

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 :

BOUNEKTA FARES

SOUALMI MOHAND-AMEZIANE

Thème

Etude tribologique et thermique d'un contact glissant entre dépôt à base de Nickel réalisé par projection thermique et disque en acier

Soutenu le 26/06/ 2018 devant le jury composé de:

Dr.	Sadeddine A	Président
Dr.	Younes R.	Rapporteur
Pr.	Bradai M-A	Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2017-2018

Remerciements

Remerciements

« Certes, il y'a des travaux pénibles ;
mais la joie de la réussite n'a-t-elle pas à
compenser nos douleurs ? »

Jean de la bruyère.

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu qui nous a donné la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail.

Nos vifs remerciements sont destinés à Mr R.YOUNES, notre promoteur, pour son aide, ses critiques constructives, ses explications et suggestions pertinentes et pour la qualité de ses orientations tout au long de ce travail et pour avoir apporté tant de soins à la réalisation de ce mémoire.

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

Nous remercions également les membres de jury qui nous font honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail.

Sans oublier l'équipe du hall de technologie de l'université de Bejaia.

Que tous ceux qui ont contribué à notre formation trouvent ici l'expression de nos sincères gratitude.

Enfin, un merci particulier à tous ceux qui nous ont apporté leur soutien.

Dédicace

Dédicaces

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

Je dédie ce mémoire :

A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.

- ✓ A mon cher frère.*
- ✓ A mes chères sœurs.*
- ✓ A mes oncles et tantes.*
- ✓ A mes cousins et cousines.*
- ✓ A mes meilleurs amis et à tous ceux qui me sont chère.*

A la mémoire de ma grand-mère

SOUALMI Md-Ameziane.

Dédicaces

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

Je dédie ce mémoire :

A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.

- ✓ A mes parents.*
- ✓ A mes frères.*
- ✓ A toutes ma famille.*
- ✓ A tous mes amis.*

BOUNEKTA Fares.

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Analyse du substrat par la fluorescence des rayons X	34
Tableau II.2 : Composition et caractéristique de ProXon21021 (P21).	35
Tableau II.3 : Composition et caractéristique de ProXon21031 (P31).	35
Tableau II.4 : Paramètres de projection utilisé.....	37

*Liste des
figures*

Liste des figures

Figure I.1 : Représentation schématique de la technique de projection thermique.....	4
Figure I.2 : Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre.....	6
Figure I.3 : Schéma de principe d'une projection flamme-fil.....	6
Figure I.4 : Schéma de principe d'une torche à plasma d'arc.....	7
Figure I.5 : Schéma de principe d'une projection HVOF/HVAF.....	8
Figure I.6 : Schéma de principe d'un dispositif de projection à arc électrique.....	9
Figure I.7 : Schéma de principe du remplissage d'un fil fourré.....	11
Figure I.8 : Schéma de principe d'une construction du dépôt par projection thermique.....	17
Figure I.9 : Nécessité d'une force F pour produire le mouvement.....	19
Figure I.10 : Représentation schématique des éléments d'un système tribologique.....	21
Figure I.11 : Mécanismes d'usure fondamentaux.....	21
Figure I.12 : Classement des processus d'usure en fonction du mouvement des corps mis en jeu.....	22
Figure I.13 : étapes du problème de contact thermique.....	27
Figure I.14 : caractérisation de la surface.....	28
Figure I.15 : Carte de température obtenue pour un contact pion (Acier)-disque (Acier).....	29
Figure I.16 : Définition de la résistance thermique de contact.....	30
Figure I.17 : Schéma du modèle d'interface M1.....	31
Figure II.1 : Echantillon utilisé pour la projection.....	36
Figure II.2 : Pistolet flamme-poudre.....	38
Figure II.3 : Dispositif d'usure.....	38
Figure II.4 : Microscope Métallographique.....	39
Figure II.5 : Représentation du dispositif d'usure utilisé.....	40
Figure II.6 : Thermomètre Laser.....	41
Figure II.7 : balance analytique.....	42
Figure III.1 : Microstructure des dépôts issus de la poudre 21021.....	43
Figure III.2 : Microstructure des dépôts issus de la poudre 21031.....	44
Figure III.3 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction du temps à 5 (N).....	45
Figure III.4 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction du temps à 30 (N).....	45
Figure III.5 : courbe comparative d'évolution de la perte de masse en fonction du temps sous deux charges 5 (N), 30 (N).....	45
Figure III.6 : courbe d'évaluation de la température en fonction de temps à 5 (N).....	46
Figure III.7 : courbe d'évaluation de la température en fonction de temps à 30 (N).....	46
Figure III.8 : courbe comparative d'évolution de la température en fonction du temps sous deux charges 5 (N), 30 (N).....	47
Figure III.9 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction du temps à 30 (N).....	48
Figure III.10 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction du temps à 5 (N).....	48
Figure III.11 : courbe comparative de l'évolution de la perte de masse en fonction du temps sous deux charges 5 (N), 30 (N).....	48
Figure III.12 : courbe d'évaluation de température en fonction de temps à 5 (N).....	49
Figure III.13 : courbe d'évolution de la température en fonction du temps à 30 (N).....	49
Figure III.14 : courbe comparative d'évolution de la température en fonction du temps sous deux charges 5 (N), 30 (N).....	49
Figure III.15 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction de la charge à 0,5 (m/s).....	50
Figure III.16 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction de la charge à 1(m/s).....	50
Figure III.17 : courbe comparative d'évolution de la perte de masse en fonction de la charge avec deux vitesses 0,5 (m/s) et 1 (m/s).....	51
Figure III.18 : courbe d'évolution de la température en fonction de la charge à 0,5 (m/s).....	51
Figure III.19 : courbe d'évolution de la température en fonction de la charge 1 (m/s).....	51
Figure III.20 : courbe comparative d'évolution de la température en fonction de la charge appliquée à des vitesses 0,5 (m/s), 1 (m/s).....	52
Figure III.21 : Traces d'usure des surfaces des différents échantillons obtenue après le test tribologique : a) 0.5 (m/s), b) 1(m/s), c) différentes charges appliquées.....	53
Figure III.22 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction du temps à 5 (N).....	53
Figure III.23 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction du temps à 30 (N).....	54

Liste des figures

Figure III.24 : courbe comparative d'évolution de la perte de masse relative en fonction du temps sous deux charges 5 (N), 30 (N).....	54
Figure III.25 : courbe d'évaluation de la température en fonction de temps à 5 (N).....	55
Figure III.26 : courbe d'évaluation de la température fonction de temps à 30 (N).	55
Figure III.27 : courbe comparative de l'évaluation de la température au cours du temps, sous deux charges 5 (N) et 30 (N) à 0,5 (m/s).....	55
Figure III.28 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction du temps à 5 (N).	56
Figure III.29 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction du temps à 30 (N).....	56
Figure III.30 : courbe comparative d'évolution de la perte de masse relative en fonction du temps sous deux charges 5 (N), 30 (N).....	56
Figure III.31 : courbe d'évaluation de température en fonction de temps à 5 (N).	57
Figure III.32 : courbe d'évaluation de en fonction de temps à 30 (N).....	57
Figure III.33 : courbe comparative de l'évaluation de la température au cours du temps, sous deux charges 5 (N) et 30 (N) à vitesse de glissement de 1 (m/s).	57
Figure III.34 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction de la charge à 0,5 (m/s).....	58
Figure III.35 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction de la charge à 1(m/s).....	58
Figure III.36 : courbe comparative d'évolution de la perte de masse en fonction de la charge.	58
Figure III.37 : courbe d'évolution de la température en fonction de la charge à 0,5 (m/s).	59
Figure III.38 : courbe d'évolution de la température en fonction de la charge à 1 (m/s).	59
Figure III.39 : courbe comparative d'évolution de la température en fonction de la charge.....	59
Figure III.40 : Traces d'usure des surfaces des différents échantillons obtenue après le test tribologique : a) 0.5 (m/s), b) 1(m/s), c) différentes charges appliquées.....	60
Figure III.41 : évolution de la température des deux dépôts en fonction du temps sous une charge de 5 (N).	61
Figure III.42 : évolution de la température des deux dépôts en fonction du temps sous une charge de 30 (N).	61
Figure III.43 : évolution de la température des deux dépôts en fonction du temps sous une charge de 5 (N).	62
Figure III.44 : évolution de la température des deux dépôts en fonction du temps sous une charge de 30 (N).	62
Figure III.45 : évolution de la température des deux dépôts en fonction la charge à vitesse de glissement 0,5 (m/s).	63
Figure III.46 : évolution de la température des deux dépôts en fonction la charge à vitesse de glissement 1 (m/s).	64

*Table des
matières*

Introduction générale.....1

Chapitre I : Éléments biobibliographiques

I.1. Projection thermique 3

 I.1.1. Introduction..... 3

 I.1.2. Rappel historique, évolution et secteur d'activité du procédé..... 3

 I.1.3. Principe général 4

 I.1.4. Différents types de projection thermique 4

 I.1.4.1. Projection à flamme-poudre 5

 I.1.4.2. Projection par flamme-fil..... 6

 I.1.4.3. Projection plasma..... 7

 I.1.4.4. Projection HVOF/HVAF 8

 I.1.4.5. Projection arc-fil 9

 I.1.5. Paramètres de projection influant sur le dépôt 12

 I.1.6. Préparation des surfaces..... 13

 I.1.6.1. La propreté..... 13

 I.1.6.2. La rugosité 14

 I.1.6.3. Le préchauffage 14

 I.1.7. Modes de préparation..... 15

 I.1.7.1. Le dégraissage 15

 I.1.7.2. Le décapage 15

 I.1.7.3. Le sablage 15

 I.1.8. Formation et caractéristiques du dépôt..... 16

 I.1.8.1. Structure du dépôt..... 16

 I.1.8.2. L'adhérence 17

 I.1.8.3. La dureté 18

 I.1.8.4. La densité..... 18

I.2. L'usure 19

 I.2.1. La tribologie..... 18

Table des Matières

I.2.2. Le frottement.....	19
I.2.3. Les Surfaces	19
I.2.4. Les différents types d'usure	20
I.2.4.1. Usure par adhésion	22
I.2.4.2. Usure tribochimique	22
I.2.4.3. Fatigue de surface	22
I.2.4.4. Usure abrasive	23
I.2.4.5. Paramètres influençant l'usure abrasive.....	23
I.2.4.6. Erosion	24
I.2.4.7. Cavitation.....	25
I.2.5. Règles fondamentales pour atténuer l'usure.....	25
I.2.6. Dépôts résistants à l'usure	26
I.3. Contact glissant ou contact sec	26
I.3.1. Phénomène de frottement	26
I.3.1.1. Le frottement : aspect tribologique.....	26
I.3.1.2. Le Frottement : aspect thermique	27
I.3.2. Passage de la chaleur dans les corps en contact	27
I.3.3. Carte de température et carte d'usure	28
I.3.4. Résistance thermique de contact.....	29
I.3.4.1. Résistance thermique en contact statique	29
I.3.4.2. Modèles classiques de la Résistance Thermique de Contact en régime stationnaire	31
I.3.5. Résistance thermique de contact glissant	32

Chapitre II : Matériaux et Techniques Expérimentales

II. Matériaux et technique expérimentales	34
II.1. Introduction.....	34
II.2. Matériaux utilisé	34
II.2.1. Le substrat.....	34

Table des Matières

II.2.2. Dépôts réalisés	34
II.3. Caractéristique des dépôts	35
II.4. Présentation des échantillons	36
II.4.1. Elaboration des échantillons	36
II.4.2. préparation des surfaces à revêtir	37
II.4.2.1. Dégraissage	37
II.4.2.2. Sablage	37
II.5.1. Paramètre de projection	37
II.5.2. Pistolet utilisé	38
II.6. Observation métallographique	38
II.6.1. Dispositif d'usure	38
II.1.7. Microscope Métallographique	39
II.1.8. Caractérisation microstructurale	40
II.1.9. Caractérisation thermique (test d'usure)	40
II.1.9.1. Principe du test d'usure	40
II.1.9.2. La perte de masse relative	40
II.1.9.3. la température	40
II.1.9.4. Représentation du dispositif d'usure	40
II.1.9.5. Optimisation et réalisation du test d'usure	41

Chapitre III : Résultats et discussions

III. Introduction	43
III.1. Caractérisation microstructurale	43
III.1.1. Microscope électronique à balayage (MEB)	43
III.2. Détermination des paramètres tribologiques et thermiques du dépôt 21021	44
III.2.1. Influence des charges sur le comportement tribologique sous une vitesse de 0.5 (m/s)	44
III.2.2. Influence des charges sur le comportement thermique sous une vitesse de 0,5 (m/s)	46

Table des Matières

III.2.3. Influence des charges sur le comportement tribologique sous une vitesse de 1 (m/s)	47
III.2.4. Influence des charges sur le comportement thermique sous une vitesse de 1 m/s	49
III.2.5. Influence des charges sur le comportement tribologique sous des vitesses différentes 0,5 (m/s), 1 (m/s)	50
III.2.6. Influence des charges sur le comportement thermique sous à des vitesses différentes 0,5 (m/s), 1 (m/s)	51
III.3. Microscopie optique de dépôt 21021	52
III.4. Détermination des paramètres tribologiques et thermiques du dépôt 21031	53
III.4.1 Influence des charges sur le comportement tribologique sous une vitesse de 0.5 (m/s)	53
III.4.2. Influence des charges sur le comportement thermique à une vitesse de 0,5 (m/s)	54
III.4.3. Influence des charges sur le comportement tribologique à une vitesse de 1 (m/s)	56
III.4.4. Influence des charges sur le comportement thermique à une vitesse de 1 (m/s)	57
III.4.5. Influence des charges sur le comportement tribologique sous des vitesses différentes 0,5 (m/s), 1 (m/s)	58
III.4.6. Influence des charges sur le comportement thermique sous des vitesses différentes 0,5 (m/s), 1 (m/s)	59
III.5. Microscopie optique de dépôt 21031	60
III.6. Étude comparative des paramètres thermiques des deux dépôts 21021 21031 en fonctions de la vitesse et de la charge appliquée.....	60
III.6.1. Évolution de la température à vitesse de glissement 0,5 (m/s)	61
III.6.2. Évolution de la température de deux dépôts à une vitesse de glissement 1 (m/s).....	62
III.6.3. Évolution de la température en fonction de la charge à une vitesse 0,5 (m/s).....	63

Table des Matières

Conclusion générale.....	65
Références bibliographiques.....	67
Annexe.....	70

***Introduction
Générale***

Introduction générale

Dans le secteur de l'industrie mécanique, le centre d'intérêts des différents secteurs s'oriente vers des objectifs techniques et économiques qui se résument dans la réduction des coûts l'amélioration de la productivité tout en assurant la performance des produits fabriqués.

