussé, il convient de faire suivre le dégraissage chimique d'un dégraissage électrolytique (dont l'action ne saurait se résumer à l'action des bulles).

I.6.6.2. Le décapage

Le nom générique de décapage regroupe les procédés éliminant les produits solides adhérents au métal (oxydes). Pour le fer et l'acier, le décalaminage élimine les couches d'oxydes anhydres formées à hautes températures, alors que le dérouillage concerne les oxydes hydratés de la corrosion naturelle.

Les méthodes de décalaminage sont chimiques, électrochimique, mécaniques ou thermiques. Les méthodes chimiques et électrochimiques utilisent des solutions agressives acides ou alcalines, ou encore des oxydants forts.

I.6.6.3. Le sablage

Le sablage est le terme impropre donné au "traitement par impacts", plus généralement appelé grenailage par les professionnels. C'est un procédé de traitement d'une surface par des projectiles petits et nombreux, destinés à induire des modifications physiques, chimiques ou mécaniques au sujetile.

La technique employée consiste à utiliser, soit un vecteur gazeux (généralement l'air comprimé), soit une force centrifuge (turbine) pour projeter à grande vitesse des grains (projectiles) qui viennent percuter de façon répétée la surface des pièces (subjectiles). Le "grenailage" met en œuvre des projectiles extrêmement variés, différentes méthodes de projection et de nombreux paramètres qui influencent le résultat.

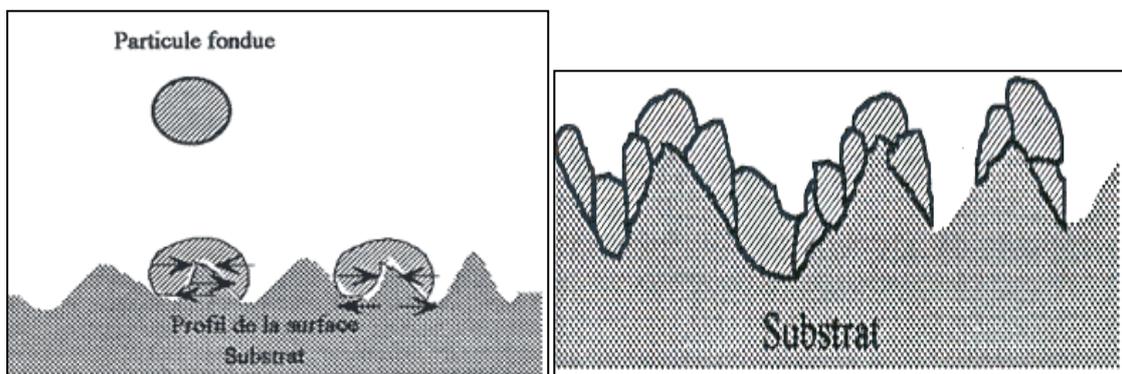


Figure I. 17: L'adhésion mécanique sur un substrat sablé

I.7. Formation et caractéristiques du dépôt

Les revêtements sont caractérisés par plusieurs facteurs dont les plus significatifs sont :

- La structure
- l'adhérence
- la dureté
- la densité (porosité)
- les contraintes résiduelles

I.7.1. Structure du dépôt

Les particules qui sont projetées sur un substrat s'écrasent sur celui-ci pour donner une superposition de couches sous forme lamellaire. En général, la phase de solidification débute avant la fin de phase d'étalement, les particules impactent sur des lamelles déjà solidifiées, donc le dépôt résulte de l'empilement de lamelles, il a une structure lamellaire et ses propriétés sont différentes de celles de matériau massif [12].

Les dépôts comportent des inclusions telles que des oxydes ou encore d'autres matériaux provenant des chalumeaux eux-mêmes (**figure I.17**), des particules infondues ou partiellement fondues n'ayant pas subi un cycle thermique complet (en raison de leur taille ou de leur cheminement dans la source de chaleur) [13].

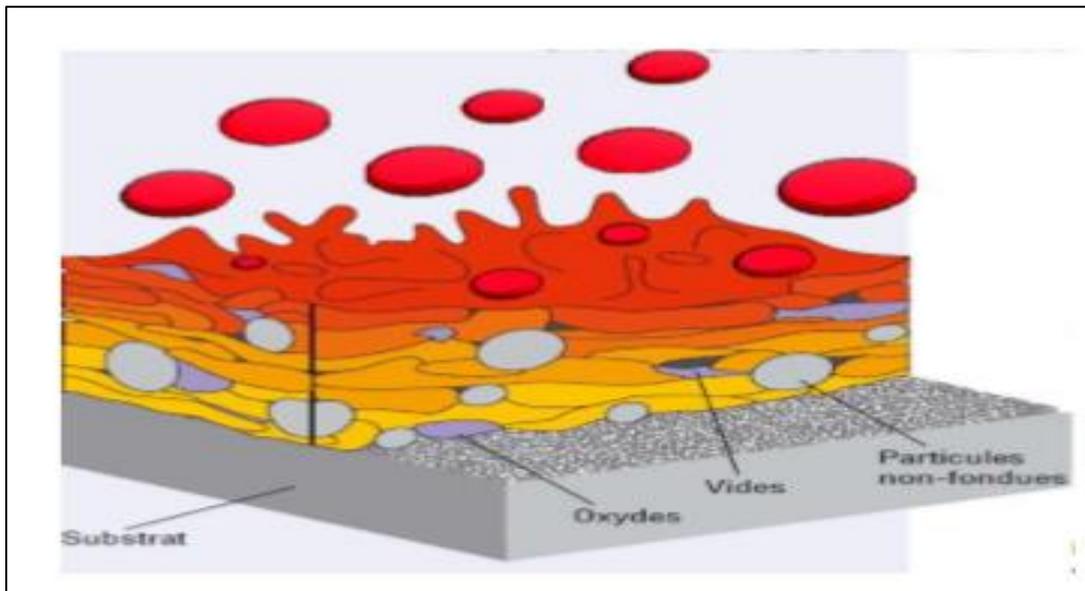


Figure I. 18 Coupe verticale d'un dépôt réalisé par projection thermique [13]

I.7.2. L'adhérence

De façon générale, le comportement d'un revêtement dépend fortement de la qualité d'adhérence entre le substrat et les couches préalablement déposées. Cette adhérence est essentiellement de type mécanique : sous l'influence des forces de pression à l'impact.

La matière à l'état plastique est projetée dans les creux de la surface en établissant des points d'ancrage. Cette adhérence est en fonction des matériaux projetés et des paramètres de projection, Le problème d'adhérence des dépôts projetés thermiquement est l'un des points essentiels à résoudre pour obtenir des résultats fiables dans des conditions d'utilisation sévères :

- Le substrat doit être très propre et le dépôt doit s'effectuer dans les 20 minutes qui suivent le sablage.
- La surface doit être rugueuse afin de faciliter l'adhésion mécanique et d'augmenter la surface de contact.

Les contraintes résiduelles entre le dépôt et le substrat peuvent entraîner le décollement du dépôt au refroidissement [13].

I.7.3. La dureté

Les particules sont soumises à un martelage dû aux impacts des suivantes, ce qui entraîne un phénomène d'écrouissage. Elles sont aussi soumises à un phénomène de trempe, lié à leur trajet et à la température du support. En un temps très court, la température d'un acier projeté à 1500°C, chute rapidement à 100°C, température maximale de la pièce en traitement.

La dureté est une propriété significative parce qu'elle donne une indication de la résistance à l'usure abrasive. Elle est affectée par la teneur en oxydes et la porosité du dépôt. Une teneur en oxydes plus élevée conduit à une dureté plus élevée. L'augmentation de la porosité se traduit également par une diminution de la dureté moyenne du dépôt [14].

I.7.4. La densité

Les dépôts projetés à chaud dans l'air sont poreux. Cette porosité est plus ou moins importante suivant le mode de projection utilisé.

La dimension des particules et leur vitesse ont une influence importante en ce qui concerne la densité du revêtement. Pour les revêtements métalliques cette dernière est également fonction du taux d'oxydes formés pendant la projection [13].

I.7.5. Les contraintes résiduelles [13, 15]

Les contraintes résiduelles sont des contraintes qui existent dans un matériau alors qu'il n'est soumis à aucune action extérieure. Elles agissent de façon significative sur l'adhérence et la cohésion des revêtements.

Elles ont une double origine : contraintes de dilatation différentielle dues à la différence de coefficient de dilatation entre le revêtement et le substrat au cours du refroidissement, et les contraintes de dépôt dues aux divers types de défauts apparaissant au cours de la formation du dépôt tels que lacunes, interstitiels, dislocations, porosités.

Plus le revêtement est épais plus les contraintes augmentent, à l'atteinte d'une certaine épaisseur ces contraintes dépassent la contrainte d'adhérence du revêtement créant un délaminage. Ces contraintes dépendent fortement du mode de projection ainsi que des matériaux projetés. Pour remédier à ce phénomène, la réduction du gradient de température est indispensable, par un préchauffage avant la projection et un maintien du revêtement à une température basse.

I.7.6. L'oxydation et la porosité

Les particules métalliques en fusion, s'oxydent pendant leur trajet de la buse au support. Même si la distance est courte, de 150 à 200 mm et que la durée du parcours n'est que de 1 millièbre de seconde, elles subissent l'action chimique des gaz environnant (air mélangé au gaz de combustion). Ceci entraîne une baisse de densité du dépôt de 10% environ par rapport au matériau projeté. Cette porosité peut être un avantage dans le cas d'un rechargement de surface, puisqu'elle crée des rétentions possibles pour l'absorption d'un lubrifiant souvent bénéfique en mécanique. Par contre, elle devient néfaste en protection de surface, ou son manque de compacité, est un handicap pour l'étanchéité du revêtement.

I.7.6.1. Phénomènes d'oxydation

L'inclusion d'oxydes dans les dépôts tend généralement à dégrader leurs propriétés, ils présentent des lamelles moins fortement liées, une composition chimique hétérogène et des contraintes internes résultant de la différence de coefficient de dilatation thermique entre oxydes et métaux. Les phénomènes d'oxydation mis en jeu en projection arc-fil peuvent intervenir à différents stades du procédé [23-24] :

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

I.7.6.2. Oxydation des gouttelettes en vol

L'importance de l'oxydation des gouttelettes en vol dépend [25-26]

- De la nature du matériau projeté.
- De la température des gouttelettes.
- Du temps de séjour des particules en vol, donc de leur vitesse et de la distance de tir.
- De la quantité d'oxygène présente au voisinage des gouttelettes.
- De la cinétique des réactions d'oxydation.
- Des mécanismes de diffusion de l'oxygène vers le cœur des particules. La quantité d'oxygène présent dans le jet provient du gaz d'atomisation s'il s'agit d'un gaz oxydant comme l'air, mais aussi de l'entraînement de l'air ambiant à la sortie de la tuyère. L'oxydation des particules en vol peut être due à deux mécanismes :
- La diffusion de l'oxygène dans les gouttelettes fondues.
- Des mouvements de convection induits au sein de la gouttelette liquide par l'écoulement du gaz d'atomisation (figure I.18). Ces mouvements entraînent de l'oxygène et des oxydes vers le centre de la gouttelette, et amènent du métal « frais » en surface qui peut alors s'oxyder. De tels mouvements se produisent pour des différences de viscosité cinématique entre le gaz et la particule importantes ($v_{\text{gaz}} / v_{\text{particule}} > 50$) et pour un nombre de Reynolds de la particule supérieur à 20. Ce phénomène est donc favorisé par des vitesses de gaz d'atomisation élevées [24, 27, 28].

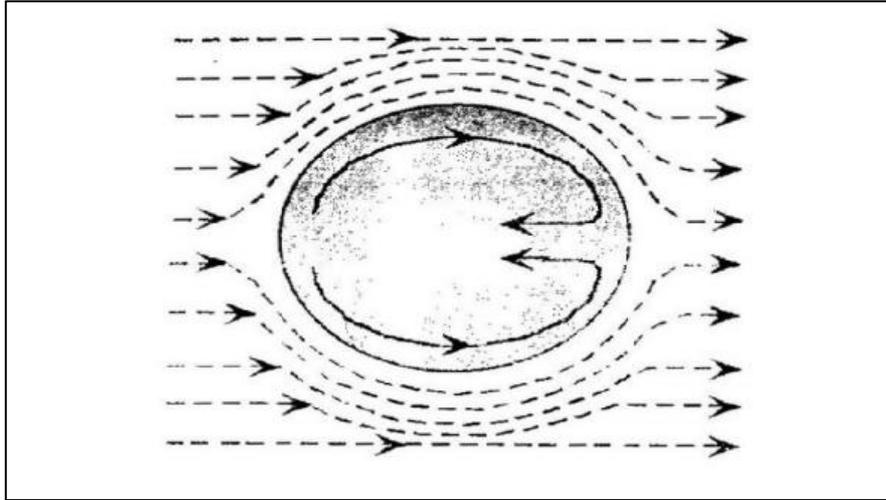


Figure I. 19: Mouvements convectifs au sein d'une gouttelette [26]

L'oxydation en vol peut être donc relativement importante et ne doit pas être sous-estimée.

I.7.6.3. Oxydation lors de la formation du dépôt

Il est possible de distinguer 2 types d'oxydations [29] :

- l'oxydation des lamelles : elle est généralement peu importante car les lamelles ne sont soumises à l'air ambiant que pendant quelques microsecondes, avant qu'elles ne soient recouvertes par d'autres lamelles.
 - l'oxydation entre deux passes successives : elle peut être non négligeable puisqu'il peut s'écouler quelques secondes à quelques heures entre deux passes successives suivant la Taille de la pièce et la vitesse pistolet-substrat. L'étape limitant est la diffusion de l'oxygène à travers la couche d'oxyde en surface. Elle dépend en grande partie de la température du couple dépôt /substrat pendant et après le tir. Cependant, ce type d'oxydation est limité en projection arc-fil car la température du substrat dépasse rarement les 200 °C.
- I.1.3.8.3 Etalement des particules L'étalement des particules est un phénomène complexe qui dépend de nombreux paramètres liés à la particule (morphologie, vitesse, température...) et à l'état de surface du substrat ou du dépôt pendant la projection (matériau, rugosité, température...). Plusieurs études ont essayé de qualifier l'étalement des particules. [30-31]. Elles ont défini par exemple la morphologie des lamelles en fonction des conditions de projection (Figure I.19).