Nombreuses sont les sollicitations auxquelles doivent résister les pièces constitutives des machines ou équipements: les sollicitations internes se manifestent à travers les contraintes mécaniques, la fatigue, le fluage,... etc. Le frottement, l'abrasion, la température, l'érosion, le frittage, ... font partie des sollicitations externes. Quant à la corrosion, l'oxydation, l'attaque chimique, la chaleur, sont du rang des sollicitations environnementales.

En revanche l'usure et la surchauffe des pièces sont parmi les causes principales qui touchent le secteur de l'industrie et qui le met hors usage. D'où l'importance capitale d'y remédier.

L'amélioration de la résistance aux frottements et à l'usure des pièces, tant mécaniques que de structure, est en constante croissance depuis plus de 20 ans, elle se justifie notamment par la volonté de réduire les pertes considérables liées aux phénomènes de frottement/usure. Ces phénomènes deviennent par conséquent une source de génération de chaleur qui provoquent une élévation locale de la température au niveau de l'interface des matériaux en contact, et peut par la suite affecter leurs propriétés physiques et mécaniques. Cette augmentation peut également contribuer dans certaines conditions à l'endommagement et à la dégradation de leurs état de surface et modifier la structure superficielle des éléments interfaciaux.

Ce mémoire va donc présenter l'ensemble des travaux qui ont été réalisées en amont sur deux éprouvettes, l'une est le dépôt 21021 et l'autre est le dépôt 21031, en vue d'évaluer l'influence de la vitesse de glissement et la charge imposée sur le comportement tribologique et thermique des deux éprouvettes, puis faire une étude comparative entre les résultats obtenus.

Le premier chapitre, en première partie, est une étude bibliographique permettant de présenter les différents types de projection thermique et l'influence des paramètres de projection sur la qualité des dépôts, et en deuxième partie est une présentation des différents aspects de l'usure et un aperçu sur le contact glissant.

Introduction générale

Le deuxième chapitre décrit la stratégie expérimentale qui concerne l'élaboration des matériaux, les paramètres de projection à respecter, les opérations de préparation de la surface ainsi que les matériaux utilisés, suivi d'un test d'usure qui donne la perte de masse en fonction de la charge. Une analyse microstructurale des dépôts a également été effectuée par microscopie optique.

Le troisième chapitre est consacré aux résultats expérimentaux et leurs interprétations. Les tests d'usure sont présentés sous forme des courbes de perte de masse relative et de température en fonction du temps, de la charge imposée et de la vitesse de glissement.

Enfin, cette étude est clôturée par une conclusion générale, émanant des résultats expérimentaux et des conditions opératoires avec quelques recommandations et perspectives.

Chapitre I :
Eléments
Bibliographiques

I.1. Projection thermique

I.1.1. Introduction

Différentes technologies de dépôt permettent d'apporter un matériau à la surface d'une pièce pour en changer les propriétés de surface.

Parmi les techniques les plus utilisées nous pouvons citer : l'électro dépôt, les dépôts chimiques, l'immersion dans un bain de métal en fusion, les dépôts physiques ou chimiques en phase vapeur et la projection thermique.

L'application de ces dépôts concerne essentiellement la protection contre l'usure et la corrosion, la décoration ou la réalisation de dépôts à propriétés physiques spécifiques (électrique, magnétique, thermique...). [1,2]

I.1.2. Rappel historique, évolution et secteur d'activité du procédé

L'apparition des revêtements par projection thermique date de 1909 avec l'invention de **shoop** portant sur la projection de plomb fondu à l'aide d'un vaporisateur, puis de plomb en poudre à travers une flamme.

Les premières applications industrielles sont apparues en 1914 dans le domaine militaire, dans celui de l'anticorrosion (dépôts d'aluminium), ou encore en décoration (dépôt de bronze). En cette période également, des essais de projection par arc électrique furent réalisés. C'est après la seconde guerre mondiale que le domaine d'application de projection thermique s'est élargi à l'industrie mécanique (apport des revêtements d'acier dans le cadre de rénovation des pièces usagées), puis à l'industrie aéronautique.

Aujourd'hui, les objectifs techniques et économiques des industriels de tous les secteurs vont dans le sens de la réduction des coûts et de 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. [3,4]

I.1.3. Principe général [5, 6,7]

La projection thermique regroupe l'ensemble des procédés dans lesquels un matériau d'apport est fondu ou porté à l'état plastique grâce à une source de chaleur, puis est projeté à l'aide d'un gaz vecteur sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie.

La matière déposée sous forme de poudre, de fil ou baguette est fondue totalement ou partiellement dans la source de chaleur (flamme, arc électrique, plasma).

Ces techniques permettent de projeter une grande gamme de matériaux : métaux et alliages, céramique dans certaines conditions, et des polymères.

Une différence de 300k entre la température de fusion et la température de décomposition ou d'évaporation du matériau est nécessaire pour que le matériau puisse être projeté dans de bonnes conditions.

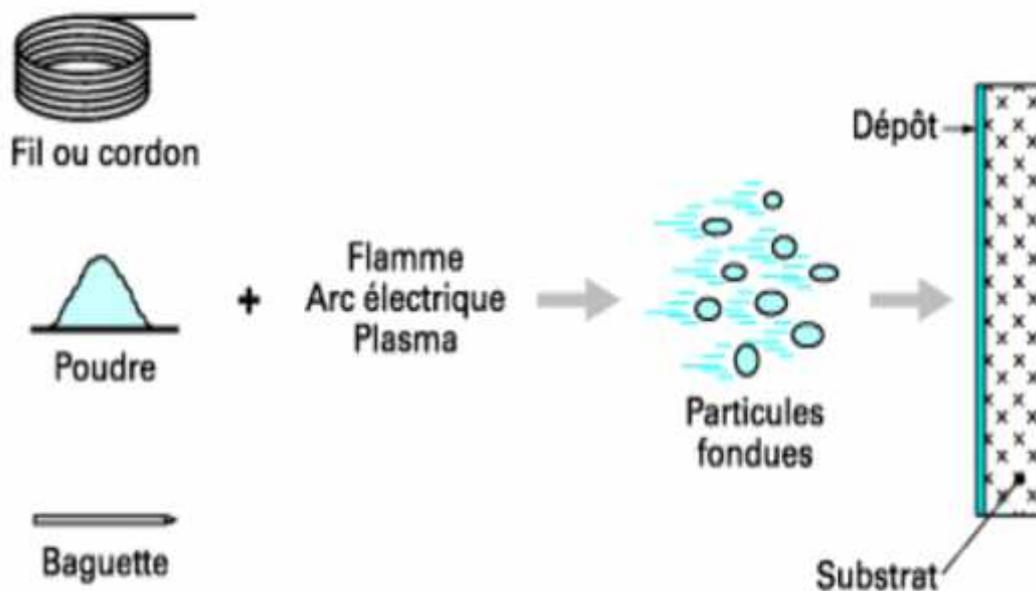


Figure I.1 : Représentation schématique de la technique de projection thermique.

I.1.4. Différents types de projection thermique

Tous les procédés utilisent le même principe : fondre un matériau d'apport, puis le projeter grâce à un gaz vecteur.

Deux types d'énergie sont utilisés comme source de chaleur :

- La flamme;
- L'arc électrique.

I.1.4.1. Projection à flamme-poudre [8]

On désigne généralement sous le nom de projection flamme-poudre (figure I.2) le procédé de projection thermique le plus ancien, consistant à introduire un matériau sous forme de poudre dans une flamme oxy-combustion et à le véhiculer grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion.

On distingue plusieurs types de distribution de la poudre que nous citons ci-dessous :

- **Distributeur par gravité**

Le réservoir à poudre, placé directement au-dessus, ou sur le pistolet. La poudre contenue dans ce récipient tombe par gravité directe au centre du chalumeau, où est entraînée par dépression dans la canalisation de l'un des deux gaz de combustion. Ce procédé est aussi appelé torche à gaz.

- **Distributeur par pression**

Un réservoir fermé, situé à proximité du pistolet, est équipé en partie basse d'un distributeur de poudre alimenté en air comprimé. La poudre est véhiculée jusqu'au pistolet par un tuyau et propulsée sur le substrat par le vecteur d'air comprimé. Le dispositif peut-être complété par un vibreur ou une vis d'Archimède afin d'assurer une plus grande régularité de l'écoulement du produit.

- **Distributeur par dépression**

Le réservoir est muni d'un dispositif à dépression composé d'une cane d'entrée d'air et d'un suceur relié au dispositif d'aspiration. L'effet Giffard, produit par un courant d'air comprimé traversant un système convergent-divergent, permet d'entraîner la poudre jusqu'au pistolet.

- **Distributeur par cyclone**

Le réservoir à poudre est équipé d'un système cyclonique. Le mouvement tourbillonnaire qui met la poudre en suspension, est assuré par un courant d'air, qui permet de véhiculer celle-ci jusqu'au pistolet de projection.

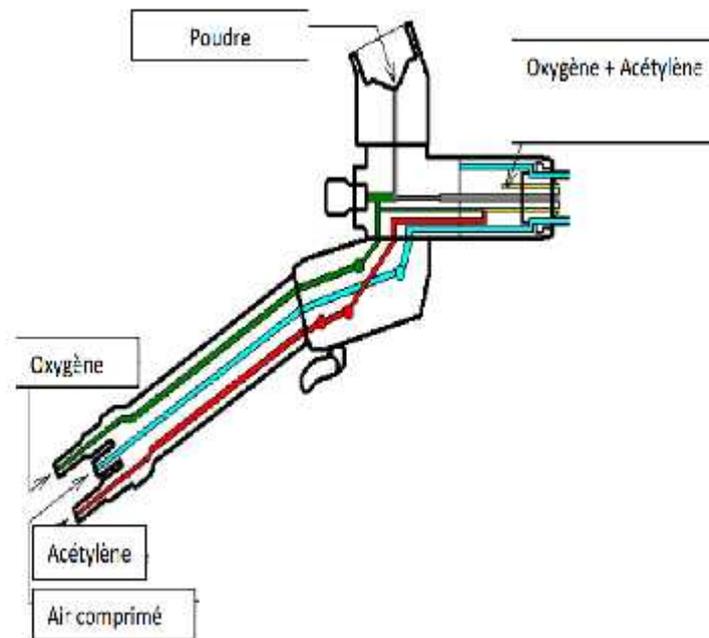


Figure I.2 : Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre.

I.1.4.2. Projection par flamme-fil [9]

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.3) illustre le principe de la projection flamme-fil.

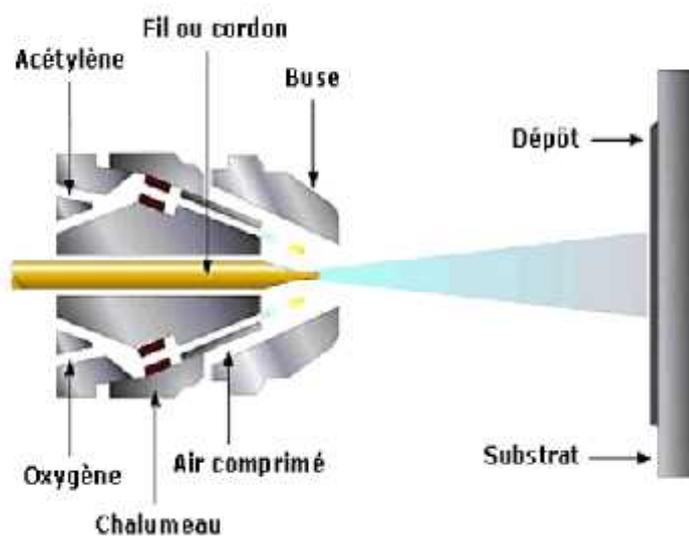


Figure I.3 : Schéma de principe d'une projection flamme-fil.

I.1.4.3. Projection plasma [10]

Un plasma est un gaz ionisé constitué d'électrons libres, d'ions, d'atomes et de molécule dans des excites ou non.

Il est considéré comme le 4^{ème} état de la matière.

Pour générer un plasma, les trois éléments fondamentaux sont :

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

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

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

(Figure I.4).

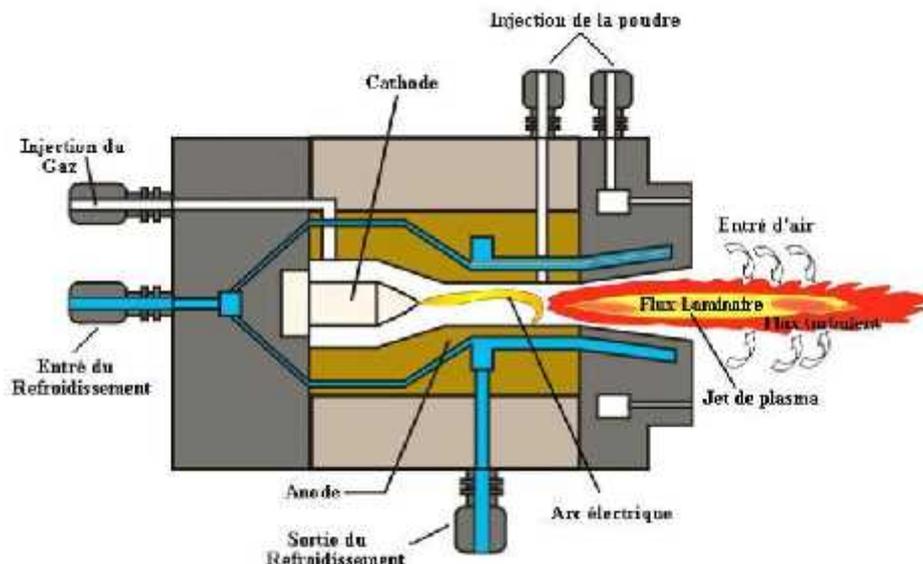


Figure I.4 : Schéma de principe d'une torche à plasma d'arc.

I.1.4.4. Projection HVOF/HVAF [11]

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

- Le procédé **HVOF** : high velocity oxygen fuel;
- Le procédé **HVAF** : high velocity air fuel.

L'HVOF utilise la combustion de deux gaz: d'une part et d'autre par propane, propylène, tétrène 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 seront éjectés du pistolet sous l'effet de la pression élevée (5 à 7 bars).

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.5).

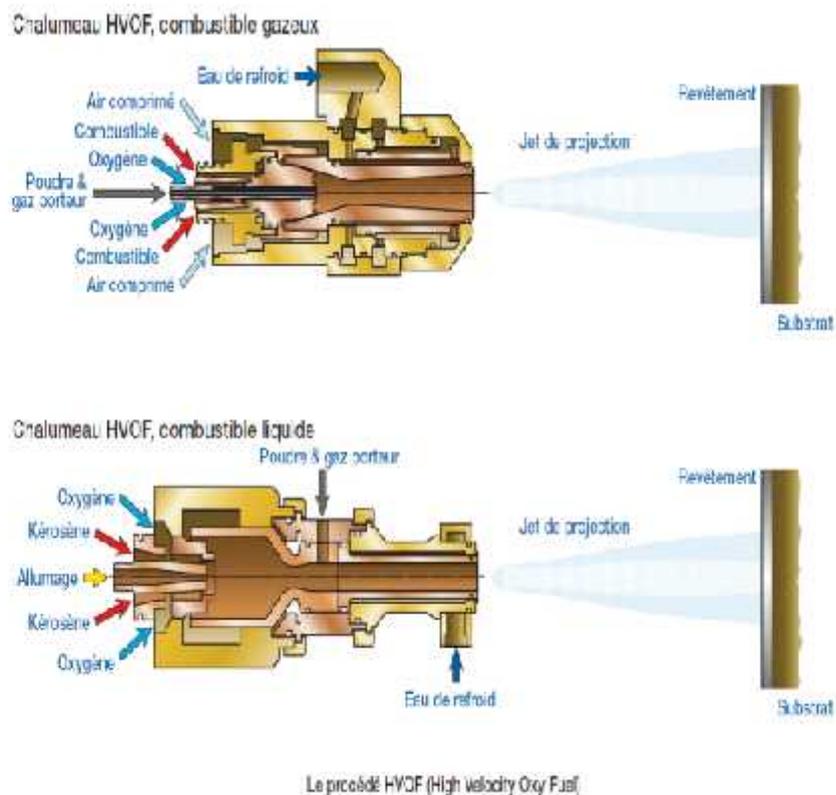


Figure I.5 : Schéma de principe d'une projection HVOF/HVAF.

I.1.4.5. Projection arc-fil

La projection arc-fil est une technique de revêtement de surface relativement économique qui compte de nombreuses applications industrielles.

Elle est utilisée industriellement en Europe depuis 1945. [12,13]

Le principe consiste à faire éclater un arc électrique entre deux fils ductiles consommable, et à atomiser le matériau aussi fondu par un jet de gaz comprimé (généralement de l'air) qui le projette sur le substrat (figure I.6).

Les pistolets à arc électrique sont alimentés par des générateurs à courant continu avec les tensions d'arc comprises entre 25 et 40 V, pour des intensités de courant allant de 100 à 500A.

Ils sont essentiellement constitués de deux parties :

- La première sert à l'entraînement des fils;
- La seconde assure la fusion et la projection du métal fondu.

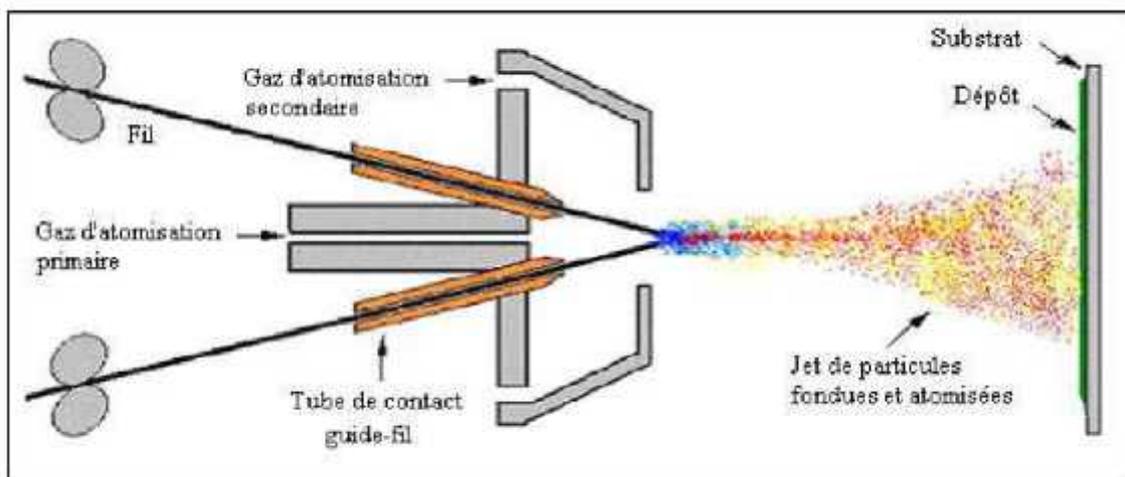


Figure I.6 : Schéma de principe d'un dispositif de projection à arc électrique. [14]

Les fils sont conditionnés en bobines et tirés au travers de gaines souples, par des molettes d'entraînement intégrées au pistolet et mues par des moteurs électriques.

Dans le cas de fils très rigide ou de grandes distances entre le pistolet et les bobines (supérieure à 5 m), il est nécessaire d'adjoindre à l'installation un système d'entraînement des fils par poussée à l'entrée des gaines.

Ce type d'équipement est communément appelé << pousse-tire >>.

A l'intérieur du pistolet, les fils sont guidés par deux tubes permettant d'une part le positionnement du fil avant son entrée dans la zone de fusion et d'autre part, la transmission du courant électrique aux fils.

Une buse située derrière le point d'intersection des fils, dirige un flux de gaz comprimé à grande vitesse sur l'extrémité des fils en fusion, et propulse le matériau atomisé sur le substrat.

La température de l'arc, d'environ 6000 (K) dans l'air pression ambiante, est largement au-dessus du point de fusion des matériaux projetés, ce qui entraîne une vaporisation relativement importante et un chauffage excessif des gouttelettes. Cependant, ce dernier peut aider à créer des zones d'interaction métallurgique dans le dépôt ou à l'interface dépôt substrat et des zones de diffusion améliorant, ainsi, sensiblement l'adhérence et la cohésion des dépôts.

L'avance des fils à vitesse constante permet la projection continue avec des débits de matière élevés, ceci en dépit du caractère discontinu qu'induit la création et l'extinction de l'arc électrique lors de la formation et l'atomisation des gouttelettes de matériau fondu.

I.1.4.5.1 Avantages et inconvénients de la projection arc-fil [8]

Avantages :

La puissance électrique est de l'ordre de 5 à 10 KW et le gaz utilisé comme gaz d'atomisation est généralement de l'air comprimé, le taux de dépôt est élevé et le rendement énergétique important : 60 à 70 % de la puissance électrique fournie est utilisée pour fondre les fils avec un fil plein, le matériau projeté est complètement fondu, il n'est généralement pas nécessaire de refroidir le substrat.

Inconvénients

- Un jet de particules divergeant qui se traduit par une tâche d'impact sur le substrat relativement large.
- Des dépôts présentant une porosité et une teneur en oxyde élevées par rapport aux dépôts obtenus avec les autres techniques de projection thermique;
- Une perte de composants les plus volatils du fait de température de l'extrémité des fils très fins au-delà de la température de fusion;

- Des fluctuations élevées de tension dues à une variation continue de la distance inter-électrode à cause de la différence de fusion entre le fil cathode et le fil anode, ce qui rend le procédé instable.

I.1.4.5.2. Fils fourrés

Il existe deux types de fils pour la projection thermique par arc-fil :

- Pour les métaux purs ou certains alliages ductiles, on utilise des fils <<pleins>> uniquement constitués du matériau à déposer. [15,16]
- Pour des alliages plus complexes ou des composite, on peut utiliser des fils <<fourrés>> constitués d'une enveloppe métallique ductile électriquement conductrice à l'intérieur de laquelle est introduite une poudre (figure I.7).

Ce type de fil est utilisé pour la réalisation de dépôts présentant une dureté élevée et une bonne résistance à l'usure.

De tels dépôts peuvent être obtenus à partir d'un acier à forte teneur en carbone et des alliages métalliques.

En raison des limitations physiques des fils fourrés, il est pratiquement impossible de produire des dépôts par arc-fil contenant plus de 50% en volume de particules céramique. [16,17]

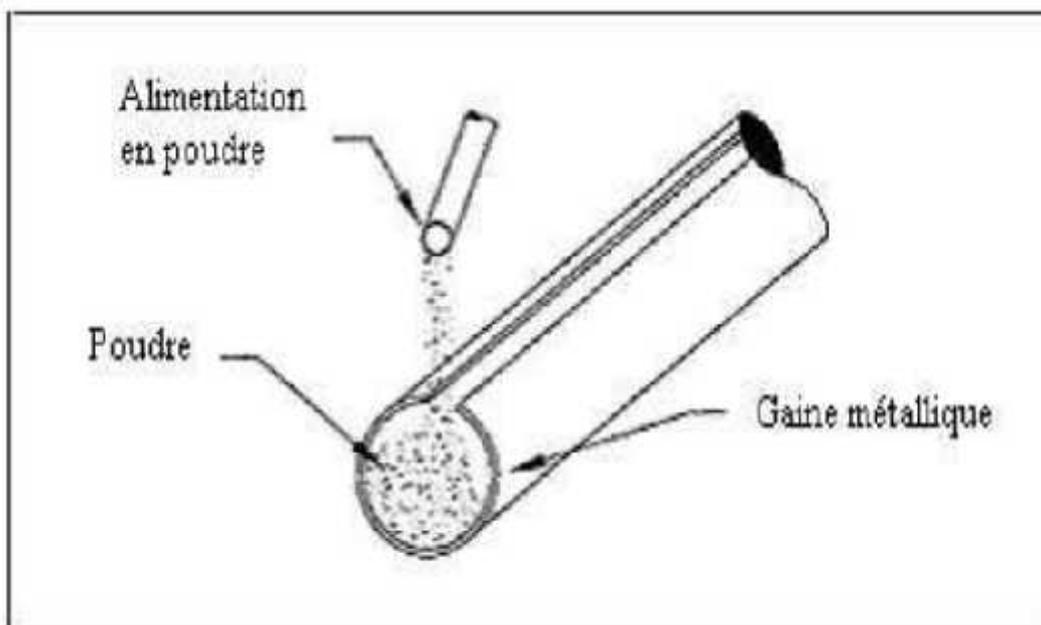


Figure I.7 : Schéma de principe du remplissage d'un fil fourré.