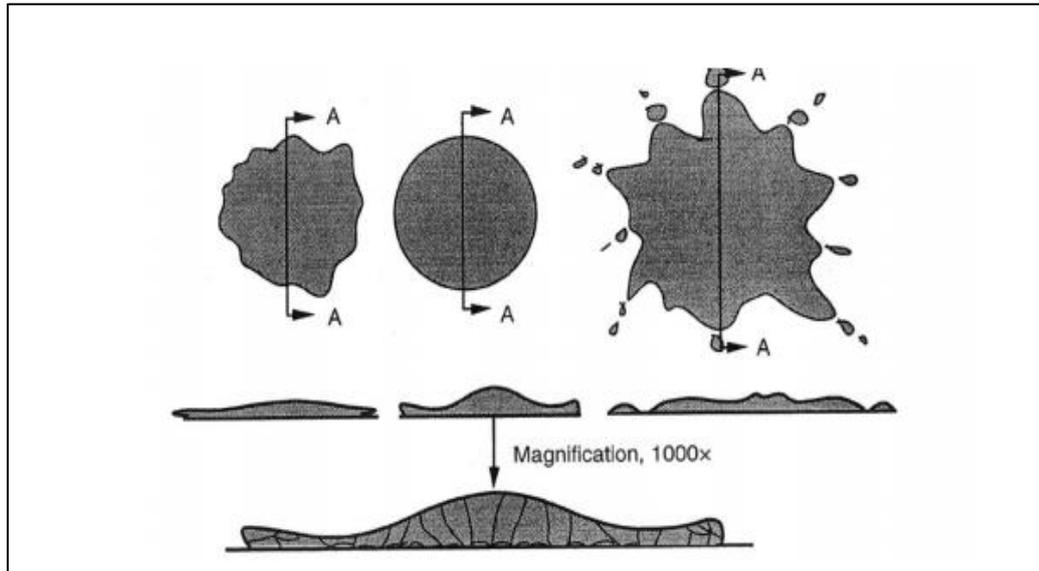


Figure I. 20: Type de morphologie de particules projetées.

Elles ont alors décrit les phénomènes de « splashing » désignant l'éclatement d'impact (vitesse trop élevée des particules) et les conditions permettant d'obtenir une morphologie de lamelles correctes. Cependant, la plupart de ces études sont réalisées sur des substrats lisses qui ne correspondent pas à la réalité mais facilitent les observations. De plus, on montre que la température du substrat joue également un rôle sur l'étalement des particules [32]. Des températures critiques de substrat ont été définies en dessous desquelles les lamelles éclatent. Pour l'alumine, il a été montré qu'elles s'étaient mieux sur un substrat chaud. Ces changements ont été expliqués par les modifications de mouillabilité du substrat en fonction de la température [33]. Des particules arrivent également solides avant l'impact. Ces particules ont eu une injection différente. Elles ont partiellement ou pas du tout fondues dans le plasma. Lors de la construction du dépôt, ces particules infondues (Figure I-19) peuvent rebondir sur la surface ou être emprisonnées dans le dépôt. Lorsqu'elles restent dans le dépôt, ces particules vont être à l'origine de défauts dans leur empilement, notamment de pores.

I.8. Paramètres de projection influant sur le dépôt [16, 17, 18]

I.8.1. Débit des gaz

Les débits des fluides influent sur les caractéristiques des dépôts, raison pour laquelle tous les constructeurs fournissent des tables de réglages auxquelles il faut se conformer. Dans ces tables on trouve le choix de la nature des gaz employés pour projeter qui dépend des matériaux ainsi que les compositions préconisées des mélanges oxy-gaz qui doivent être rigoureusement respectées.

I.8.2. Distance de tir

La distance entre le bec du pistolet et le substrat est appelée la distance de tir ou de projection. Cette distance joue un rôle très important dans la finalité des caractéristiques du dépôt tel que : porosité, adhérence, cohésion, etc.

La distance de tir ne doit être ni trop courte pour donner le temps nécessaire à la fusion des particules et éviter la surchauffe du substrat par suite du contact avec le gaz trop chaud, ce qui peut provoquer des contraintes thermique causant ainsi le délaminage du dépôt, ni trop grande pour éviter la solidification des particules avant l'impact ou bien que leur vitesse ne soit diminuée du fait des collisions avec les molécules de l'air (elle varie généralement entre 60 à 250 mm).

I.8.3. Angle d'incidence

La projection sur le support est généralement réalisée avec un angle d'incidence de 90°. Dans ce cas, le dépôt s'accroche normalement et est homogène.

Si cet angle de projection est inférieur à 45°, la porosité de dépôt augmente et la cohésion des particules entre elles diminuent.

I.8.4. Vitesse de distribution des matériaux

L'injection de ces matériaux dans la flamme se fait en fonction de la puissance du chalumeau, de la nature des produits et des caractéristiques souhaitées du dépôt.

I.9. Amélioration de la qualité du revêtement [18]

Afin de conférer des propriétés meilleures aux dépôts, certains post traitements peuvent être réalisés par :

- colmatage
- imprégnation
- voie mécanique

- traitement thermique

I.9.1. Le colmatage

Le colmatage est une opération qui, par absorption ou par réaction chimique, permet de boucher les porosités ouvertes des dépôts par formation de composés chimiques.

I.9.2. L'imprégnation

L'imprégnation consiste à déposer, à la brosse, au pinceau ou par pulvérisation, des résines ayant un fort pouvoir pénétrant leur permettant de boucher ainsi les pores des dépôts.

I.9.3. Le traitement mécanique

Le traitement mécanique par projection de billes de verre, d'oxyde ou de métal peut être réalisé sur certains dépôts avec deux objectifs :

- Le colmatage du dépôt par bombardement, lui faisant subir une déformation plastique ;
- La relaxation des contraintes résiduelles.

I.9.4. Le traitement thermique

Les traitements thermiques sont souvent utilisés après projection. Ils permettent d'améliorer l'adhérence des dépôts, de modifier la structure métallurgique ou de relaxer les contraintes résiduelles.

I.10.1 Inconvénients de la projection thermique

La projection thermique d'une façon générale permet de traiter tout type de matériaux qu'il s'agisse de matériaux purs, d'alliages métalliques, de céramiques voire de plastiques. Dans tous les cas, la structure du dépôt affecte fortement ses propriétés (densité, conductivité thermique, module d'élasticité, dureté, etc.) et ses performances (résistance à la corrosion, à l'usure, à la fatigue, ou encore aux températures élevées).

Par ailleurs, l'adhérence du revêtement au substrat est un autre paramètre important à considérer en projection thermique (voire le principal). Plusieurs phénomènes peuvent favoriser une telle accroche entre les deux matériaux (substrat et dépôt) qu'il s'agisse des phénomènes mécaniques (par ancrage) ou physico-chimiques (formation de liaisons). Ainsi, l'adhérence substrat-dépôt dépend de nombreux facteurs tels que l'état des surfaces de contact (rugosité, température, contamination) et des contraintes à l'interface dépôt/substrat [5–10].

Lors de leur solidification, les particules fondues forment un réseau de lamelles qui comporte des pores, des fissures inter-lamellaires ou intra-lamellaires, des particules oxydées,

ou encore des particules non-fondues (Figure I.20). Les fissures inter-lamellaires, parallèles au plan des lamelles sont majoritairement dues à des contacts hétérogènes entre les matériaux (problème de mouillabilité).

Les fissures intra-lamellaires, perpendiculaires au plan des lamelles, sont quant à elles dues à la relaxation des contraintes résiduelles générées au sein du revêtement

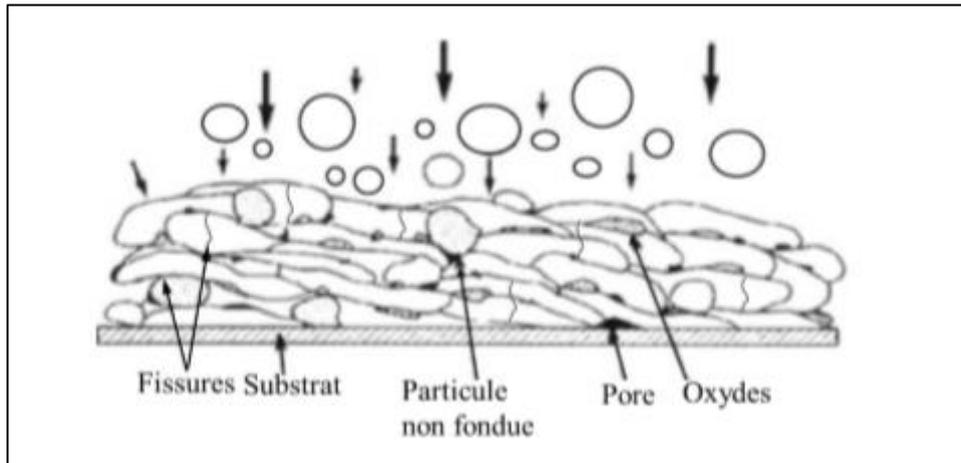


Figure I. 21Schéma d'un dépôt élaboré par projection thermique [7].

Pour améliorer les propriétés et les performances d'un dépôt élaboré par projection thermique, il s'avère donc nécessaire de trouver des solutions pour corriger ces problèmes.

CHAPITRE II

II.1. Introduction

Il y a eu de nombreux types d'usure depuis longtemps, et les types suivants peuvent être identifiés : adhérence, délaminage, usure, corrosion, petite déformation (fretting), chocs, corrosion et oxydation, usure par diffusion. Mais il faut être reconnu qu'en raison de la complexité des phénomènes rencontrés dans la pratique, il est difficile de déterminer le mécanisme de base.

II.2. La tribologie [19]

Un système tribologique est défini comme un système mécanique formé de deux matériaux opposés en contact l'un avec l'autre et qui génère de l'énergie par un mouvement relatif. Ces deux solides évoluent dans le milieu environnemental et peuvent être séparés par une membrane intermédiaire appelée troisième corps. Sur le plan tribologique, le troisième corps est l'opérateur, qui transfère la charge d'un premier corps à un autre, et régule l'essentiel de la vitesse entre les deux corps en dissipant (frottement) la différence de flux. Le troisième corps sépare partiellement ou complètement le premier corps. Ils sont animés par le mouvement (lubrifiant solide ou liquide) ou par formation interne (particules séparées) pour introduire le contact, puis l'interface de ce système devient le lieu de phénomènes de dissipation d'énergie, classés comme terme général pour le frottement.

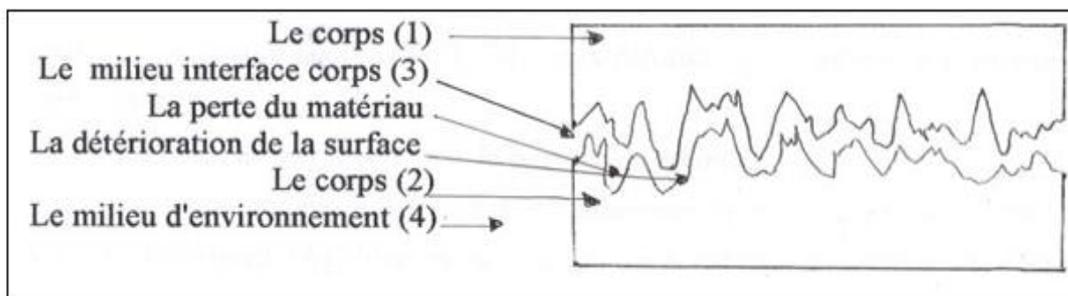


Figure II. 11 : Les éléments d'un système tribologique

II.2.1. Le circuit tribologique

Au cours du frottement, les particules du troisième corps sont constamment en mouvement et sont soumises 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, concept proposé par Y. Berthier [25 26] pour compléter celui des mécanismes d'accommodation des vitesses et comprendre la relation entre le troisième corps et l'usure dans un contact donné. Il s'agit d'une représentation en deux dimensions des débits de troisième corps dans un contact élémentaire (Figure II.2)

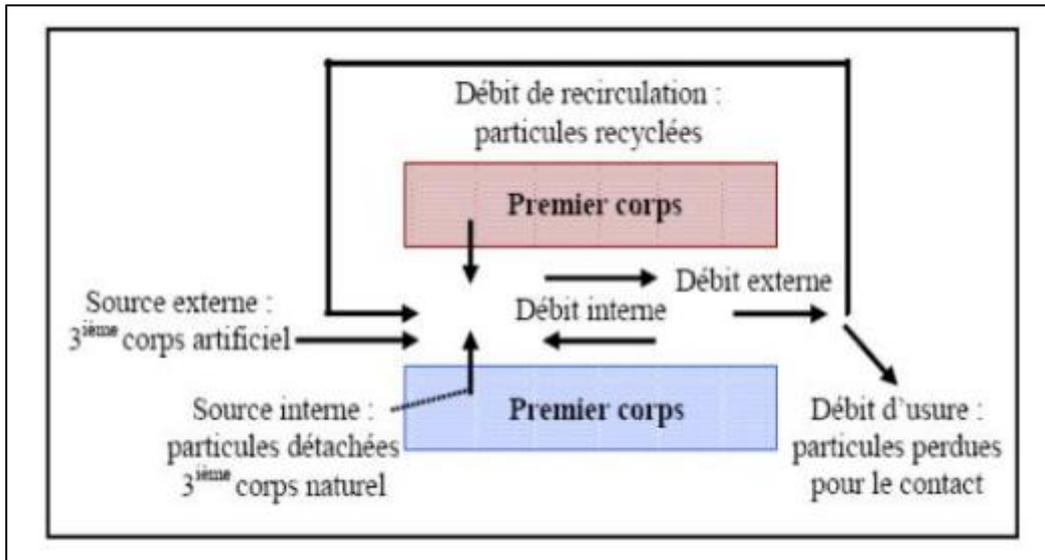


Figure II. 2: Représentation schématique du circuit tribologique dans le cas d'un contact entre deux solides. [27]

Suivant les mécanismes de dégradation de surface, des particules peuvent se détacher des premiers corps du fait de leur dégradation. Il s'agit d'une source interne qui conduit à la formation d'un troisième corps naturel dans le contact (débit source interne). L'introduction d'un troisième corps artificiel (lubrifiant solide ou liquide) correspond à une source externe (débit source externe). Ces particules de troisième corps peuvent rester piégées dans le contact ou bien être évacuées hors du contact. On parlera alors de débit interne et externe. Le débit interne représente la circulation du troisième corps dans le contact. Le débit externe est le débit de troisième corps qui s'échappe du contact. 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 [27].

II.2.2. Paramètres fonctionnels

Pour caractériser une situation tribologique, il importe dans un premier temps, d'identifier les différents contacts et d'extraire les variables opérationnelles qui définissent le fonctionnement de chaque contact.

II.2.3. Mode de contact

Il s'agit de définir la nature et la géométrie du contact.