I.1.5. Paramètres de projection influant sur le dépôt [18]

- **Débit des gaz**

Un excès d'oxygène (flamme oxydante), augmente l'oxydation du dépôt, donc sa dureté réduit sa résistance mécanique. Le dépôt devient fragile et difficile à usiner, et un excès du taux d'acétylène (flamme carburante), entraîne un charbonnage du revêtement, dans les deux cas, usure prématurée des buses.

- **Pressions des gaz**

Une pression trop forte des gaz augmente les pertes de métal, donc toutes les consommations (dissipation d'énergie).

- **Diamètre du fil ou du cordon**

Un diamètre du fil ou du cordon plus grand, augmente le grain de dépôt et les pertes.

- **Vitesse du fil ou du cordon**

Lorsque la vitesse du fil ou du cordon est trop grande, elle augmente la cadence et la grosseur des grains. Et lorsque cette dernière est trop faible, elle augmente l'oxydation du dépôt.

- **Distance de projection**

Lorsque la distance de projection est trop faible, elle crée des turbulences, des pertes et des défauts d'adhérence. Surchauffe du dépôt.

Lorsque la distance de projection est trop grande, elle augmente le refroidissement des grains et entraîne une mauvaise adhérence.

- **Angle de projection**

En principe perpendiculaire, la projection oblique augmente les pertes et diminue l'adhérence.

- **Vitesse de balayage**

Lorsque la vitesse de balayage est trop rapide, elle augmente les pertes de métal et donne des épaisseurs de dépôt trop minces.

Et lorsqu'elle est trop lente, elle donne des épaisseurs de dépôt irrégulières et augmente la température du support.

- **Vitesse de rotation**

Lorsque la vitesse de rotation est trop rapide, elle entraîne un rebondissement des particules et une pollution du dépôt, et lorsqu'elle est trop lente, elle entraîne une surchauffe du dépôt et une couche trop épaisse du revêtement.

- **Refroidissement**

Lorsque le refroidissement est trop rapide, il génère le délaminage des couches, et lorsqu'il est trop lent, il entraîne une surchauffe, et donc une augmentation de l'oxydation du dépôt.

- La projection doit s'effectuer dans les meilleures conditions, c'est-à-dire sur un support bien préparé et dans un délai acceptable entre la préparation et la métallisation.

I.1.6. Préparation des surfaces

La métallisation exige une préparation rigoureuse des surfaces à revêtir.

Si quelques fois on peut obtenir, avec des particules liquides et très chaudes, des liaisons ponctuelles par fusion entre le projectile et le subjectile, cet accrochage reste toujours très insuffisant.

En effet, que ce soit pendant les opérations d'usinage sur des pièces rechargées, ou au cours des sollicitations sur des pièces protégées contre la corrosion, les efforts mécaniques induits aux revêtements engendreront son décollement il est donc utile et nécessaire de préparer la surface pour obtenir :

- Une propreté qui est un état chimique;
- Une rugosité qui est un état physique;
- Un préchauffage éventuel.

I.1.6.1. La propreté

La propreté est le constat visuel de la disparition plus ou moins importante des impuretés de toutes natures, pouvant souiller la surface d'un produit.

Elle permet aussi de mettre à jour les modifications physiques éventuelles de la structure (défauts ou autres).

La métallisation exige que la surface du support devant recevoir un futur revêtement, soit particulièrement propre, exemple de traces de calamine, de rouille, d'huile, ou de graisse, afin de ne pas nuire l'adhérence du métal d'apport.

Cette propreté sera obtenue suivant le type de polluant de la surface, soit par un dégraissage soigné après usinage dans le cas d'opération de rechargement, soit par un sablage dans le cas d'opération de protection anticorrosion.

I.1.6.2. La rugosité

Pour obtenir une bonne adhérence, la propreté est nécessaire mais pas suffisant.

Donc, 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'usinage.

Dans les deux cas, le résultat a pour effet :

- D'augmenter l'aire de contact entre le substrat et le 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.1.6.3. 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, surtout pour les matières plastique 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, de graisse ou d'huile, où le nettoyage n'est pas atteint.

Il permettra de faire sortir les liquides absorbés afin que la métallisation adhère efficacement.

I.1.7. Modes de préparation [19, 20]

I.1.7.1. Le dégraissage

Ce que l'on recherche à éliminer dans cette opération, ce sont des graisses incrustés sur le substrat. Il s'effectue soit par dissolution en milieux de solvant organique, soit par saponification, soit par muséification 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 est souvent nécessaire.

Suivant le besoin, le dégraissage sera plus ou moins profond pour un dégraissage très poussé; il convient donc de faire suivre le dégraissage chimique d'un électrolytique.

I.1.7.2. Le décapage

Le nom générique de décapage regroupe les procédés éliminant les produits pour le fer et l'acier.

Le décalaminage élimine les couches d'oxyde anhydre formées en hautes températures, alors que le dérouillage conserve l'oxyde hydrate de la corrosion naturelle.

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

Dans la plupart des cas, une mauvaise préparation de surface est l'origine d'un traitement de surface défaillant.

La qualité d'une préparation est une notion relative selon les utilisations, ni les éléments gênant ni leur teneur limite ne sont les mêmes.

I.1.7.3. Le sablage

Le sablage est le terme impropre donné au traitement par " impacts", plus généralement appelé de traitement d'une surface par des projections petits et nombreux, destinés à induire des modifications physiques, chimiques ou mécaniques au subjectile.

La technique employée insiste 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 nombreux paramètres qui influencent le résultat.

I.1.8. 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;
- La contrainte résiduelle.

I.1.8.1. 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 la phase d'étalement. Les particules impactent sur des lamelles déjà solidifiées.

Donc le dépôt résulte de l'empilement de lamelles à une structure lamellaire, et ses propriétés sont différentes de celles de matériau massif. [21]

Les dépôts comportent des inclusions telles que des oxydes ou encore d'autres matériaux provenant des chalumeaux eux-mêmes (figure I.8) des particules fondues 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). [22]

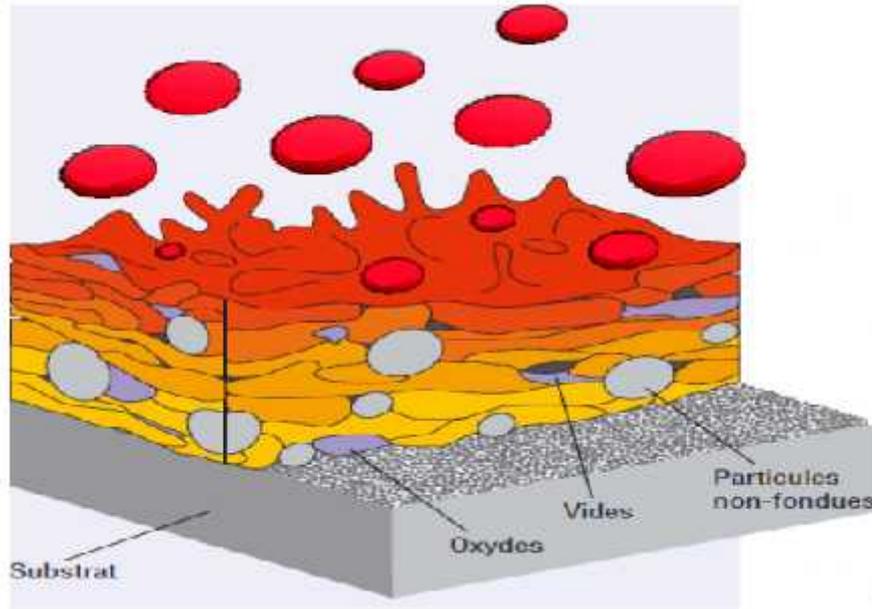


Figure I.8 : Schéma de principe d'une construction du dépôt par projection thermique.

I.1.8.2. 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'adhérence mécanique et d'augmenter la surface du contact.

Les contraintes résiduelles entre le dépôt et le substrat peuvent entraîner le décollement du dépôt au refroidissement. [22]

I.1.8.3. La dureté

Les particules sont soumises à un martelage dû aux impacts des suivantes, ce qui entraîne 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 élevés conduit à une dureté plus élevée.

L'augmentation de la porosité, se traduit également par une diminution de la dureté moyenne du dépôt. [23]

I.1.8.4. 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 en fonction du taux d'oxydes formés pendant la projection. [22]

I.2. L'usure

De nombreuses classifications d'usure existent depuis longtemps et plusieurs types sont reconnus : adhésion, délamination, abrasion, érosion, usure par petits débattements (fretting), par impact, par corrosion et par oxydation, par diffusion... Il faut toutefois reconnaître que la détermination des mécanismes de base est difficile à cerner en raison de la complexité des phénomènes rencontrés en pratique.

I.2.1. La tribologie [23]

Un système tribologique se définit comme un système mécanique, formé de deux matériaux antagonistes en contact, animés de mouvements relatifs. Ces deux solides évoluent dans un milieu ambiant et peuvent être séparés par un film intercalaire appelé troisième corps. Sur le plan tribologique, le troisième corps est un opérateur qui transmet la charge d'un premier corps sur l'autre et accommode en s'écoulant (débit) d'une façon dissipative

frottement) l'essentiel de la différence de vitesse entre deux corps. Les troisièmes corps séparent partiellement ou entièrement les premiers corps. Ils sont introduits dans le contact ou bien par entraînement cinématique (lubrifiants solides ou liquides) ou par formation interne (particules détachées), L'interface d'un tel système devient alors le siège de phénomènes dissipatifs d'énergie, regroupés sous le terme générique de frottement.

I.2.2. Le frottement [24]

Le frottement correspond à la résistance au mouvement relatif d'un corps sur un autre. Pour déplacer un solide sur une surface plane (figure I.9), une force supérieure ou égale à la force de frottement qui agit parallèlement à la surface et dans le sens opposé du mouvement est nécessaire. Le coefficient de frottement, noté μ est le facteur de proportionnalité entre la force de frottement et la charge normale W d'où :

$$\mu = F/W$$

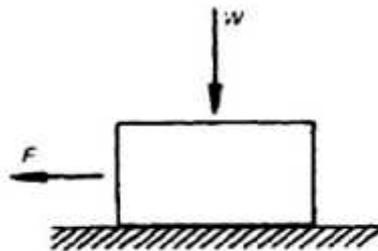


Figure I.9 : Nécessité d'une force F pour produire le mouvement.

I.2.3. Les Surfaces [25]

La surface est définie comme la partie extérieure d'un corps. En fait, comme tout solide se trouve dans un environnement donné, la surface correspond plutôt à une interface. Elle constitue une discontinuité dans l'arrangement périodique des atomes. Le nombre de plus proches voisins d'un atome en volume sera différent de celui en surface d'où une grande réactivité pour cette catégorie d'atomes.

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.

I.2.4. Les différents types d'usure [24]

Les mécanismes de dégradation des surfaces rencontrés sont nombreux et variés. L'usure correspondant à l'ensemble des phénomènes conduisant à des pertes de masse ou à des évolutions géométriques significatives du contact pouvant s'accompagner d'effets secondaires liés au jeu fonctionnel dans le mécanisme en mouvement, perte de cote, émission de débris, endommagement des surfaces.

L'usure est un phénomène complexe et il n'y a pas une définition unique en tribologie. L'usure peut néanmoins être reconnue par une perte ou un déplacement non désiré de la matière à la surface d'un solide en mouvement relatif ou en contact avec une autre substance. L'usure d'un matériau peut avoir plusieurs origines (diffusion atomique, adhésion...) et peut être influencée par de nombreux paramètres. Ce phénomène est constitué de trois étapes reliées les unes aux autres et qui se déroulent sur des points de contact individuels soient l'interaction des surfaces, les changements dans la couche de surface et l'endommagement des surfaces. Il faut garder à l'esprit que ce n'est pas une propriété intrinsèque du matériau. L'usure dépend tout autant des conditions mécaniques, thermiques imposées par le contact que du matériau lui-même.

Un système tribologique est composé de quatre éléments (figure I.10) :

Le matériau étudié ;

Le matériau antagoniste c'est-à-dire contre lequel il s'use ;

Les éléments à l'interface ;

L'environnement (température, humidité, lubrifiant).

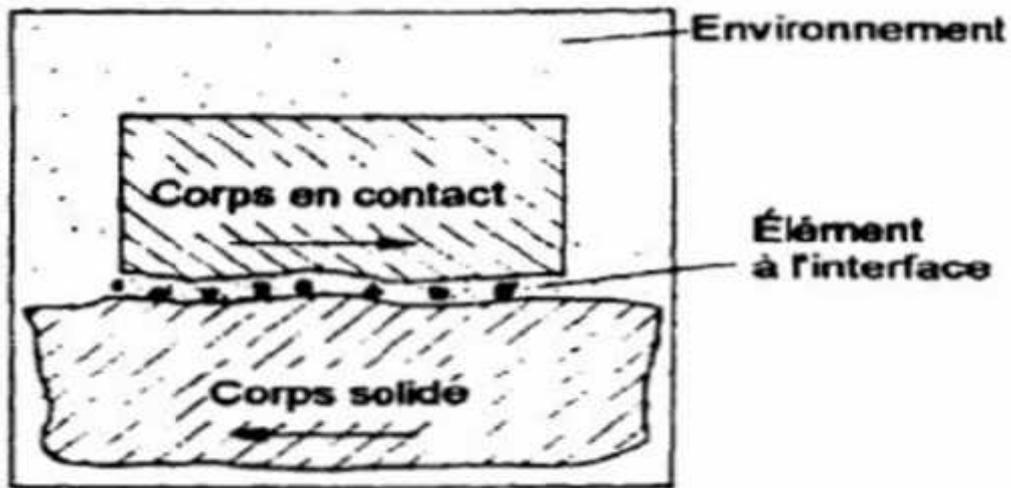


Figure I.10 : Représentation schématique des éléments d'un système tribologique. [24]

D'autre part, nous devons distinguer l'usure douce de l'usure sévère. L'usure douce survient généralement sous de faibles charges où les interactions métalliques restent limitées. Les débris d'usure sont constitués de fines particules et sont souvent sous la forme d'oxydes. Il n'y a pas de déformation sous la surface du matériau. L'usure sévère apparaît lorsque des pressions plus fortes sont appliquées. Il y a une déformation plastique au-dessous de la surface. Les débris obtenus ont une taille plus importante, de l'ordre de 1 mm². E. Rabinowicz a répertorié quatre mécanismes d'usure fondamentaux schématisés à la figure I.11 :

(L'adhésion, l'abrasion, la fatigue de surface, la réaction tribochimique).

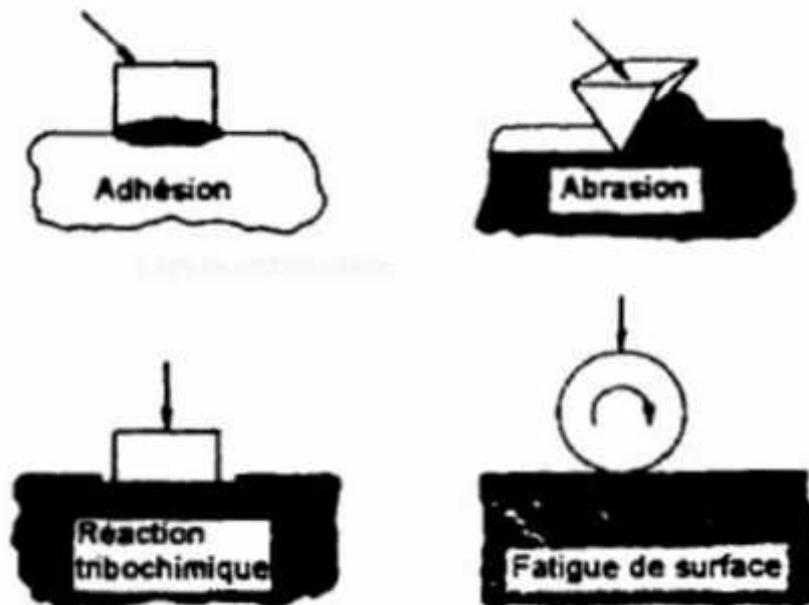


Figure I.11 : Mécanismes d'usure fondamentaux. [24]

Il est aussi possible de différencier les types d'usure en fonction du mouvement relatif entre les éléments du système tribologique comme la montre la figure I .12.

On distingue alors l'usure par glissement, par roulement, par impact, par érosion et par petits débattements (mouvements alternatifs de faible amplitude et de haute fréquence).

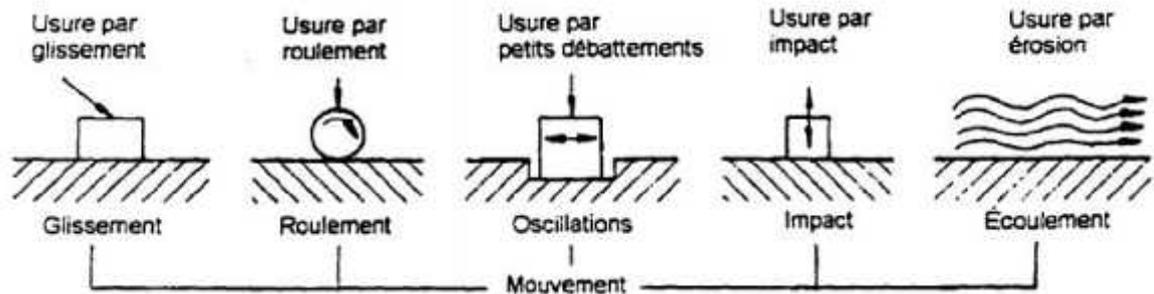


Figure I .12 : Classement des processus d'usure en fonction du mouvement des corps mis en jeu. [24]

I.2.4.1. Usure par adhésion [26]

Se caractérise par l'établissement de liaisons inter-faciales entre les surfaces de contact. Se manifeste généralement par des transferts de matière d'une surface à l'autre et peut en se généralisant produire le grippage épidermique, voir la soudure des composants.

I.2.4.2. Usure tribochimique

La réaction tribochimique correspond à la réaction des surfaces des solides avec l'environnement qui peut être liquide ou gazeux. Elle résulte de l'enlèvement du métal et des produits de réaction chimique provenant des surfaces en contact [24].

Le frottement peut accélérer la corrosion s'il élimine des films d'oxydes ou de sels peu résistants, inversement la corrosion peut détruire les qualités des surfaces. Les films superficiels durs peuvent améliorer la résistance à l'usure mais s'ils se détachent, ils risquent de favoriser l'abrasion [26].

I.2.4.3. Fatigue de surface [26]

Elle est liée à l'action d'un mouvement cyclique et à la capacité des matériaux à absorber les énergies de déformation et les contraintes thermiques générées par le frottement. L'usure par fatigue se manifeste par des fissures, des écailles et des changements de structure métallurgique.

L'usure par fatigue est lente et habituellement masquée par l'abrasion ou l'adhésion. Induite par le frottement de roulement ou de roulement avec glissement sous fortes charges répétées, on la rencontre essentiellement dans les engrenages et les roulements dont elle constitue le mode normal de destruction. Il existe cependant un certain nombre de manifestations extérieures qui permettent, dans certains cas, un suivi des pièces en service.

I.2.4.4. Usure abrasive [27]

La définition que l'on peut donner de l'abrasion peut s'énoncer comme suit : '' Usure par déplacement de matière produite par des particules dures ou des protubérances dures''. De plus, l'abrasion se divise aussi en deux classes : l'abrasion à deux corps et l'abrasion à trois corps. Dans le premier cas, l'abrasif est directement en contact de manière rigide avec la surface qu'il pénètre. Pour l'abrasion à trois corps, l'abrasif se retrouve coincé entre deux surfaces en mouvement amenant la détérioration des deux surfaces. Puisque dans l'abrasion à trois corps, l'abrasif est libre de rouler entre les surfaces, le niveau d'usure dans ce cas est habituellement dix fois moins élevé que sous l'abrasion à deux corps.

I.2.4.5. Paramètres influençant l'usure abrasive [28]

a) 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 arrondies 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.

b) Influence de la vitesse

La vitesse des particules abrasives à 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.

c) 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 articles 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.

d) Influence de la charge [29]

D'après Archard 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 :

$$V = KWL/H$$

Où : 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.

I.2.4.6. Erosion [26]

L'érosion est une usure abrasive particulière, causée par des impacts de particules solides contenues dans un fluide en mouvement. L'érosion diffère de l'abrasion car elle est corrélée avec l'énergie cinétique des particules qui, frappant les surfaces à grande vitesse, créent des

petits cratères par déformation plastique du matériau sous l'effet du cisaillement. La perte de matière résulte de la coupe ou des déformations alternées des aspérités formées par les impacts successifs.

Quand l'angle d'impact est faible, le phénomène de coupe est important, la résistance du matériau dépend très étroitement de sa dureté. S'il est grand, l'usure est due à la déformation des surfaces et le phénomène est beaucoup plus complexe : un matériau moins dur mais plus tenace peut fort bien résister.

I.2.4.7. Cavitation [26]

La cavitation exige un mouvement relatif entre un solide et un fluide. Elle concerne en premier les organes pour fluides, pompes, hélices de bateaux...

Quand la pression du fluide descend localement au-dessous d'une valeur critique (pas forcément sa tension de vapeur), des bulles se forment soudain à partir de germes : gaz dissous, microbulles, impuretés, rayures... quand la pression remonte, les bulles implosent, la brutale condensation de la vapeur projette les molécules du liquide sur les parois, créant une onde de choc.

La théorie n'a pas encore permis de relier la cavitation aux propriétés mécaniques des matériaux. On sait par contre qu'elle est maximale à une certaine température, qui dépend du fluide : en dessous, ce dernier ne bout pas facilement, au-dessus, l'implosion est moins violente.

I.2.5. Règles fondamentales pour atténuer l'usure [30]

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.

I.2.6. Dépôts résistants à l'usure [27]

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 à 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.

I.3. Contact glissant ou contact sec

I.3.1. Phénomène de frottement

Le frottement est une 'résistance' freinant tout mouvement relatif entre deux solides qui sont en contact. L'effort qui tend à ralentir ce mouvement est appelé 'effort de frottement', il est de sens opposé au déplacement. Il se manifeste par une dissipation d'énergie thermique entre les deux corps en contact glissant.

I.3.1.1. Le frottement : aspect tribologique

La tribologie regroupe la lubrification ; le frottement et l'usure. C'est une science pluridisciplinaire qui fait appel à la mécanique et à la physique des volumes et des surfaces.

I.3.1.2. Le Frottement : aspect thermique

La température maximale atteinte dans le contact est au moins en partie à l'origine des transformations physico-chimiques pouvant induire les dégradations les plus sévères de l'état de surface et de leur comportement tribologique. L'objet des premières études a donc été de déterminer ces températures.

I.3.2. Passage de la chaleur dans les corps en contact [31]

Le problème du contact thermique peut être décomposé en deux étapes relativement indépendantes.

-Dans la première phase ; il est nécessaire d'analyser l'état géométrique de l'interface, et à l'aide d'un modèle mécanique, de déterminer les caractéristiques géométriques (hauteur des aspérités ; ect...) de la surface. Dans une seconde phase on utilisera ces résultats de manière à prévoir établir la relation constitutive des résistances thermiques de contact.

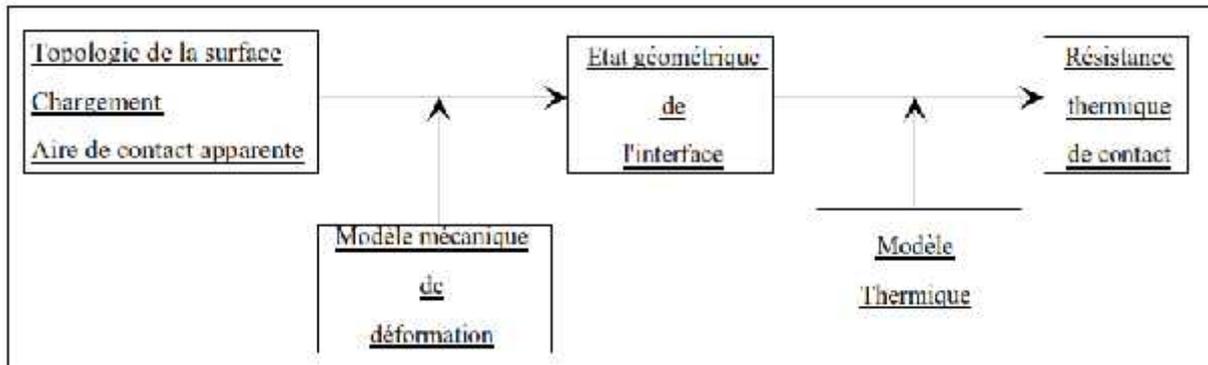


Figure I.13 : étapes du problème de contact thermique.