Ces informations participeront à l'évaluation du champ de contraintes imposé au contact. Par nature du contact on entend la définition générale de ce qui constitue le contact : solide/solide,

liquide/solide, liquide + particules/solide, liquide + vapeur/solide...La géométrie du contact caractérise la forme des surfaces qui limitent les solides au voisinage de la zone de contact.

On définit trois types de contacts:

- les contacts de type ponctuel.
- les contacts linéiques.
- les contacts surfaciques.

II.2.4. La charge du contact

Il s'agit de déterminer le torseur dynamique, c'est-à-dire l'ensemble des forces et moments auquel est soumis le contact. La charge et la manière dont elle est appliquée permettent d'évaluer la nature et le niveau des contraintes auxquelles les couches superficielles sont soumises. La connaissance du champ de contrainte en profondeur est nécessaire pour justifier quantitativement la nature, la qualité et l'épaisseur des traitements ou revêtements de surface pour évaluer les risques de fatigue de contact... La plage de variation des charges mises en œuvre en génie mécanique est extrêmement large allant du millinewton au méganewton [28].

II.2.5. La vitesse du contact

Ce paramètre consiste à préciser les différents éléments du torseur cinématique (ensemble des vitesses et moments cinétiques) appliqué au contact, c'est -à-dire la nature et la cinématique du mouvement. Suivant l'orientation des composantes de ce torseur au niveau du contact, le déplacement pourra s'effectuer en roulement, glissement ou pivotement. La vitesse contribue à l'énergie dissipée dans le contact. Elle est aussi l'un des facteurs intervenant dans l'évaluation de la durée de vie des surfaces, combinée au temps de fonctionnement, elle permet le calcul de la distance à parcourir [28].

II.3. Les surfaces [21]

La surface est définie comme la partie externe du corps. En fait, puisque chaque solide est dans un environnement donné, la surface ressemble plus à une interface. Il constitue une discontinuité dans l'arrangement périodique des atomes. Le nombre de voisins les plus proches du volume d'un atome sera différent du nombre de surfaces, ce type d'atome a donc une grande réactivité.

La notion d'état de surface comprend :

- l'état physico-chimique (nature, structure, texture des couches superficielles) ;

- l'état géométrique (ensemble des écarts géométriques de la surface réelle par rapport à la surface géométrique idéale).

Les surfaces présentent des défauts géométriques de différents ordres :

- ordres macroscopiques liés à des écarts de grandes amplitudes dus généralement aux défauts géométriques de la machine génératrice ;
- ordres microscopiques liés à des écarts de faibles amplitudes dus à l'outil de coupe, aux grains abrasifs, aux particules de sablage ou grenailage, aux vibrations de la machine, ou encore aux piqûres de corrosion.

II.4. Mécanismes d'endommagement des surfaces frottantes

Le premier objet répond à des contraintes locales basées sur deux types de comportement: la transformation de la microstructure et le détachement des particules.

A-Transformations Tribologiques Superficielles

Sous l'effet des sollicitations mécaniques et thermiques, les premiers corps subissent des modifications de leurs propriétés superficielles, conduisant à des transformations de phase et des modifications structurales.

L'ampleur de ces changements dépend de la pression (pression hydrostatique et la pression du contact local) et les déformations induites par la température. Ces changements sont connus sous le nom 'Transformations Tribologiques Superficielles' (Tribologically a Transformed Structures) ou TTS.

b- Détachement de particules

L'apparition de TTS entraîne une modification du champ de contraintes et des déformations admissibles par le matériau, conduisant à un détachement de particules par 'fragilisation' des surfaces du matériau (particules dont la taille varie de quelques nanomètres à quelques micromètres).

Les mécanismes d'usure tels que l'abrasion, l'adhésion etc., peuvent être considérés comme des 'réponses spécifiques' alimentant le troisième corps.

II.4.1 Environnement

Il s'agit de préciser le milieu dans lequel évolue le contact. Ce milieu intervient sur le comportement tribologique du système par:

- sa nature: liquide ou gaz, composition chimique,

- sa température, son débit éventuel,
- ses propriétés mécaniques et physiques qui interviennent dans le comportement mécanique du contact, dans l'énergie mise en jeu et dans sa dissipation,
- ses propriétés chimiques: la réactivité du milieu ambiant avec les matériaux constituant les solides en contact est à l'origine de la création ou de la destruction des films superficiels dont la présence modifie considérablement le comportement du contact; un environnement oxydant favorise la formation ou la maintien de films, un milieu neutre limite leur durée, un milieu réducteur la diminue [HANS03].

II.4.2 Matériaux

Bien que les caractéristiques de frottement ne soient pas une propriété intrinsèque des matériaux, ceux-ci peuvent intervenir d'une manière décisive dans le comportement général du système tant par leurs propriétés mécaniques que physicochimiques [HANS03].

II.5. Le frottement [20]

Les phénomènes de frottement contribuent dans de nombreuses applications habituelles et industrielles. Le frottement se définit comme étant une résistance à un mouvement entre des surfaces en contact. Lorsque deux solides en contact sont en mouvement, des frottements s'opposent aux forces de déplacement. Ces derniers se produisent au niveau des irrégularités des surfaces en contact (Figure II.3).

Pour les atténuer, on peut appliquer un lubrifiant entre les deux surfaces. Dans tous les cas, il engendre une résistance au mouvement provoquant la création de contraintes mécaniques superficielles et la dissipation de chaleur, entraînant ainsi l'usure plus ou moins rapide des corps en contact et par conséquent la modification de leurs surfaces

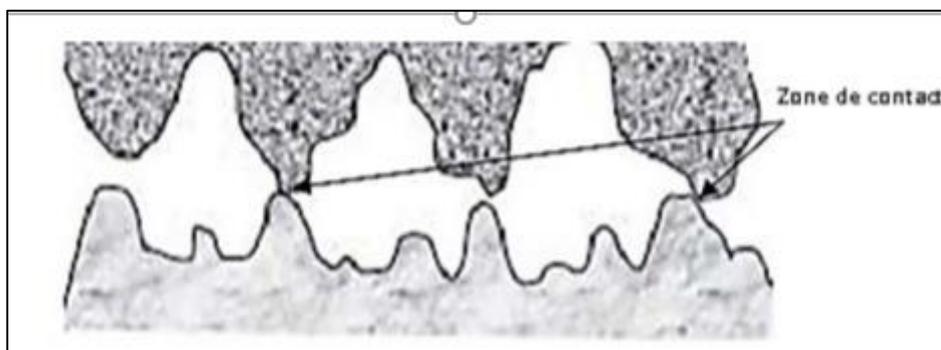


Figure II. 3: L'interface de contact de deux surfaces en mouvement [16].

II.5.1. Type de frottement

Il existe trois types de frottement :

A-Frottement sec

Le frottement sec désigne l'ensemble des phénomènes qui naissent dans la zone de contact entre deux corps, en l'absence de lubrification, et qui s'opposent au glissement de ces corps. S'il y a glissement relatif entre les deux corps en contact, on parle du frottement dynamique, sinon le frottement est dit statique. La compréhension des mécanismes entrant en jeu est restée longtemps très lacunaire, malgré l'intérêt porté à ce problème depuis déjà de nombreuses années. Ce n'est que ces dernières décennies, grâce à l'accumulation de données expérimentales et de résultats théoriques, que des progrès importants ont été faits [12].

Cependant, des progrès importants ont été réalisés à la suite des travaux de Holm en 1938, qui montrent que les aspérités en contact se déforment plastiquement et peuvent se souder, ainsi la force de frottement est directement reliée aux contraintes de cisaillement des jonctions formées. Le modèle de Bowden et Tabor [13] suppose que le frottement sec entre deux surfaces rugueuses est dû essentiellement à deux processus physiques fondamentaux : le cisaillement des micro-jonctions adhésives formées au niveau des points de contact et le labourage des surfaces par les aspérités. La force du frottement sec est ainsi la somme d'une force de cisaillement due à l'adhésion et d'une force de déformation due au labourage [13, 15].

B-Frottement hydrodynamique

Les surfaces en mouvement relatif ne sont pas en contact par leurs aspérités parce qu'elles sont séparées par un épais film de lubrifiant. Le coefficient de frottement est faible et ce type de frottement est indiqué pour l'utilisation à haute vitesse ou lorsque la force normale est élevée [16].

C-Frottement onctueux

C'est un frottement de niveau intermédiaire entre le frottement sec et hydrodynamique: le film du liquide absorbé en surface ou formé par réaction chimique est de faible épaisseur. Le degré d'adhérence de ce film avec la surface détermine son efficacité. Ce régime offre un coefficient de frottement plus faible que le régime sec [16].

II.6. Le phénomène d'usure

La détérioration d'une matière produit des déchets. Qu'on appelle l'usure, c'est la conséquence du frottement et se produit au niveau de la zone de contact.

L'usure peut provenir de diverses origines. Ces origines peuvent être mécaniques, physiques, chimiques ou thermiques. On a résumé dans le **Tableau II.1** les origines de l'usure et leurs effets fréquemment rencontrés.

Origine	Effets observables
Mécanique	- Modification des contraintes macroscopiques, souvent diminution (rodage des surfaces par arasement des « points durs ») - Déformation plastique : évolution de dureté, changement microstructural, création et/ou déplacement de dislocations, cisaillement, rayures, impacts, bourrelet ... - Fissuration : Initiation, propagation
Chimique (fort couplage avec thermique)	- Changement de composition chimique - Réactions chimiques, oxydation...
Physique	- Transformations de phases, amorphisation - Transferts par adhésion, augmentation de masse - Evolution micro grippage, grippage, micro soudage - Transformation micro et macro- géométrique
Thermique	- Elévation de température, dilatation, fusion superficielle

Tableau II. 1: Origine et effets observables de l'usure [18]

Les paramètres qui influent sur le taux d'usure sont : [18]

- La force de contact,
- Les conditions opératoires : la charge, la température, la vitesse, la pression,
- L'aire de contact,
- L'état physico-chimique des surfaces frottantes (la rugosité, les couche d'oxydes),
- Les propriétés mécaniques des matériaux (dureté),
- L'absence ou la présence d'un lubrifiant

II.6.1 Mécanismes d'usure [20]

On distingue généralement quatre mécanismes d'usure :

- Adhésion, formation de jonctions adhésives puis arrachement de métal
- Abrasion ou labourage par des aspérités ou des particules abrasives.
- Délaminage, croissance de fissures sous la surface suivie d'une rupture par fatigue.
- Oxydation ou enlèvement de matière oxydée

A-L'usure par transfert ou adhésion

L'usure adhésive se caractérise par un transfert de débris d'un des deux antagonistes vers l'autre soit par un mécanisme d'origine purement mécanique, soit suite à une réaction physico-chimique. Pour le transfert mécanique, plusieurs hypothèses ont été développées. Les micro-aspérités présentes dans le contact peuvent conduire à la diminution des zones en contact et générer aux jonctions des énergies très élevées qui peuvent favoriser les réactions physico-chimiques (micro soudage des aspérités en contact)

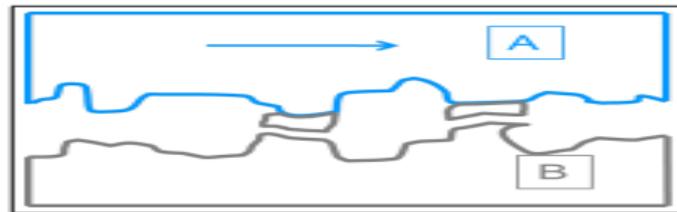


Figure II. 4 Phénomènes élémentaires de l'usure adhésive [8]

Lors du frottement, il existe entre les matériaux antagonistes une multitude de micro contacts qui supportent l'ensemble de la charge normale. En effet, dans ces régions, une constriction des lignes de forces engendre des concentrations de contraintes et l'augmentation de la température (températures flashes). L'évolution de ces aspérités dépend des conditions de sollicitations et de l'environnement.

Un équilibre est atteint dès que l'adhérence des films de transfert est supérieure à la force de frottement. Sinon, les contraintes de cisaillement générées provoquent la rupture à l'interface surface/film transféré et forme des débris. Ces derniers peuvent être progressivement évacués du contact en laissant une surface très réactive siège d'un nouveau processus de dégradation. Si les débris restent piégés dans le contact, les aires réelles de contact s'accroissent et assurent un rôle de portance (effet de séparation des antagonistes, les débris supportent les pressions, l'usure et le coefficient de frottement sont moindres).

B- L'usure par abrasion

L'agent principal de ce phénomène est le contact entre les aspérités des deux surfaces. Cette usure correspond au déplacement ou à enlèvement de matière par celles-ci. Cet enlèvement se produit soit lorsque l'un des matériaux est plus dur soit lorsque des particules dures et de formes anguleuses introduites intentionnellement (polissage) ou formées par réaction chimique à partir des débris d'usure (tribo-chimie) se trouvent entre les surfaces de glissement. Il se produit alors

un déplacement de matière dû aux parties dures et la dégradation de surface se manifeste par polissage, des griffures ou des sillons accompagnés ou non d'émission de fins débris, copeaux ou écailles Figure III.3.[20] L'abrasion est un phénomène de dégradation superficielle se rapportant aussi bien l'outil que le produit de mise en forme la dureté et le taux de consolidation de la structure par écrouissage sont des facteurs importants qui limitent l'usage abrasif sous réserve que les matériaux conserve une capacité de déformation plastique sans excès de fragilité. [21]

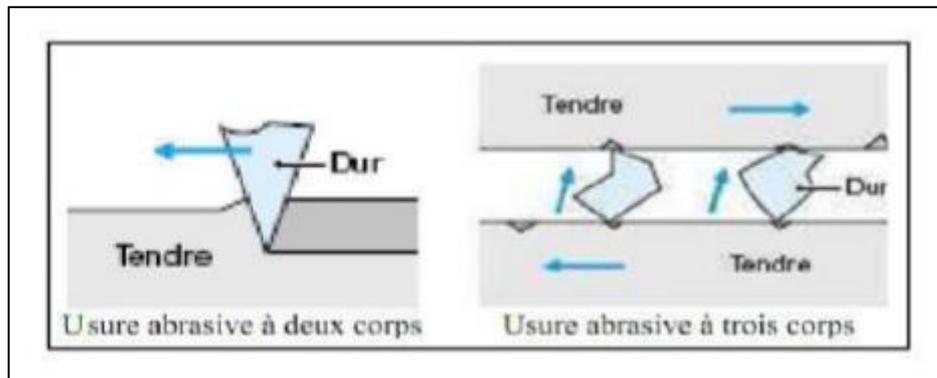


Figure II. 5 Phénomènes élémentaires de l'usure abrasive à deux et trois corps

L'usure peut résulter des protubérances d'une des pièces ou des particules qui circulent dans l'interface. On peut distinguer deux modes d'usure par abrasion :

- L'abrasion à deux corps, dans laquelle la pièce la plus dure « lime », « râpe » la plus tendre,
- L'abrasion à trois corps, dans laquelle des éléments plus durs que les pièces en présence s'incrudent dans la pièce la moins dure.