Phase 1 : modèle mécanique de déformation [32, 33]

L'analyse des surfaces réunit par trois étapes ;

- La caractérisation de la surface ;
- La distribution des hauteurs et des rayons de courbures des aspérités de la surface ;
- Le mode de déformations des aspérités en contact.

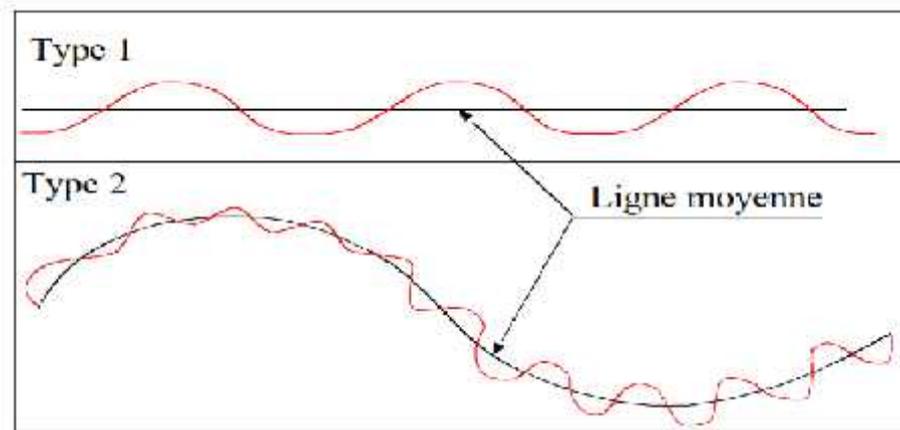


Figure I.14 : caractérisation de la surface.

Phase 2 : modèle de la résistance thermique de contact

De nombreuses études ont porté sur la détermination des températures moyennes des surfaces dans un contact. Ces différents travaux peuvent être classifiés en deux catégories les contacts parfaits ou lisses et les contacts imparfaits ou avec aspérités.

I.3.3. Carte de température et carte d'usure

Le but de la tribologie est de prédire les endommagements et l'usure qui vont se produire et estimer la durée de vie d'un système frottant. Cela conduit à la notion de cartes, c'est un moyen aisé qui représente l'évolution des phénomènes avec des paramètres donnés à partir des considérations théoriques reposant sur de nombreuses hypothèses. Parmi les études intéressantes, nous notons celle de Lim et Ashby qui considèrent dans un premier temps les cartes de température ensuite les cartes d'usure. Ces cartes permettent de prévoir le comportement d'un contact. Denape et al [34] ont présenté une modélisation qui permet de tracer des cartes de températures représentant des réseaux d'isothermes pour les températures de surface et les températures éclair en fonction des paramètres de pression et de vitesse adimensionnés, pour un couple de contact pion disque de matériaux Acier-Acier, dans des conditions expérimentales données (Figure I.15).

Kong et Ashby [35] ont donné les différentes applications de ces cartes dans le domaine de frottement. D'autres cartes aussi ont été développées et représentées sur un graphe en trois dimensions.

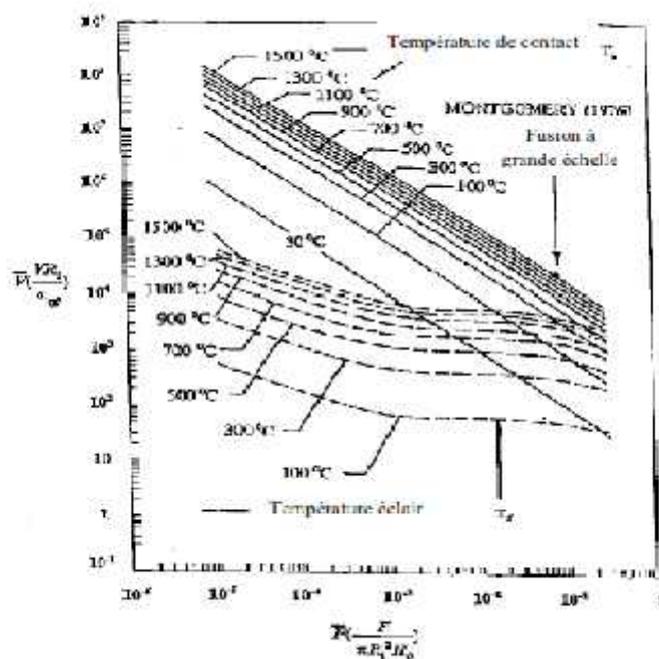


Figure I.15 : Carte de température obtenue pour un contact pion (Acier)-disque (Acier). [34]

I.3.4. Résistance thermique de contact

Il existe deux types de résistance thermique de contact (statique et stationnaire).

I.3.4.1. Résistance thermique en contact statique

En raison de l'irrégularité géométrique des surfaces et quelle que soit la force d'appui, la surface réelle de contact entre deux solides représente une faible fraction de la surface apparente. Bardon [36,37] montre que cette fraction est de l'ordre de 1% quand il s'agit de deux métaux en contact. Les irrégularités des surfaces en contact créent des espaces interstitiels occupés par un fluide, généralement un mauvais conducteur, qui forme une barrière thermique et perturbe les mécanismes d'échange à l'interface. La chaleur transmise entre les deux solides converge vers les zones de contact pour lesquelles les passages sont plus faciles (figure I.16). Ce phénomène résulte d'un allongement des lignes de flux et une striction des tubes de flux qui sont responsables de la résistance de contact. Cette notion est introduite pour modéliser la discontinuité interfaciale de température qui en résulte. Elle inclut les résistances thermiques de constriction des deux solides et la résistance thermique du milieu interstitiel. Ce paramètre physique a fait l'objet de nombreux travaux [37,38-39] classés selon la nature du régime thermique et du contact.

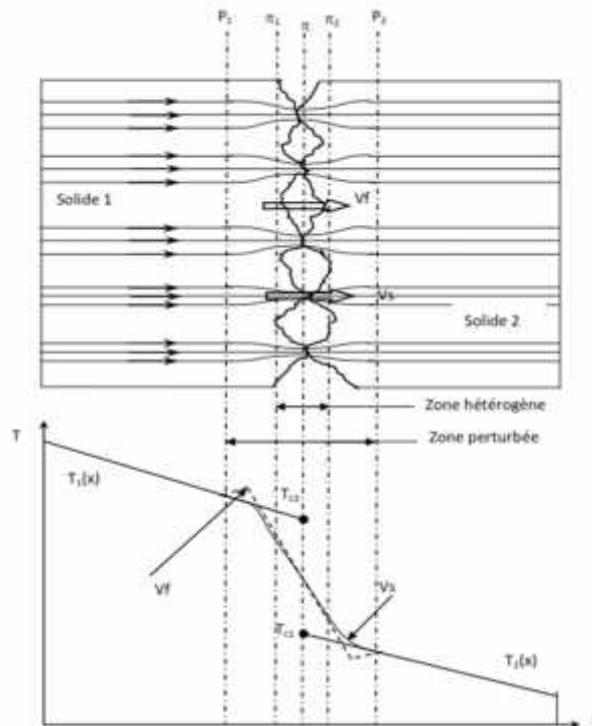


Figure I.16 : Définition de la résistance thermique de contact. [37]

Considérons un contact entre deux solides avec un transfert thermique monodimensionnel et des conditions de température imposée au loin de l'interface dans chaque matériau (Figure I.16).

La différence de conductivité entre les deux voies de passage génère un champ de constriction dans une zone perturbée délimitée par les deux plans théoriques P₁ et P₂, qui augmente localement la valeur de la résistance thermique traversée par le flux.

Pour calculer le champ de température en dehors de la zone perturbée (entre les plans P₁ et P₂), nous désignons des températures fictives T_{c1} et T_{c2} obtenues par extrapolation linéaire sur le plan P des champs de températures T₁(x) et T₂(x). Elles permettent d'écrire à l'interface :

$$R_{TC} = \frac{T_{c1} - T_{c2}}{Q}$$

Q étant le flux de chaleur traversant l'interface. Cette approche de la thermique de l'interface reste valable en régime permanent à la condition que les épaisseurs des milieux en contact soient grandes devant celle de la zone perturbée. En régime transitoire, cette définition pourra être prise en compte dans le cas où le temps d'établissement du phénomène de constriction est très faible devant la constante de temps du système étudié, c'est-à-dire que l'inertie thermique de la zone perturbée peut être négligée. Dans le cas contraire, il faudra parler d'impédance de

contact. Dans ce contexte, Laraqi [40] a proposé récemment une solution analytique qui permet de calculer l'impédance thermique d'un tube de flux en milieu semi-infini.

La résistance thermique de contact, associée aux solides statiques, a connu ces dernières décennies de nombreux développements tant sur le plan expérimental que théorique. La littérature est très abondante sur ce sujet [37,38-41]. Quelques références pertinentes sont proposées. De nombreuses études ont porté sur la détermination théorique des résistances thermiques de contact statique en régime permanent : Bardon [37], Négus et al [38], Laraqi et Bairi [42], Degiovanni et al [41].

D'autres auteurs se sont intéressés à l'étude des résistances thermiques de contact en régime périodique établi ou en régime transitoire : Laraqi [43], Bourouga et Bardon [44].

D'autres se sont intéressés à la résistance thermique en présence du film de revêtement : Négus et al [45], Antonetti et Yovanovich [46].

I.3.4.2. Modèles classiques de la Résistance Thermique de Contact en régime stationnaire

Quand la topographie des surfaces en contact est connue, la RTC peut être estimée à partir de modèles qui peuvent être classés en trois groupes.

Le premier type de modèle, représenté sur la (figure I.17) considère une interface où les aires de contact élémentaires ont les mêmes dimensions et sont distribuées uniformément.

L'espace interstitiel a partout la même épaisseur $\delta = \delta_1 + \delta_2$ (δ_1 et δ_2 sont les hauteurs moyennes des aspérités appartenant respectivement aux milieux 1 et 2).

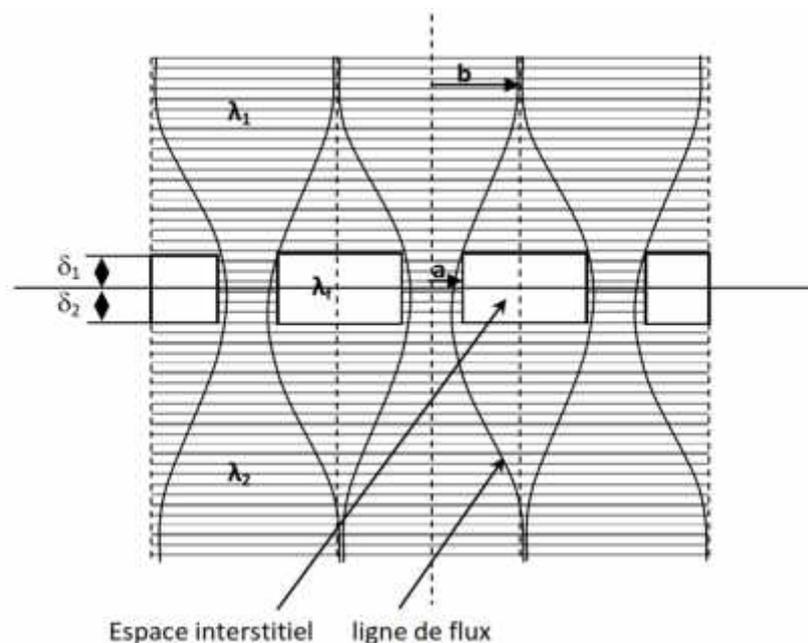


Figure I.17 : Schéma du modèle d'interface M1.

I.3.5. Résistance thermique de contact glissant

Au cours d'un régime glissant établi, un phénomène de constriction dynamique est observable de part et d'autre de la zone de contact. La résistance thermique de contact glissant garde la même définition que la résistance thermique de contact statique. Le champ de température au voisinage de l'interface est extrapolé depuis les zones non perturbées afin de déterminer un saut de température et flux traversant l'interface. Le temps nécessaire pour atteindre l'établissement du régime est faible pour le cas des contacts glissants.

Le contact mobile diffère du contact statique en raison du mouvement relatif de l'un des deux solides par rapport à l'autre. Le mouvement a une influence certaine sur le phénomène de constriction thermique au niveau des microcontacts. En effet, Mazo et al [47] ont réalisé une étude expérimentale sur la résistance thermique de contact dans le cas d'une configuration de deux couronnes en frottement sec, l'une en métal, l'autre en plastique. Ils proposent une première loi d'atténuation de la résistance thermique de contact glissant par le mouvement.

Ils ont trouvé que la résistance thermique de contact glissant est plus faible que celle mesurée en contact statique. Badie-Levet [48] a entrepris un peu plus tard dans la continuité de ce travail, une étude sur un contact acier-matière plastique. Il étudie l'influence de la vitesse, de la pression et de la température sur le frottement, le flux généré et la part qui participe à la chute de température. Dans le cas d'une aspérité circulaire, Bardon [36] a montré que l'atténuation de la résistance de constriction dépend du nombre de Péclet.