La perte de matière dépend à la fois du matériau usé et de l'abrasif et l'aspect des sillons fournit de précieuses indications :

- S'ils sont brillants et très peu profonds, les aspérités de la pièce antagoniste ont raclé les couches d'oxydes,
- S'ils sont isolés, et brusquement interrompus, des particules dures introduites entre les surfaces se sont plus ou moins incrustées,
- S'ils sont ininterrompus et rayent la pièce dure, des particules abrasives sont enchâssées dans la pièce tendre.

- S'ils sont ininterrompus et marquent la pièce tendre, la pièce antagoniste plus dure est trop rugueuse.

C-L 'usure par fatigue

L'usure par fatigue est lente et habituellement masquée par l'abrasion ou l'adhésion. Induit par le frottement de roulement ou de roulement avec glissement sous fortes charges répétées, on la rencontre essentiellement dans les engranges et les et les roulements dont elle constitue le mode normal de destruction.

Une longue phase de vieillissement précède les accidents visibles. Une pièce peut être atteinte irrémédiablement tout en gardant jusqu'au dernier moment une apparence intacte.

Ce phénomène dépend des paramètres géométriques et mécaniques du contact, de la structure métallurgique des surfaces (contraintes résiduelles, dureté superficielle, etc...), du lubrifiant et de la compatibilité chimique des matériaux antagonistes. [19]

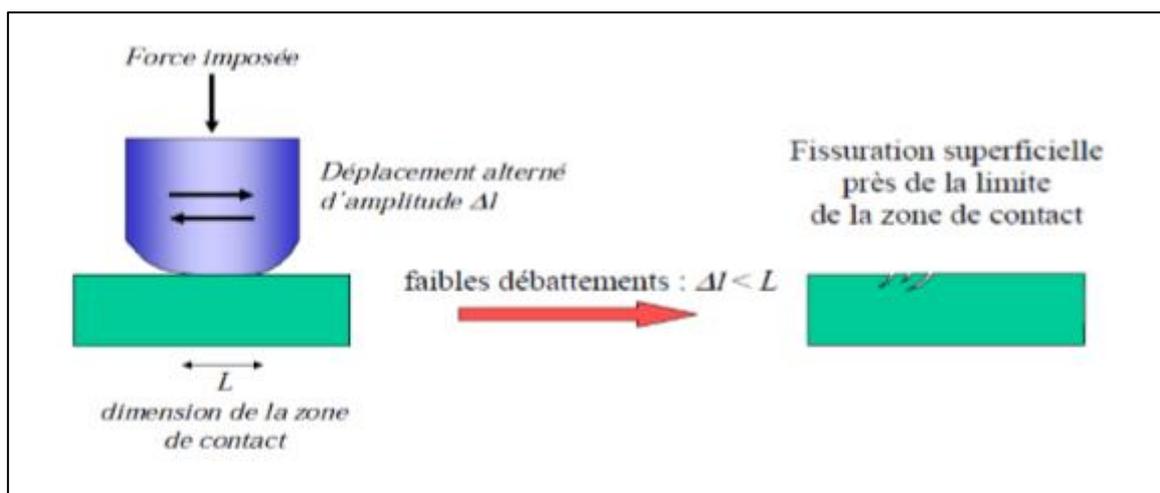


Figure II. 6 Phénomène de l'usure par fatigue

D-L 'usure par réactions tribochimique

C'est un système à trois composantes, où interviennent la réactivité chimique entre les surfaces, la réactivité chimique avec le milieu environnant et la réactivité physico-chimique avec les débris. Ce type de dégradation résulte d'une seule ou de plusieurs réactions chimiques sous l'effet d'agent corrosif (environnement, lubrifiant) et des contraintes mécaniques pendant le frottement. Suivant l'état structural superficiel, il se crée des oxydes

réactionnels dépendant de l'environnement. Suite au frottement entre les surfaces, la rupture des aspérités qui s'oxydent, forme des débris en général très stables et très durs. Ces derniers jouent alors un rôle abrasif et viennent dégrader les surfaces antagonistes et donc entretenir l'usure. Cependant, il est possible de rencontrer une configuration moins agressive par la formation de films d'oxydes adhérents à la surface d'un des antagonistes et suffisamment résistants au cisaillement pour jouer un rôle protecteur.

II.6.2. Cartes d'usure

Pour être plus général et surtout plus prédictif que toutes ces lois, Lim et Ashby [19] ont dressé des cartes d'usure, représentations de résultats d'essais de type « pion-disque », pour définir des domaines de comportements identiques et des transitions entre différents régimes d'usure. Le but étant ici de construire une base de données équivalente, par exemple, aux catalogues existants pour les caractéristiques d'élasticité des matériaux. Pour faciliter l'extrapolation à d'autres types de contacts, les résultats, donnés en terme de dégradation (usure douce, usure sévère, délaminage, grippage), sont fournis en fonction d'une vitesse et d'une pression de contact adimensionnées.

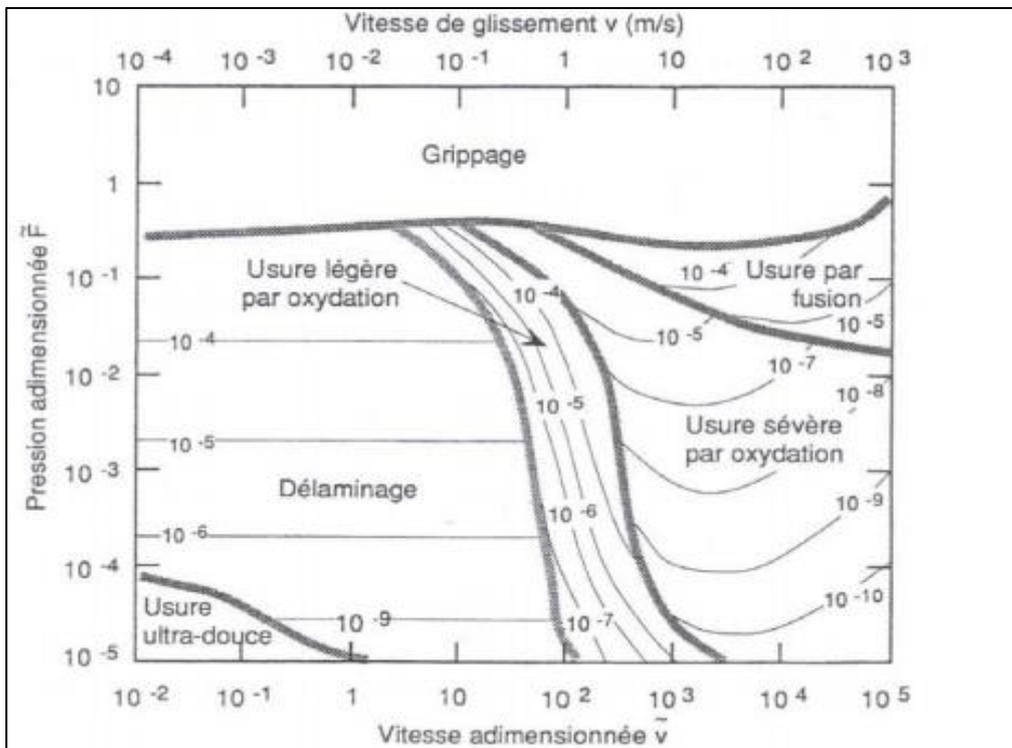


Figure II. 7 Carte d'usure pour un contact acier-acier à sec pour une configuration pion-disque, d'après Lim et Ashby [19].

II.7. Paramètres influençant l'usure abrasive [11]

II.7.1. Caractéristiques des particules abrasives

L'usure abrasive dépend particulièrement de la topographie des surfaces en contact, dans le cas d'une abrasion à deux corps, ou bien des particules abrasives situées entre les deux surfaces dans le cas d'une abrasion à trois corps, parmi les caractéristiques principales on cite :

- Dimensions et morphologie des particules abrasives, les particules possédant des angles aigus provoquent d'avantage un effet de coupe alors que les particules ayant des angles arrondis ont tendance à provoquer des déformations plastiques ;
- Quantité et nature de l'abrasif impliqué dans le contact ;
- Charge appliquant les particules abrasives sur la surface ;
- Nature, structure du matériau subissant l'abrasion.

A-Influence de la vitesse

La vitesse des particules abrasives a un impact direct sur l'intensité de l'usure, puisque on remarque que l'usure a tendance à croître avec la vitesse, on explique ce phénomène par l'ampleur que prend le coefficient de frottement avec l'augmentation de la vitesse, celui-ci a tendance à provoquer un échauffement et donc une perte de propriétés mécaniques des matériaux. Au-delà d'une vitesse critique l'enlèvement de matière devient inévitable.

B-Influence de la dureté

La vitesse d'usure est principalement dépendante de la dureté de l'abrasif ainsi que de celle du matériau antagoniste. Considérons H_a et H_s , les duretés respectivement des particules abrasives et des surfaces.

J.M.Hutchings a montré qu'il y avait une véritable ligne de démarcation entre deux types d'usure soient l'abrasion douce qui se produit lorsque $H_a/H_s < 1,2$ et qui est sensible aux variations de ce rapport, en contraste avec l'usure sévère où $H_a/H_s > 1,2$. Les particules angulaires causent une usure plus importante que celles qui sont sphériques.

Au-dessus d'une taille critique, la vitesse d'usure est pratiquement indépendante d'une augmentation de la taille des particules, l'évaluation de la taille des particules reste difficile car ce sont rarement des sphères.

C-Influence de la charge [24]

Une loi empirique globale est généralement proposée pour modéliser l'usure abrasive. Le volume usé par abrasion V est proportionnel à la charge appliquée et à la distance parcourue par le corps abrasif et inversement proportionnel à la dureté du matériau usé :

$$V = KWL/H \quad (\text{II.2})$$

Ou : K est le coefficient d'usure.

W est la charge appliquée au contact.

L est la distance parcourue.

H est la dureté de l'abrasif.

Avec K variant de :

$K=0.5$ à 0.005 pour l'abrasion à trois corps. $K=0.5$ à 0.05 pour l'abrasion à deux corps.

Toutefois cette loi ne s'applique pas pour les matériaux de très grande dureté, donc ayant un comportement fragile, tel que les céramiques ou le mode d'endommagement est par fracturation.

II.8. Règles fondamentales pour atténuer l'usure [25]

Ces règles ont été données par Jean-Jacques CAUBET dans son livre « Théorie et pratique industrielle du frottement ».

- Eviter le contact des pièces en mouvement relatif tout en conditionnant leur surface pour résister à un contact accidentel ;
- Ventiler rationnellement les calories ;
- Eviter les accidents connexes tels que la corrosion, la cavitation, l'érosion ;
- Définir au bureau d'études les protocoles de rodage ;
- Imposer en fabrication les contrôles de métallurgie, géométrie, macro et micro topologie spécifiques du frottement ;
- Respecter l'homogénéité du projet : un bon couple de frottement doit durer exactement l'âge de la machine, toutes les pièces s'usant ou vieillissant ensemble.

II.9. Dépôts résistants à l'usure [17, 23]

Pour qu'un revêtement conserve ses propriétés en service il doit présenter de bonnes interactions avec le substrat. La propriété fondamentale d'un revêtement, c'est l'adhérence. Meilleure est l'adhérence d'un revêtement, plus il peut supporter des conditions de service sévères. Après l'adhérence revêtement/substrat, l'autre caractéristique recherchée pour les revêtements de surfaces fonctionnelles de pièces de machines tournantes concerne la résistance à l'usure en service de ces dernières. L'usure est la perte progressive de matériau due à l'interaction des surfaces en mouvement relatif (l'une par rapport à l'autre). De ce fait, l'usure est toujours associée à une perte de matière et donc à une perte de masse. Pour les revêtements réalisés par la technique de projection thermique, l'évaluation de leurs tenue a l'usure est habituellement quantifiée à travers la perte de masse relative en fonction du temps en utilisant des tests d'usure dans une configuration type pion stationnaire-disque rotatif.

Les facteurs qui doivent être pris compte dans ce type d'usure sont essentiellement :

- La charge appliquée qui dépend de la nature, de morphologie, de la taille des abrasifs ainsi que de leur dureté,
- La façon dont cette charge est appliquée : charge continue, cyclique ou dynamique, vitesse relative de défilement de la surface abrasive,
- Le mode de contact qui dépend des formes macro et micro géométriques des surfaces en contact,
- La nature du milieu de travail est sa température

CHAPITRE III

III.1. Introduction

L'objectif de notre travail est de réaliser des dépôts en alliage à base de chrome sur un substrat en acier A60 par projection thermique à l'arc électrique sous différents réglages des paramètres de projection à savoir : (Tension du générateur (v), Intensité du courant(A), jet d'air comprimé, vitesse de particules)

Le procédé utilisé est celui de la projection arc électrique. Le matériau d'apport déposé est sous forme de baguette en alliage à base de chrome. Puis une analyse mécanique, basée sur les tests d'usure dans une configuration pion stationnaire-cylindre rotatif sous différentes charges (5,10, 20 et 40 N) avec des vitesses de glissement de 90 tr/min et 180 tr/min (correspondant à 0.5 et 1 m/s respectivement) en fonction du temps, a été effectuée pour évaluer la perte de masse relative. Des mesures de tractions sont également effectuées.

III.2. Matériaux utilisés

III.2.1. Le substrat

Le substrat utilisé pour réaliser les dépôts est un acier de construction mécanique d'usage général de type A60 et de nuance E335. C'est un acier doux ordinaire hypoeutectoïde à bas de carbone non allié qui présente une bonne ductilité.

E335	Fe	Ni	C	Mn	Cu	Si
	Bel	<0.03	0.1	0.231	0.119	0.044

Tableau III. 1 Analyse du substrat par la fluorescence des rayons X

III.2.2. Dépôts réalisés

Le matériau de projection utilisé est un alliage à base de Cr (Ni-Mn), qui se présente sous forme de baguette de diamètre 4.75 mm Il possède une grande dureté grâce à sa matrice riche en carbure et elle est de l'ordre de 62 HRC. Il convient pour des applications exigeant la résistance à l'abrasion et à la corrosion. Sa composition est donnée dans le **tableau III.1**.

Eléments	Cr	Ni	Mn	B	Si	Fe	C
Composition en (%)	18	8	6	2.8	3.7	3.5	0.6

Tableau III. 2: Composition chimique du matériau d'apport donnée par le fournisseur

III.3. Présentation des échantillons

III.3.1. Élaboration des échantillons

Les échantillons utilisés pour la projection thermique, ont été usinés sur le tour parallèle au niveau du hall de technologie où on a effectué :

- Un dressage, pour avoir un bon état de surface;
- Un épaulement, dans le but de fixer les pièces, lors de la projection;
- Un chanfreinage, dans le but d'avoir un contact parfait entre le revêtement et la surface antagoniste.

Les échantillons élaborés présentent la forme de pions et sont représentés dans la **figure III.1**.

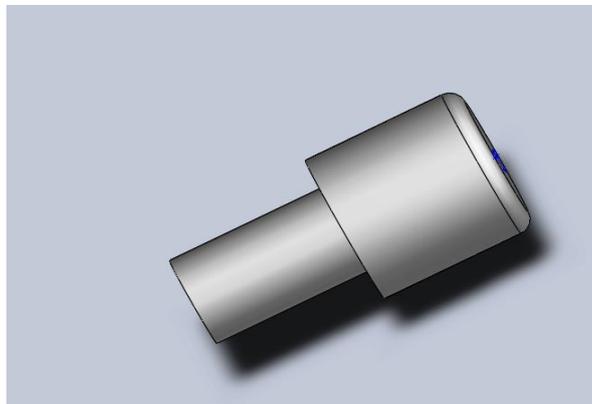


Figure III. 1: Echantillon utilisé pour la projection

III.3.2. Préparation des surfaces à revêtir

La préparation de la surface est une étape incontournable avant de procéder à la projection thermique. En effet, le mode principal d'adhérence de ces revêtements est l'ancrage mécanique à la surface [39].

Toutefois, une surface industrielle peut présenter un film superficiel pouvant affecter les propriétés du dépôt et causer plusieurs phénomènes de dégradation à savoir l'usure et la corrosion [45]. Cela impose la réalisation d'une série d'opérations successives indispensables avant la projection thermique à savoir :

- Le nettoyage par dégraissage pour débarrasser la surface de toute contamination.
- Le sablage nécessaire pour créer une certaine rugosité pour l'ancrage des particules.
- Le nettoyage complémentaire au sablage pour éliminer les particules incluses par cette opération.

- Le préchauffage du substrat qui est une étape obligatoire dans certains cas avant la projection thermique.

III.3.2.1. Nettoyage de la surface

La surface du substrat doit être propre et exempte de toute matière contaminant (graisse, huile...) afin d'éviter les problèmes de détachement du revêtement [25] [46] [47]. Il agit alors d'une étape de dégraissage qui implique l'utilisation des dégraissants pouvant être des solvants (élimination des impuretés par dissolution), des produits alcalins (élimination des impuretés par saponification) ou des tensio-actifs (élimination des impuretés par émulsion) [48].

III.3.2.2. Sablage

Après le nettoyage de la surface du substrat, il est nécessaire de procéder au sablage. D'une part, il permet de décaper la surface et d'éliminer le reste des contaminants. D'autre part, il crée une certaine rugosité à la surface et permet, par conséquent, aux particules fondues lors de la projection de venir s'ancrer dans ces irrégularités et réaliser ainsi un meilleur accrochage mécanique. En effet, les particules fondues suivent les contours des irrégularités, les serrent en se contractant à la solidification lors du refroidissement [49] [50].

III.3.2.3. Préchauffage du substrat :

Le préchauffage du substrat a été étudié et montré comme moyen d'amélioration des propriétés inter-faciales. Il permet de minimiser les phénomènes de trempe thermique et d'améliorer la mouillabilité du substrat [61] [62]. Le préchauffage peut se faire alors à la flamme et appliqué à l'arrière du substrat afin d'éviter le risque de toute détérioration de surface et de contrôler facilement la température.

III.4. Réalisation des dépôts

Afin de bien mener l'opération de projection, il est impératif de respecter certaines étapes telles que la bonne usinabilité des échantillons, qui se représentent sous une forme bien déterminée (voir représentation des échantillons élaborés) et une préparation de la surface à savoir le sablage ainsi que les paramètres de projection.

III.5. Les différents réglages des paramètres de projection

III.5.1. Pistolet utilisé

Consiste à créer un arc entre deux fils métalliques agissant comme deux électrodes. Un jet d'air comprimé, situé dans l'axe du point de création de l'arc, pulvérise le métal fondu sur le substrat.

Les principaux paramètres de projection sont : la tension et l'intensité du courant d'arc, la nature et la pression du gaz d'atomisation, la nature et la pression du gaz de gainage, la forme et le diamètre interne de la buse, la vitesse relative pistolet-substrat et la distance de tir [31-33].

L'un des avantages de l'ARC est que deux fils de natures différentes peuvent être utilisés simultanément pour produire un alliage spécifique à une application.

Ce type de revêtement industriel est plus dense et offre une meilleure adhérence que celui obtenu par la projection à la flamme, en raison d'une vitesse de particules plus élevée.

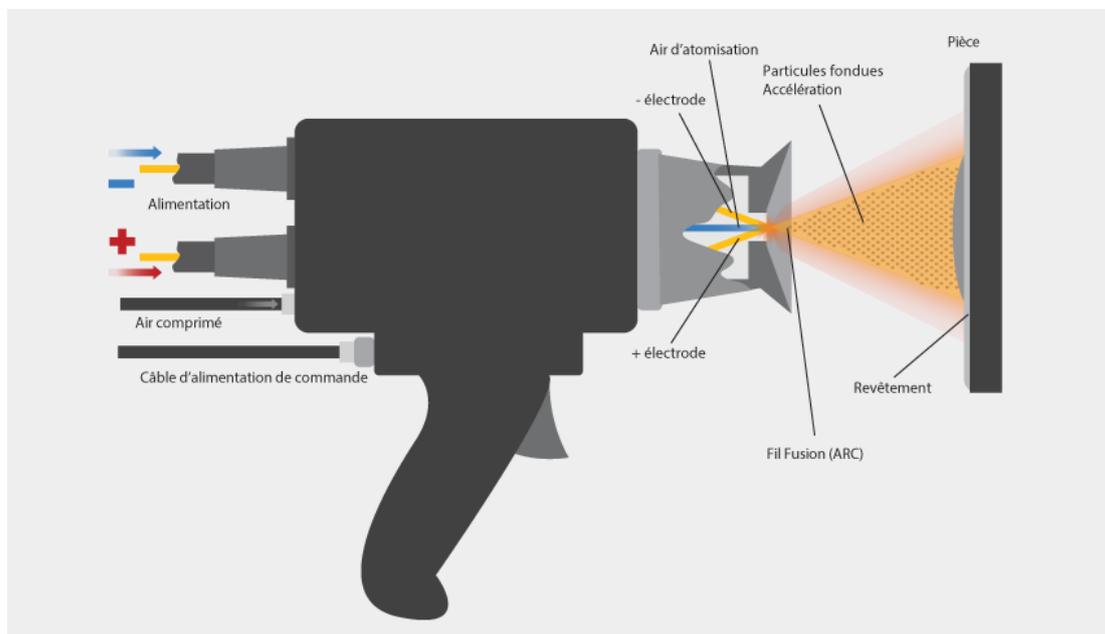


Figure III. 2. Principe de fonctionnement d'un pistolet arc électrique

Forme du matériau d'apport	Fil
Vitesse d'avance du fil	0.06 m/s
Température de flamme (°C)	6 000
Transport des particules	Air comprimé
Rendement moyen (%)	80
Epaisseur	0,2 à 3 mm
Angle (°)	90

Pression d'air dans la buse de projections (bar)	3
Tension du générateur (v)	30
Intensité du courant (A)	100

Tableau III. 3Caractéristiques des procédés de projection thermique arc électrique

III.5.2. Avantages

- Solution de haute qualité et économique
- Finition de surface solide et dense
- Surfaces adhérentes et antidérapantes
- Faible température de processus
- Production de matériaux élevée par heure
- Résistance à de nombreux environnements corrosifs

III.6. Les tests d'usure

Les essais d'usure sont effectués dans une configuration type pion stationnaire-disque rotatif (**Figure III.3**). Le pion présente une tête de diamètre 10 mm avec un axe de longueur aussi 10 mm et de diamètre 6mm pour les besoins de sa fixation sur la tige articulée du dispositif d'essai d'usure qui est monté sur un tour permettant de varier la vitesse de rotation du disque.

Les revêtements ont été déposés sur la surface de la tête du pion et polis aux papiers abrasifs jusqu'à la granulométrie la plus fine (2000) pour être dans les mêmes conditions d'une pièce rénovée qui subit systématiquement une rectification. Le disque rotatif utilisé, est un acier martensitique de nuance Z200Cr13 ayant une dureté de 63 HRC à 65 HRC. Les essais d'usure ont été réalisés à sec avec différentes charges (5, 10, 20 et 40N) et deux vitesses de glissement (0,5m/s et 1m/s) pendant une heure. La perte de masse pour chaque essai est mesurée à l'aide d'une balance analytique de précision 0,1mg.

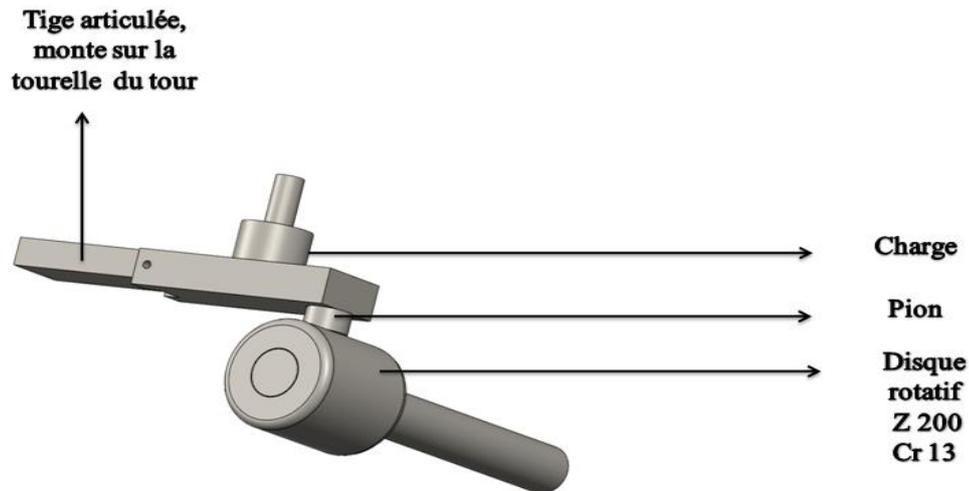


Figure III. 3 Dispositif d'usure utilisé

III.6.1. Principe du test d'usure

Le but des dépôts est d'augmenter la durée de vie technique des composants mécaniques, c'est-à-dire de surveiller le comportement à l'usure du revêtement en évaluant la perte de masse relative du revêtement au cours du temps. Il s'agit d'une méthode analytique qui consiste à faire fonctionner un dispositif mécanique dans un temps connu, puis à extraire et peser la pièce à étudier pour déterminer sa perte de masse. Pour les pièces pesant moins de 200g, la précision de mesure est de l'ordre du dixième de milligramme.

$$\text{Perte de masse relative (\%)} = \text{perte de masse (g)} * (100) / \text{masse initiale (g)}$$

III.6.2. Procédure des essais

La procédure des tests est comme suit :

Avant de commencer les tests, on doit nettoyer notre échantillon des éléments additifs à l'aide de l'éthanol.

1. Prendre la masse initiale (m_0) de l'échantillon à l'aide d'une balance analytique de précision 0.1 mg.
2. Nettoyer le cylindre monté sur le mandrin.
3. Introduire l'échantillon dans le dispositif, et actionner le tour.
4. Après la fin du temps d'essai (1 heures), on prend la nouvelle valeur de sa masse (m_f) tout en nettoyant l'échantillon.

5. Nettoyer le cylindre monté sur le mandrin.

III.6.3. Les paramètres à prendre en compte lors des tests d'usure

Les charges : Les charges que nous avons appliquées à nos échantillons sont de 5,10, 20, et 40 Newtons.

La vitesse : Nous avons travaillé avec deux vitesses, 90 tr/min, qui correspondent à 0,5 m/s et 180 tr/min qui correspondent à 1 m/s.

La durée : La durée appliquée à nos échantillons est de 1 heure.

Lubrification : les essais ont été réalisés à sec.

La température : les essais ont été réalisés sous une température ambiante.

La Pression : La pression exercée est la pression atmosphérique.

CHAPITRE IV

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons les résultats expérimentaux sous forme d'histogrammes et de Courbes de la perte de masse relative en fonction de la charge et la variation de la température En fonction de temps pour des vitesses de glissement de 0,5m/s et 1m/s pendant 30 minute de Service réaliser avec origine pro. D'une part. D'autre part, nous présentons les observations microstructurales qu'on a été réalisée sur un microscope optique est-elle été traiter avec image j

IV.2. Observation métallographique

Après préparation des échantillons et polissage, des examens micrographiques ont été effectués au niveau du hall de technologie, sur les interfaces (dépôt/substrat).

Les dépôts formés par projection thermique sont obtenus par empilements successifs de gouttelettes de matériau fondu ou à l'état pâteux. La structure ainsi formée est du type lamellaire (stratifiée) : [16],. La Figure IV. 1 illustre la morphologie lamellaire typique du revêtement en chrome élaboré par projection thermique arc électrique . Le revêtement globalement dense, renferme néanmoins quelques porosités et des particules plus ou moins sphériques. Les porosités peuvent provenir soit de microcavités dues à un empilage imparfait des gouttelettes, soit de gaz enfermés pendant la solidification. La présence des particules plus ou moins sphériques dénommées habituellement particules non fondues est due au fait qu'elles soient initialement à l'état semi fondu (pâteux) à la sortie de la buse de la torche et continuent leur refroidissement au cours de leur envol avant leur impact avec la surface du substrat [16], [17].