Un grand nombre de Péclet signifie que la vitesse de glissement prend une part très importante dans les échanges thermiques. Au contraire, quand le Péclet est faible, le contact glissant est considéré comme statique.

De nombreux modèles analytiques [49,50] et numériques [51] ont été développés dans le but de déterminer la résistance thermique de contact glissant. Les modèles proposés admettent le plus souvent que les aspérités en contact sont schématisées par des cylindres droits ou par d'autres formes.

Pour déterminer les expressions du facteur de génération de flux de chaleur, et la résistance thermique de contact glissant, Bardon [36] et Denape [34] ont proposé une approche physique en s'appuyant sur l'analyse des phénomènes de constriction au voisinage d'une interface mobile. Bardon [36] a schématisé le contact par un solide muni d'une aspérité. Il modélise la résistance thermique de contact glissant par l'association en parallèle de la résistance thermique du fluide interstitiel R_i et celle des milieux solides. Cette dernière est la résistance équivalente en série des résistances de constriction des deux solides et celle de l'aspérité. Denape [34] a déterminé la résistance de constriction glissante R_{cg} en faisant intervenir les

Eléments bibliographiques

résistances de constriction des deux solides R_{c1} et R_{c2} . La résistance thermique des aspérités R_s a été négligée devant la constriction.

Chapitre II :

*Matériaux et techniques
expérimentales*

II. Matériaux et technique expérimentales

II.1. Introduction

L'objectif de notre travail est de réaliser des dépôts en alliage à base nickel sur un substrat en acier E335 par projection thermique. Le procédé utilisé est celui de la projection flamme poudre. Les matériaux d'apport déposés sont sous forme de poudres en alliage de (Ni-Al-Mo) et (Ni-Al).

Dans une deuxième étape, on présentera les différentes techniques de caractérisation.

II.2. Matériaux utilisés

II.2.1. Le substrat

Le substrat utilisé pour réaliser les dépôts est un acier de construction mécanique d'usage général de type E335. C'est un acier doux ordinaire hypoeutectoïde qui présente une bonne ductilité. Sa composition chimique est représentée dans le tableau 1.

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

E335	Fe	Ni	C	Mn	Cu	Si
	Bal	<0,03	0,1	0,231	0,119	0,044

Bal : pourcentage du fer élevé dans l'acier.

II.2.2. Dépôts réalisés

Le matériau de projection utilisé sont des alliages à base Nickel : (Ni-Al-Mo) et (Ni-Al), qui sont présents sous forme de poudre, nommée proXon 21021 (P21) et 21031 (P31). Ces poudres sont conçues pour produire des dépôts et utilisées généralement sur les surfaces d'appui résistantes et une excellente résistance à l'oxydation et à la corrosion et aux températures élevées. Ces poudres ont été projetées sur les surfaces des échantillons par le pistolet flamme-poudre type CastoDyn DS8000.

II.3. Caractéristique des dépôts

La composition chimique, et les différentes applications et caractéristiques des poudres qu'on a utilisées pour nous dépôts est représentées dans les tableaux suivants:

Tableau .2 : Composition et caractéristique de ProXon21021 (P21).

Type	Applications et Caractéristiques	Composition	Température max d'utilisation
ProXon21021 (P21)	Portées mécaniques, rattrapage de côtes. Revêtements anti usure de faibles et fortes épaisseurs. S'utilise sans sous-couche d'accrochage. Le meilleur état de surface est obtenu par rectification.	Ni : 90 (%) Al : 5-10 (%) Mo : 1-5 (%)	850°C

Tableau .3 : Composition et caractéristique de ProXon21031 (P31).

Type	Applications et Caractéristiques	Composition	Température max d'utilisation
ProXon21031 (P31)	Portées mécaniques, rattrapage de côtes. Revêtements anti usure de faibles et fortes épaisseurs. S'utilise sans sous-couche d'accrochage. Le meilleur état de surface est obtenu par rectification	Ni : 90 (%) Al : 5-10 (%) Mo : 1-5 (%) Cr : 1-5 (%)	850°C

II.4. Présentation des échantillons

II.4.1. Elaboration 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 II.1

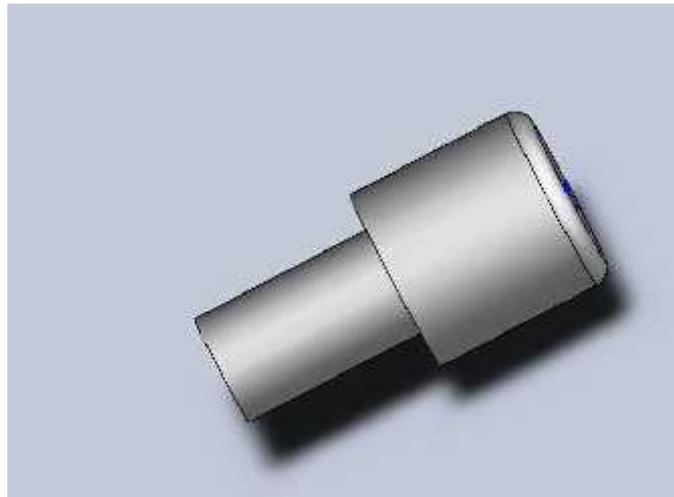


Figure II.1 : Echantillon utilisé pour la projection.

II.4.2. préparation des surfaces à revêtir

Après avoir élaboré les échantillons, on a effectué les différentes opérations de préparation de surface suivante :

II.4.2.1. Dégraissage

Ce traitement est d'importance capitale, dont le but est d'éliminer de la surface, toutes traces de substances organiques, huiles, produit gras, pâtes qui sont dues aux différentes manipulations que le matériau a subi auparavant (emballage, déchargement, accrochage, etc...). Les échantillons sont dégraissés et nettoyés avec de l'éthanol.

II.4.2.2. Sablage

Parmi les méthodes de rugosification des surfaces, on a opté pour le sablage avec du corindon.

Cette méthode a pour but l'obtention d'une surface rugueuse prête à recevoir le revêtement. Le principe du sablage consiste à revêtir par un jet de particules à une pression d'air de 5 bars. Ce prétraitement offre l'avantage simultané de donner à la surface à revêtir une bonne rugosité et d'induire cette même surface de contraintes résiduelles de compression donnant ainsi au métal à projeter une bonne adhérence physique et mécanique.

II.5.1. Paramètre de projection

Les différents dépôts ont été obtenus selon les paramètres de projection utilisés, ils sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau .4 : Paramètres de projection utilisé.

Paramètres de projection Matériaux de projection	Pression de l'air (bar)	Pression de l'oxygène (bar)	Pression du gaz acétylène (bar)	Distance de projection (mm)
ProXon 21021 (P21)	4	4	0,7	150
ProXon 21031 (P31)	4	4	0,7	150

II.5.2. Pistolet utilisé

Les matériaux, à projeter, sont introduits sous forme de poudre dans la flamme d'un chalumeau les gaz les plus couramment utilisés sont des mélanges hydrogène-oxygène, et surtout acétylène-oxygène, qui donnent des flammes à des températures de 2600°C, 3000 °C respectivement.

Ce paramètre température limite à la projection de certains matériaux. Dans le cas de projection à partir des poudres, ces derniers peuvent être introduites dans la flamme : soit par gravité, soit par mise en suspension préalable dans l'un des gaz ou encore par mise en suspension dans un courant d'air additionnel (figure II.2).

L'avantage de cette technique par rapport aux autres procédés de projection est son faible prix de revient et sa facilité de mise en œuvre.

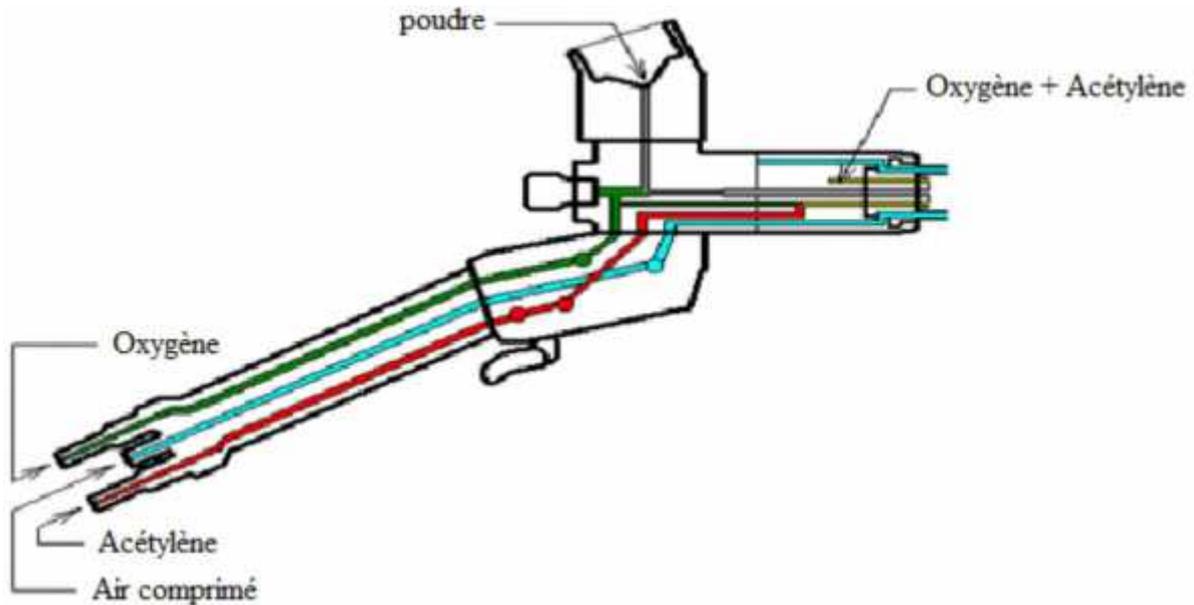


Figure II.2 : Pistolet flamme-poudre.

II.6. Observation métallographique

II.6.1. Dispositif d'usure

Figure II.4 présente un tribomètre pion-disque qui est parmi les appareils les plus couramment utilisés. Il se compose d'un arbre en rotation à vitesse variable sur lequel se fixe un disque constituant le premier matériau à tester. Un pion réalisé avec le deuxième matériau du couple tribologique se monte sur un support équipé d'un capteur de force normale et tangentielle. Une force normale est appliquée au support de manière à presser le pion sur le disque. Puis le disque est mis en rotation et la force tangentielle est mesurée.

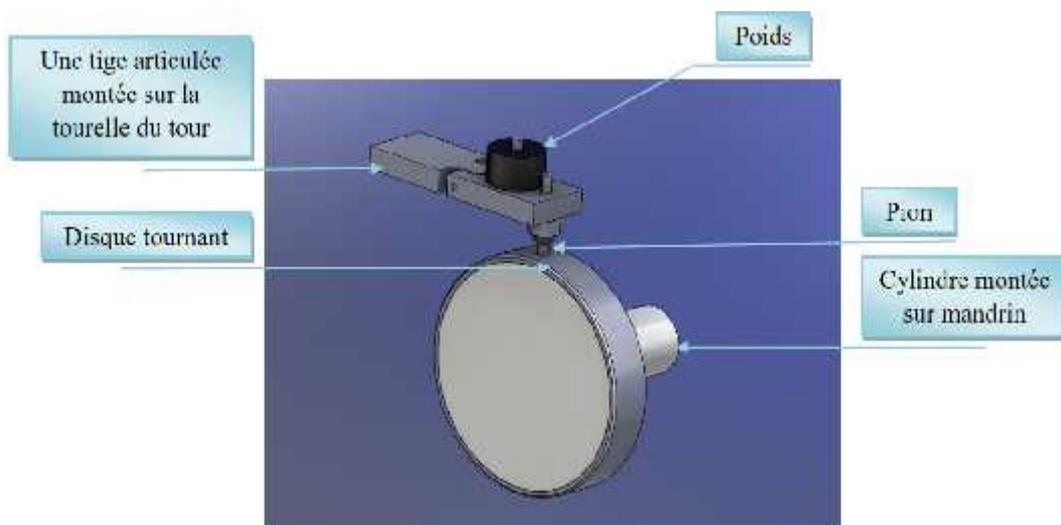


Figure II.4 : Dispositif d'usure.