Les observation métallographiques obtenues sont représentées sur la figures qui suit

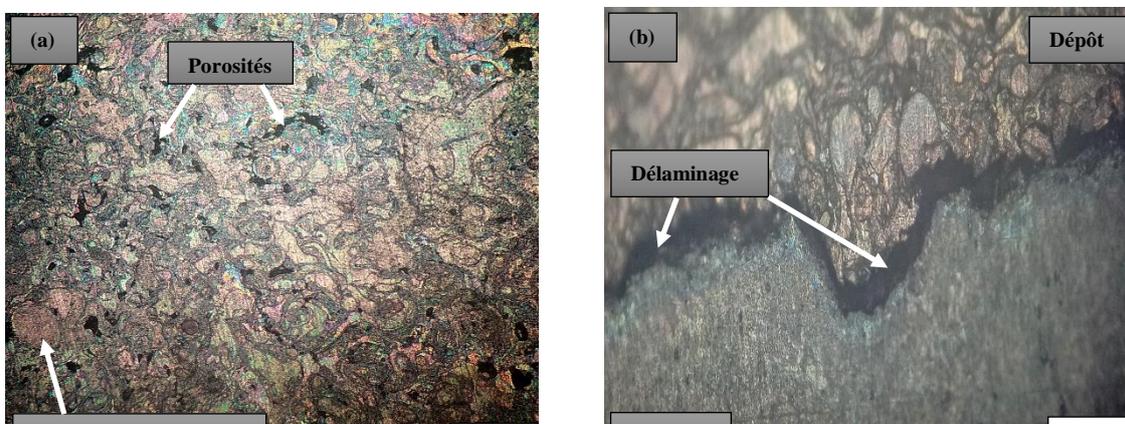


Figure IV. 2: morphologie du dépôt en acier inoxydable au Cr-Ni-Mn observées au microscope réalisé par le procédé arc-électrique

IV.3. Perte de masse relative des différents échantillons

Dans ce qui suit, on illustrera la perte de masse relative sous forme d'histogrammes et de courbes pour les dépôts réalisés avec le procédé de l'arc électrique, pour les charges suivantes (5, 10, 20 et 40N) et à deux vitesses de glissement de 0,5 m/s et 1 m/s pour voir l'influence de celles-ci.

IV.3.1. Perte de masse relative de l'acier avec revêtement et substrat à la vitesse de glissement de 0,5m/s

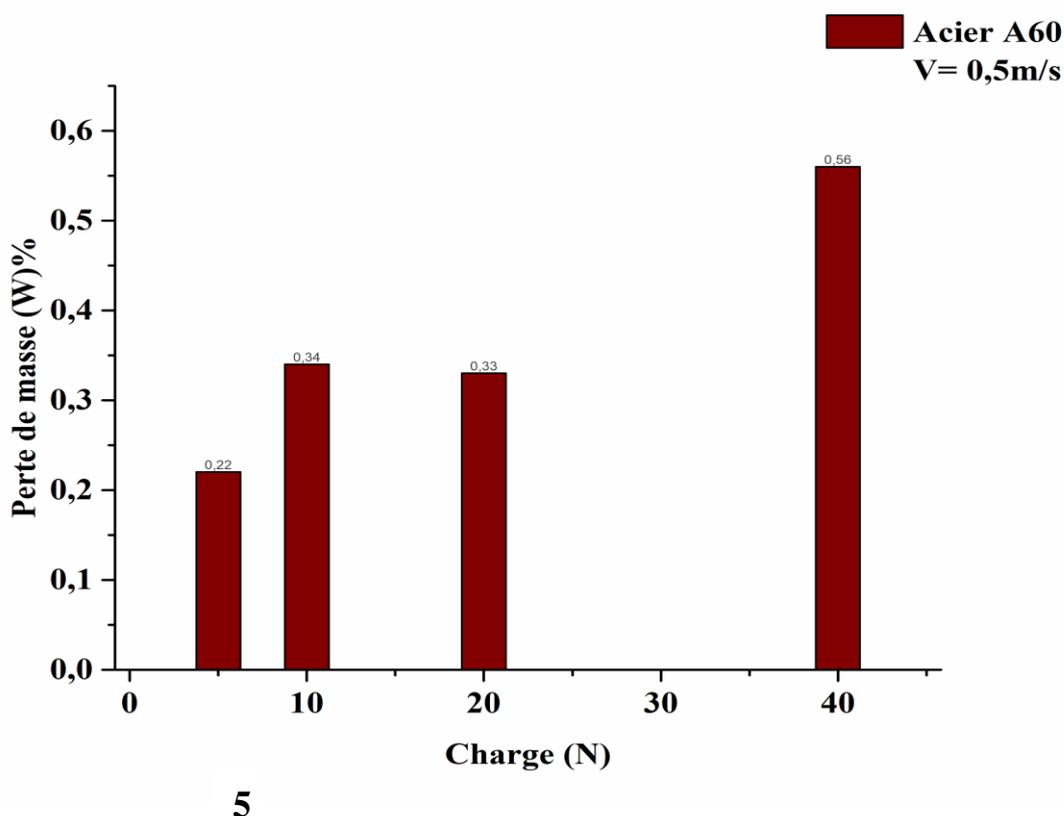


Figure IV. 3: Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée, pour des échantillons d'acier A60 à une vitesse de glissement de 0,5m/s

- ✓ On remarque que la perte de masse relative du substrat sous une charge de 40 N est la plus importante qui est évalué a 0.56 %.
- ✓ On remarque que la perte de masse relative pour les charges 5, 10 et 20 N est faible par rapport à la perte de masse relative obtenue pour la charge de 40N.

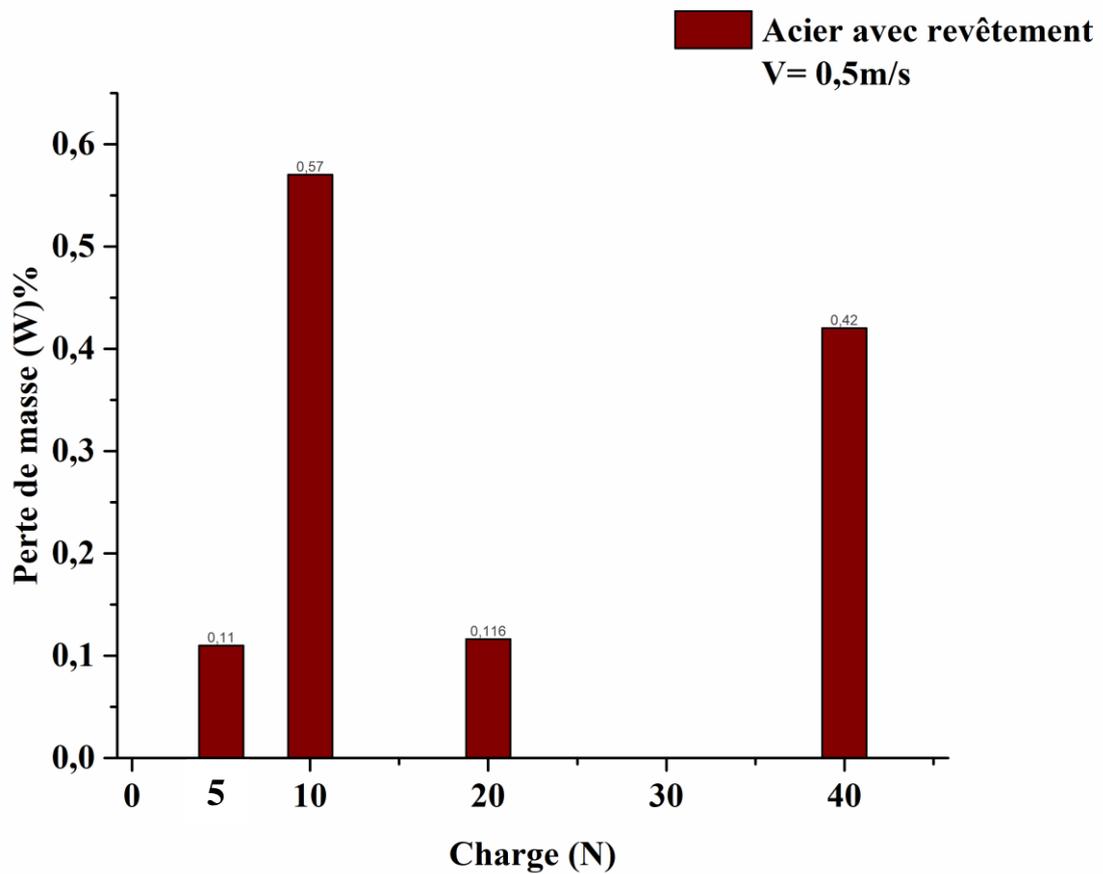


Figure IV. 4: Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée, pour des échantillons revêtus à une vitesse de glissement de 0,5m/s

✓ Pour la charge 5 N la perte de masse relative des dépôts réalisés est de 0.11%, on remarque une évolution de celle-ci avec l'augmentation de la charge qui est de 0.57% pour 10N.

✓ On remarque une diminution brusque de la perte de masse relative qui atteint la valeur de 0.116 % pour une charge normale de 20 N.

✓ Une perte de masse de 0.42% est obtenue sous une charge de 40 N.

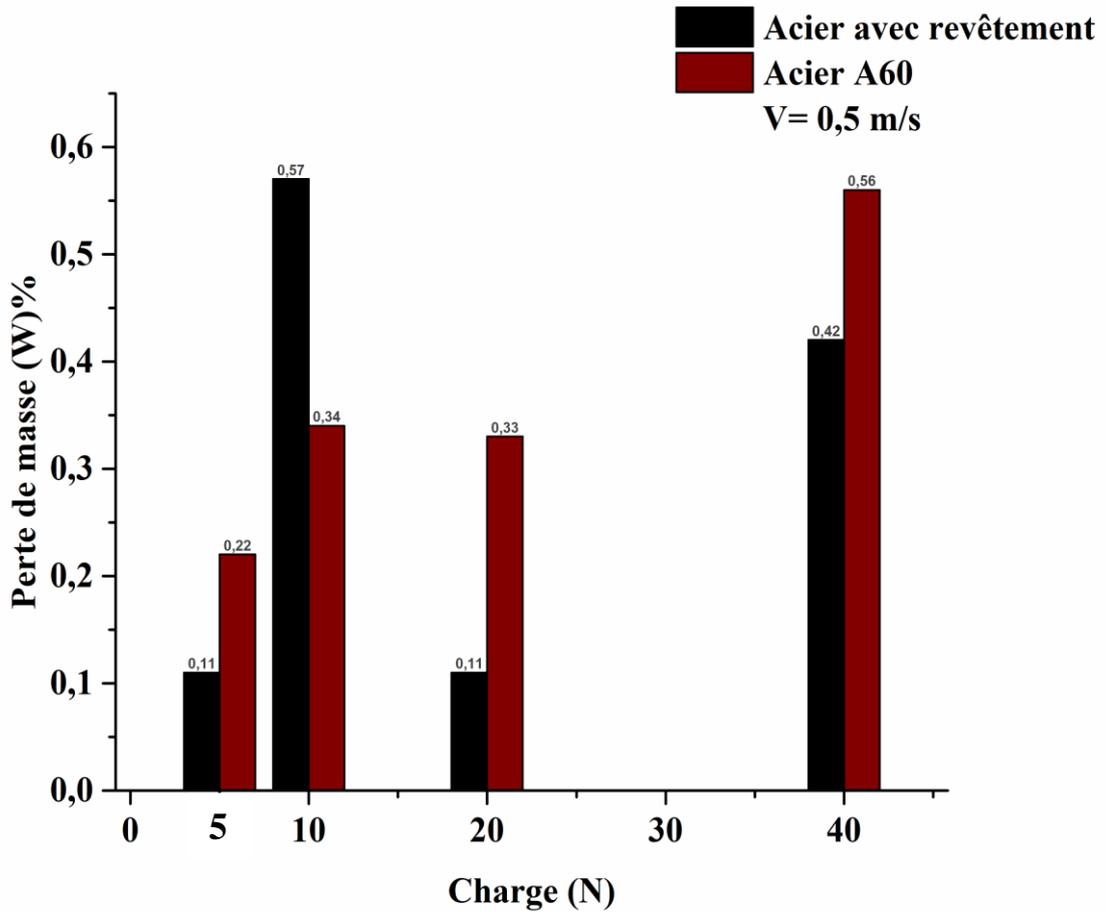


Figure IV. 5 études comparatives de perte de masse relative en fonction de la charge appliquée, pour des échantillons substrats et autres revêtus à une vitesse de glissement de 0,5m/s pour une durée de 30min

- ✓ On remarque que pour la charge 10 N la perte de masse relative pour l'échantillon revêtu est élevée par rapport à l'acier A60, par contre elle est faible et pratiquement constante pour les charges 5 et 20 N.
- ✓ Pour une charge de 40N la perte de masse relative est considérable par rapport à l'échantillon revêtu. Ceci est dû probablement à l'apparition de la phase homogène telle que les phases intermétalliques et les carbures type Mo_2C et Fe_5C_2

IV.3.2. Perte de masse relative des différents dépôts réalisés à la vitesse de glissement de 1 m/s

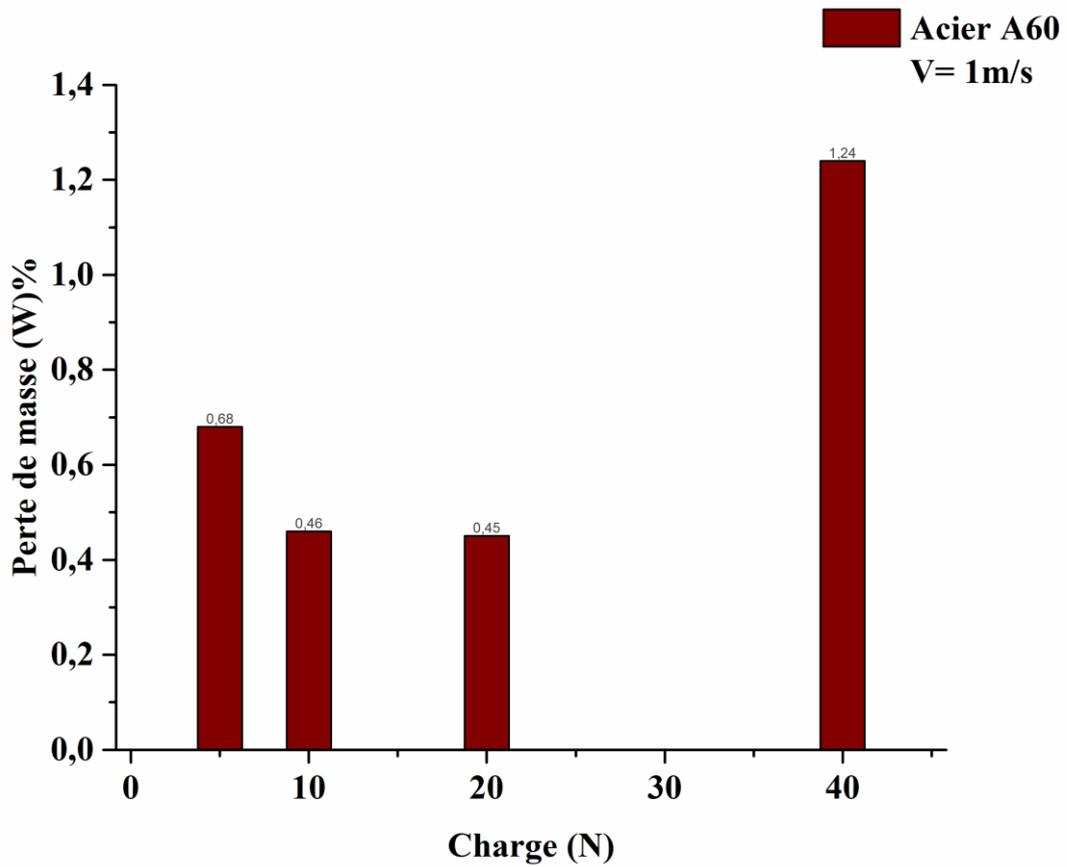


Figure IV. 6: Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée, pour des échantillons d'acier A60 à une vitesse de glissement de 1 m/s

On remarque dans cette figure qu'aux charges 10 et 20 N la perte de masse relative est pratiquement la même, et elle est légèrement supérieure pour une charge de 5 N qui est de 0.68%, enfin à 40 N la perte de masse est considérablement plus élevée par rapport ou autres alors elle atteint les 1.24%.

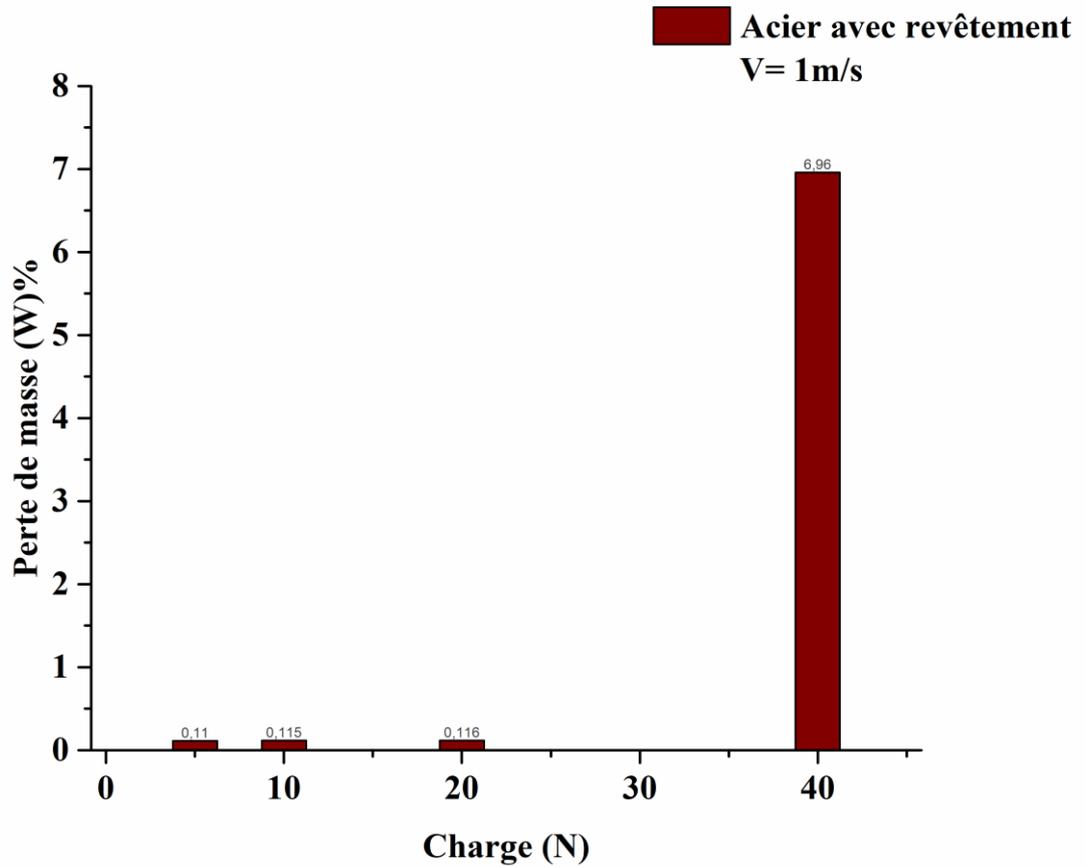


Figure IV. 7 : Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée, pour des échantillons revêtus à une vitesse de glissement de 1 m/s

On remarque pour les charge 5, 10, et 20 N la perte de masse qui s'évalue entre 0.11 et 0.16%, ces valeurs sont négligeables par rapport a une perte de masse de 6.96% pour la charge de 40N

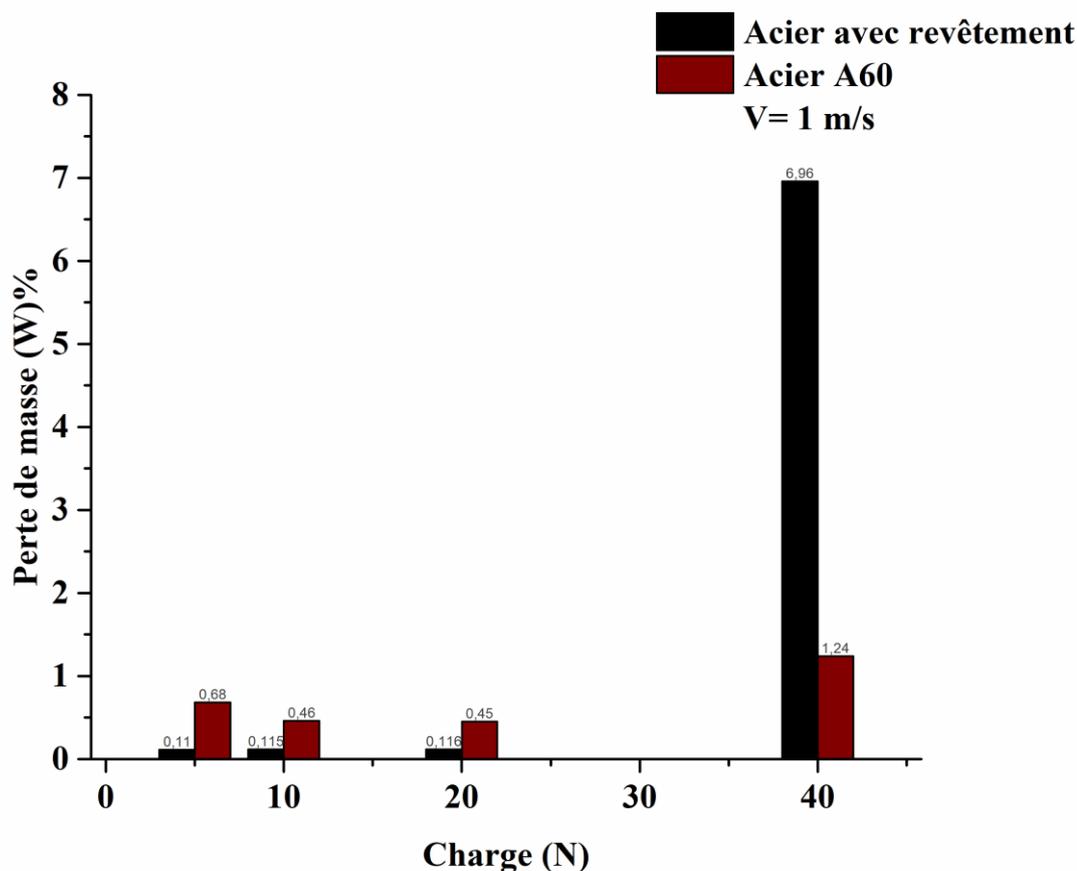


Figure IV. 8 Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée, pour des échantillons du réglage 5 (flamme réductrice) à une vitesse de glissement de 1 m/s

✓ Pour les charges 5, 10, et 20 N la perte de masse relative pour les échantillons revêtus est faible (0.11%, 0.15% et 0.16% respectivement) par rapport ou échantillons A60 (0.68%, 0.46% et 0.45%),

✓ D'autre part la perte de masse pour l'acier revêtu est très importante vis à vis de l'acier A60 elle est de (6.96%) pour une charge de 40N. Ceci est dû au phénomène de délaminage observé tout le long de l'interface substrat/dépôt, et faible pour ce dernier même avec une charge considérable qui est de 40N.

IV.4. Mesures de la température de contact vitesse de glissement 0.5m/s

Les mesures de l'évolution de la température dans les pions ont permis d'avoir une estimation du flux thermique dans le pion notamment la distribution du champ de température dans tout

le domaine géométrique et particulièrement au point de contact. La figure illustre la variation de la température de contact en fonction de la charge.

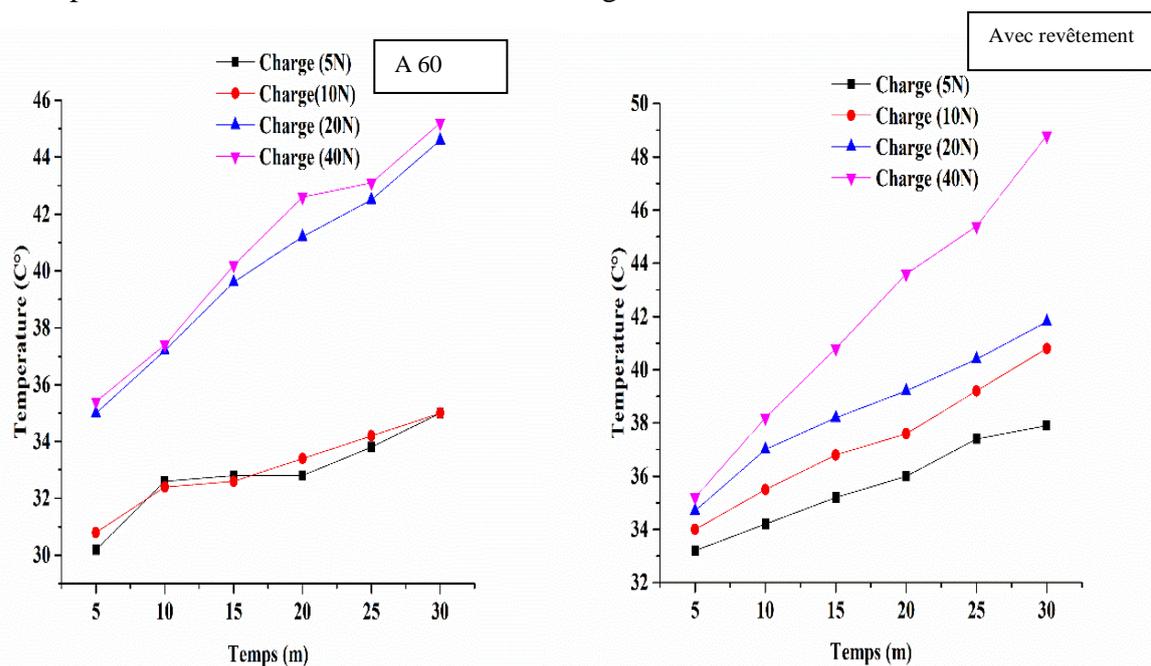


Figure IV. 9 : Evaluation comparative l'évolution de la température en fonction de la charge appliquée, pour une vitesse de glissement de 0,5 m/s pour deux pion un avec revêtement est un sans revêtement

En appliquant différentes charges (5, 10, 20 et 40 N) sur les différents pions, On note une évolution parallèle dans l'augmentation de la température à la surface de ces dernier La première partie des deux courbes de (5 à 10N) correspond à la phase d'accommodation des surfaces du disque et du pion lorsque le contact s'établit et au-delà de 10N, la température de contact augmente progressivement jusqu'à une valeur de 46°C pour des charges de 20N et de 40N. Ceci est dû au contact de frottement qui génère une enthalpie locale. En général, pour toutes les conditions allant de 33°C obtenue à la charge 5N, et atteignant 49,6°C pour une charge de 40N pour un acier revêtu et elle est de de 45°C pour un acier sans revêtement.

IV.5. Mesures de la température de contact vitesse de glissement 1 m/s

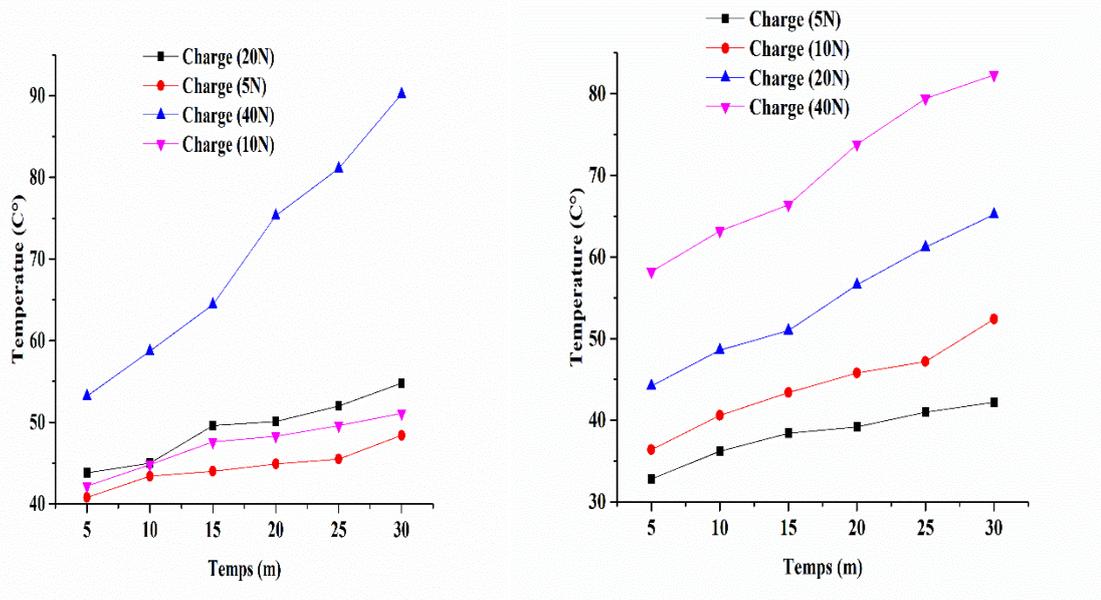


Figure IV. 10 Evaluation comparative l'évolution de la température en fonction de la charge appliquée, pour une vitesse de glissement de 1m/s pour deux pion un avec revêtement est un sans revêtement

- ✓ En appliquant différentes charges (5, 10, 20 et 40 N) sur les différents pions , On note une évolution considérables dans l'augmentation de la température à la surface des pions allant de 39,1°C mesurée au niveau du pion sans revêtement , obtenue à la charge 5N, et atteignant 80°C pour une charge de 40N.
- ✓ De même pour les pions avec les revêtements on note une évolution de températures mais un peu plus basse part rapport au pions sans revêtements sauf pour la charge de 40N on a une températures très importantes qui va aux alentours de 90°C

IV.6. Métallographie des dépôts après le test d'usure

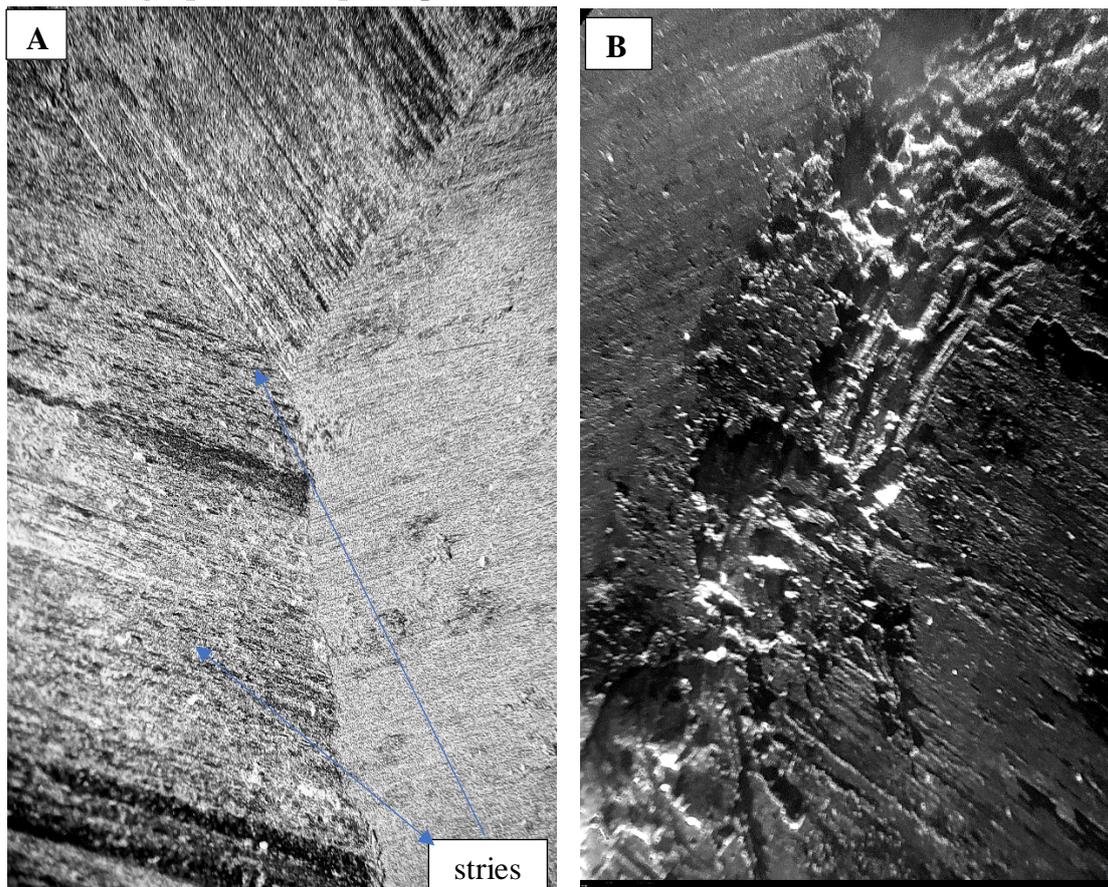


Figure IV. 11 : Observation des traces d'usures au microscope optique traiter avec imageJ.echantillon (A) acier au Cr-Ni-Mn. (B) sans revêtement.

La figure IV.10 illustre les micrographies des différents échantillons après usure pour une vitesse de glissements de 1m/s et une charge de 40N. D'après les observations microscopiques on constate bien les traces d'usure sur le substrat et le dépôts. Pour la figure (A) qui représente celle de l'acier A60 on remarque plein de stries qui sont très fines. On remarque la même chose pour la figure (B) qui représente les traces d'usure pour le dépôt en acier au Cr-Ni-Mn sauf que pour ce cas les stries sont plus larges que ceux observés dans la figure (A). Comme conclusion, on peut dire que l'acier A60 résiste mieux à l'usure que le dépôt en acier au Cr-Ni-Mn car le revêtement observée au microscopes présentes de fortes zone de perte de masse et de large trace d'usure

Conclusion générale

Conclusion générale

Le procédé de projection thermique fait désormais partie de la technologie de traitement de surface à sec. Il regroupe une série de procédés utilisés pour produire des revêtements épais (généralement dix à une centaine) de propriétés diverses de la pièce à revêtir.

Les deux principaux domaines d'application de ces procédés sont le frottement et l'usure. Pour ces derniers, l'application la plus importante consiste à éviter l'usure.

Ce type d'usure peut provoquer un déplacement de matière sur la surface en contact avec des particules abrasives ou des saillies dures provenant d'une autre surface en regard. Il permet de limiter les frottements en protégeant la surface de la pièce avec un revêtement. Le revêtement doit avoir une microstructure adaptée au type de contact.

Le matériau abrasif utilisé, avec une dureté élevée et une bonne adhérence au substrat. Pour les dépôts à microstructures stratifiées réalisés par projection thermique, cette cohésion nécessite une très bonne qualité de contact et "une certaine" uniformité entre les couches. Ce dernier doit se rendre compte que le dépôt peut être poreux et pour les dépôts métalliques qui contiennent très peu d'oxyde.

En effet, si la présence d'oxydes dans le dépôt provoque généralement une augmentation de sa dureté, elle provoquera également sa fragilisation, car les paillettes oxydées sont généralement peu nombreuses ou mal liées les unes aux autres.

Notre recherche vise à souligner l'influence des paramètres de projection d'un dépôts d'acier inoxydable produits par le procédé à l'arc sur l'acier de construction mécanique (E335). Le but est de déterminer l'évolution de la température pendant la période de service de 30 minutes pour différentes vitesses de glissement. Évaluation de la résistance à l'usure (Perte de qualité relative en fonction de la charge)

A partir des résultats obtenus et de leur interprétation, les conclusions suivantes peuvent être tirées : La résistance à l'usure de l'acier inoxydable revêtue est pire que celle de l'acier A 60, donc l'acier revêtue avec le (Cr Ni MN) est plus dur que l'acier A60 d'après les faciales observées sur le microscope optique

Les observations au microscope optique montrent que des fissures moyennes se forment sous des charges légèrement plus élevées et faibles, des fissures radiales secondaires se forment sous

des charges plus élevées et des fissures transversales se forment finalement, ce qui conduit à une fragmentation du matériau sous des charges élevées.

Références Bibliographiques

- [1] Vuoristo P. Thermal Spray Coating Processes. *Compr. Mater. Process.*, Elsevier; 2014, p. 229–76. doi:10.1016/B978-0-08-096532-1.00407-6.
- [2] The Current Status of Thermal Spraying in Asia n.d. doi:10.1007/s11666-0089154-8.
- [3] ASM International. Handbook Committee. *ASM handbook*. n.d [4] Liu S, Zheng X, Geng G. Dry sliding wear behavior and corrosion resistance of NiCrBSi coating deposited by activated combustion-high velocity air fuel spray process. *Mater Des* 2010;31:913–7. doi:10.1016/j.matdes.2009.07.034.
- [5] Berger L-M. Application of hardmetals as thermal spray coatings. *Int J Refract Met Hard Mater* 2015;49:350–64. doi:10.1016/j.ijrmhm.2014.09.029.
- [6] <http://www.tcpp.fr/html/projectionthermique.htm>, consulté le 15 Juillet, 2015.
- [7] Schoop M.U., “Improvements in or connected with the coating of surface with metal, applicable also for soldering or uniting metals and other materials.” United Kingdom Patent office 5,712 A.D. 1910, and JTST, Vol. 10, No 1, march 2001
- [8] Historical Patent #1 “Method of electric-arc heating and apparatus therefore specification forming part of letters” Patent No 641,767 January 23, 1900 and JTST Vol 5, No 3, september 1996
- [9] Schoop M.U., “Apparatus for spraying molten metal and other fusible substances.” Application filed February 19, 1914 and US Patent 1,133,507 Patented Mar, 1915.
- [10] Muehlberger E., “Method and apparatus for effecting high-energy dynamic coating of substrates”, US Patent 3,839,618 oct.1, 1974.
- [11] Muehlberger E., “A high energy plasma coating process”, Welding Institute, 7-th International Metal Sparying Conference, 1974, pp 245-256.
- [12] Fauchais PL, Heberlein JVR, Boulos MI. Overview of Thermal Spray. *Therm. Spray Fundam.*, Boston, MA: Springer US; 2014, p. 17–72. doi:10.1007/978-0387-68991-3_2.
- [13] TCPP, thermal spraying n.d. <http://www.tcpp.fr/html/thermalspraying2009.html> (accessed August 25, 2017).
- [14] Verdy C., “Structures multicouches mises en forme par projection thermique: élaboration, caractérisation et applications”, Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Sévenans, 1998.

-
- [15] Moreau C., Cielo P., Lamontagne M., "Flattening and solidification of thermally sprayed particles", Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 1, No. 4, 1992, pp. 317-323.
- [16] Bolot R., Sokolov D., Klein D., Coddet C., "Nozzle developments for thermal spraying at very low pressure", Journal of thermal spray Technology, Vol.15, No.4, 2006, pp827-833.
- [17] Kubel, E.D., Thermal Spray Technology: from Art to Science. Advance Materials and Processes 132, 1987. 6: p. 69-75.
- [18] M. Vardelle, S. Bansard, P. Fauchais, C. Bossoutrot, F. Braillard, Laboratoire Sciences des Procédés et de Traitements de Surfaces (SPCTS), UMR-CNRS 6638. Journée scientifique barrière thermique ONERA 23 mai 2002. Limoges, France.
- [19] R. Gheriani, Influence de la proportion de phases dans le domaine de températures (400°C-1000°C) sur des films de Ti et de Cr, déposés sur des substrats aciers, Thèse de doctorat, Université de Constantine (2005).
- [20] M.A. Bradai, N. Bounar, A. Benabbas et A. Ati, "Study of microstructure, phases and micro hardness of metallic coatings deposited by flame thermal spray", Journal of Materials Process Technology, (2008) Vol.200, pp.410-415.
- [21] Ph. Demarecaux, Adhérences et propriétés tribologiques de revêtements obtenus par projection thermique hypersonique : Applicabilité des revêtements de carbures de chrome aux disques de freins, Thèses de doctorat, Université de sciences et technologies de Lille (1995).
- [22] M. Khalid Fataouiz, "Développement de modèles thermomécaniques de construction de dépôts obtenus par projection thermique", Thèse de Doctorat, Université Chouaib Doukkali EL-Jadida (Maroc), décembre (2007).
- [23] Gérald Zambelli, Léo Vincent, Matériaux et contacts, presse polytechniques et universitaire romandes CH-1015 lausanne, 1998.
- [24] Kane Malal, contribution à l'étude de l'influence de la rugosité et des effets non newtoniens dans les contacts sévères lubrifiés, institut national des sciences appliquées de Lyon 2003.
- [25] M. Bourebia (2010). Influence des procédés d'usinage sur les rugosités de surface et leurs répercussions sur un contact mécanique, mémoire de magistère, Département de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar, Annaba.
- [26] Lacheze Vladimir, DAS, Noël, (2015). Les Frottements secs et visqueux.

[41] Gérald Zambelli, Léo Vencent (1998).Matériaux et contact, Une approche tribologique,

Annexe II : Perte de masse relative en fonction de la charge appliquée

Tableau I : Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée, à une durée de 30min pour L'acier A60 V= 0,5 m/s.

La charge (N)	Masse initiale m_0 (g)	Masse finale m_f (g)	Δm (g)	$(\Delta m/m_0)*100$ (%)
5	8,80	8,78	/	0,227
10	8,97	8,93	/	0,345
20	9,86	9,85	/	0,336
40	9,96	9,84	/	0,562

Tableau II: Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée, à une durée de 30min pour l'acier A60 avec revêtement à V= 0,5 m/s.

La charge (N)	Masse initiale m_0 (g)	Masse finale m_f (g)	Δm (g)	$(\Delta m/m_0)*100$ (%)
5	8,82	8,79	0,03	0,110
10	8,93	8,89	0,04	0,574
20	9,85	9,84	0,01	0,116
40	9,84	9,82	0,02	0,42

Tableau III: Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée, à une durée de 30min pour l'acier A60 à V= 1 m/s.

La charge (N)	Masse initiale m_0 (g)	Masse finale m_f (g)	Δm (g)	$(\Delta m/m_0)*100$ (%)
5	9,02	9,00	/	0,683
10	8,71	8,65	/	0,461
20	8,61	8,59	/	0,450
40	9,52	8,82	/	1,240

Tableau IV: Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée, à une durée de 30min pour l'acier avec revêtement à V= 1 m/s.

La charge (N)	Masse initiale m_0 (g)	Masse finale m_f (g)	Δm (g)	$(\Delta m/m_0)*100$ (%)
5	8,80	8,72	\	0,110
10	8,69	8,62	\	0,115
20	9,91	9,84	\	0,116
40	9,89	9,73	\	1,96

Résumé

La projection thermique est une technique centenaire qui se répand de plus en plus dans les industries avec des niveaux d'exigences de plus en plus sévères, Le procédé arc-électrique est envisagé pour réaliser un revêtement avec d'excellentes propriétés mécanique.

L'objectif de ce mémoire est de faire une étude comparative d'un revêtement fait à base de chrome. Ces dépôts ont été réalisés sur un substrat en acier de nuance E335. Les dépôts ont été soumis à un test tribologique de type « pion-disque », accompagné d'observation des faciès d'usures au microscope optique. Afin de quantifier les pertes de masse relative et en déduire les mécanismes d'usures régissant la détérioration de ces dépôts.

Mots clés : Projection thermique, perte de masse. microscope optique .

Résumé en Anglais

Thermal spraying is a century-old technique that is spreading more and more in industries with increasingly stringent requirements, The arc-electric process is envisaged to achieve a coating with excellent mechanical properties.

The objective of this thesis is to make a comparative study of a coating made from chromium. These deposits were made on a steel substrate of grade E335. The deposits were subjected to a tribological test of the "pion-disc" type, accompanied by observation of the wear facies under an optical microscope. In order to quantify the relative mass losses and deduce the wear mechanisms governing the deterioration of these deposits.

Keywords : Thermal projection, mass loss. optical microscope .