II.1.7. Microscope Métallographique

L'observation microscopique a nécessité un polissage fin de la surface de la coupe du dépôt à observer. Le polissage mécanique est obtenu en utilisant une polisseuse qui vise à rendre les surfaces uniformes. Il consiste à abader la surface à l'aide de papiers abrasif de grade progressif (400, 600, 800, 1000, 1500). (figure II.5)

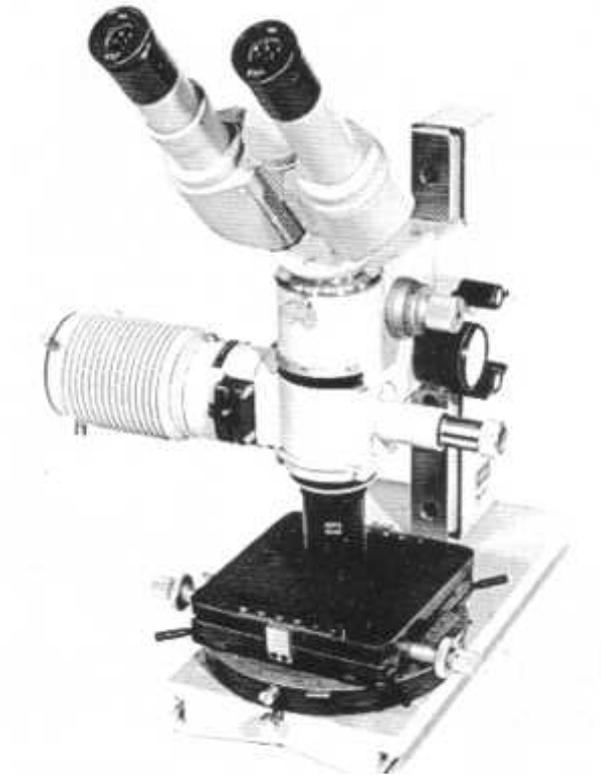


Figure II.5 : Microscope Métallographique.

II.1.8. Caractérisation microstructurale

Elle consiste à prendre les microstructures des dépôts et voir leur morphologie. Dans notre cas, la caractérisation s'est faite à l'aide d'un Microscope électronique à balayage et à l'aide d'un microscope optique.

II.1.9. Caractérisation thermique (test d'usure)

II.1.9.1. Principe du test d'usure

Afin de suivre le comportement à l'usure des différents échantillons aux dépôts réalisés, on a fait subir aux échantillons des essais de masse par abrasion en fonction de temps. Ces derniers sont réalisés en jouant sur trois paramètres qui influent sur l'usure à savoir : la charge, le temps et la vitesse.

II.1.9.2. La perte de masse relative

C'est une méthode d'analyse quantitative qui consiste à faire fonctionner un mécanisme pendant un temps connu puis à extraire la pièce à étudier et à la peser afin de déterminer sa perte de masse. La précision de la mesure effectuée peut être de l'ordre du dixième de milligramme.

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

II.1.9.3. la température

Après chaque essai d'usure, on mesure la température entre le dépôt et le substrat et ça, est effectuée à l'aide d'un thermomètre à distance.

II.1.9.4. Représentation du dispositif d'usure

Afin d'assurer les tests d'usure, on a élaboré un dispositif qui comporte une tige articulée à son extrémité, et au milieu un poids qui permet de mettre l'échantillon en contact sous charge maîtrisée avec le cylindre tournant à une vitesse qu'on peut manipuler (de 90tr/min jusqu'à 180tr/min), tout le dispositif est monté sur un tour. Voir (figure II.6)

Le dispositif d'usure utilisé a été réalisé au niveau du Hall de technologie de l'université de Bejaia.

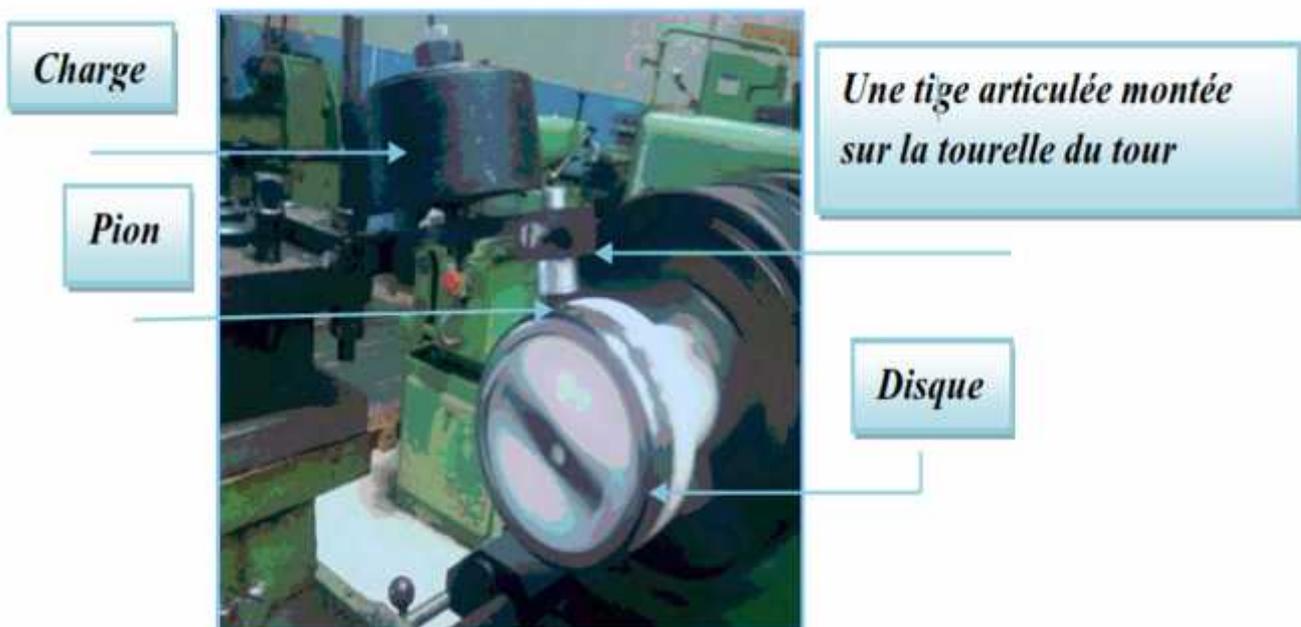


Figure II.6 : Représentation du dispositif d'usure utilisé.

II.1.9.5. Optimisation et réalisation du test d'usure

Afin de réunir toutes les conditions nécessaires pour la réalisation de tests d'usure significatifs soutenue par l'obtention de résultats fiables permettant une comparaison du comportement en matière de perte des masses des échantillons. Nous avons essayé de gérer les paramètres influents sur l'usure comme suit :

Avant de commencer les tests, on doit nettoyer notre échantillon des éléments additifs.

- prendre la masse initiale (M_0) de l'échantillon à l'aide d'une balance analytique de précision 0,1 mg ;
- Nettoyer le cylindre monté sur le mandrin ;
- Introduire l'échantillon dans le dispositif, et actionner le tour ;
- Après la fin du temps de chaque essai, on mesure la température à l'aide d'un thermomètre (figure II.7), et nettoie l'échantillon des additifs tout en prenant la nouvelle valeur de sa masse (M_1).
- Observation des phénomènes d'usure à l'aide d'un microscope optique



Figure II.7 : Thermomètre Laser.

A) Les charges appliquées

On a appliqué des charges lors des tests d'usure pour les différents échantillons : les charges appliquées (5 N, 10 N, 20 N, 30 N).

B) La vitesse

Le travail s'est effectué à deux vitesses pour chacune des charges appliquées a savoir :

- à 0,5 m/s ;
- à 1 m/s.

C) La lubrification

Les tests d'usure ont été réalisés sans lubrification.

II.1.9.7. Evaluation de l'usure des pions (frotteur)

Avant et après chaque essai de frottement, les pions sont pesés avec une balance analytique montrée sur la (figure II.8) afin de détecter une éventuelle perte de matière.

L'observation par microscope optique du faciès d'usure des pions est la méthode d'évaluation retenue pour la mesure du volume usé.



Figure II.8 : balance analytique.

Chapitre III :
Résultats
et
Discussions

III. Introduction

Dans ce chapitre, on présentera en premier lieu l'observation micrographique des dépôts par le microscope Métallographique, et la caractérisation microstructurale des dépôts observé par le microscope électronique à balayage (MEB).en seconde lieu on va interpréter les mesures, par la suite on présentera les résultats des tests d'usure.

III.1. Caractérisation microstructurale

III.1.1. Microscope électronique à balayage (MEB) [52]

Les caractérisations morphologiques des surfaces ainsi que leurs compositions révèlent des informations importantes sur les structures du dépôt.

La microscopie électronique à balayage (M.E.B) nous a permet de mieux observer l'état de surface de l'échantillon. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures (III.1), (III.2).

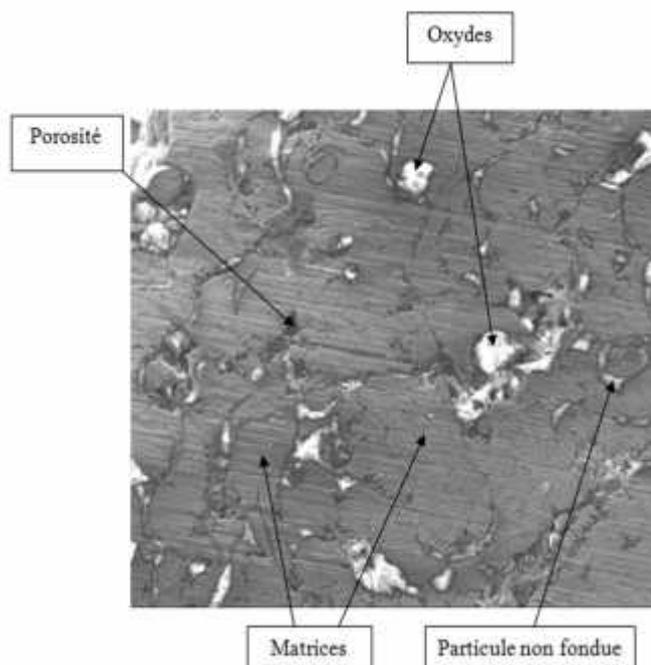


Figure III.1 : Microstructure des dépôts issus de la poudre 21021.

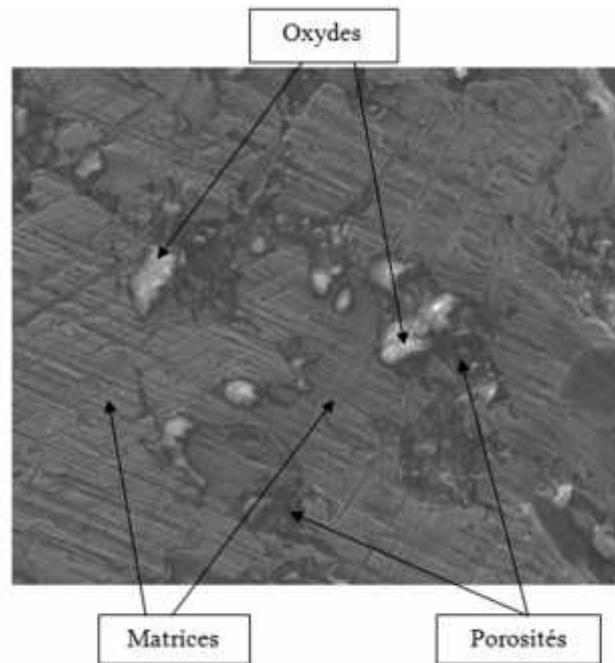


Figure III.2 : Microstructure des dépôts issus de la poudre 21031.

Les observations au MEB du dépôt non traité issu de la poudre d'alliage 21021 et 21031 montrent une microstructure dense, compacte et complexe formée de plusieurs phases avec la présence en plus de porosités et de particules non fondues (Figure III 1 et 2). Dans des travaux précédant il a été montré la présence exclusive des éléments constituant celle-ci qui sont le Nickel, l'Aluminium et le Molybdène. Après projection, outre la présence des éléments constituant la poudre, il a été observé la présence des oxydes dont les compositions chimiques sont déterminées par EDAX correspondant à l'alumine Al_2O_3 et l'oxyde à base de Molybdène.

III.2. Détermination des paramètres tribologiques et thermiques du dépôt 21021

III.2.1. Influence des charges sur le comportement tribologique sous une vitesse de 0.5 (m/s) :

Dans cette partie nous allons étudier la perte de masse relative sous forme de courbes pour les différents échantillons avec un dépôt sous une charge 5 (N) et 30 (N), avec une vitesse de glissement de 0.5 (m/s) pour observer, déduire et analyser leur comportement vis-à-vis du frottement et leur résistance thermique et à l'usure.

Résultats et discussions

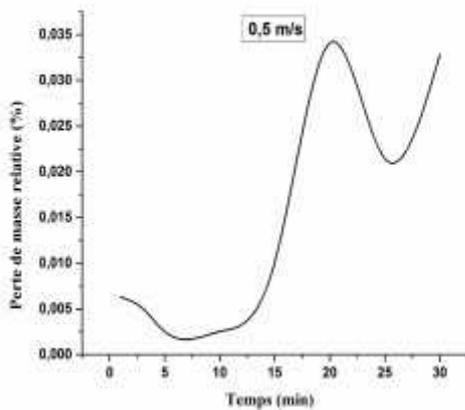


Figure III.3 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction du temps à 5 (N).

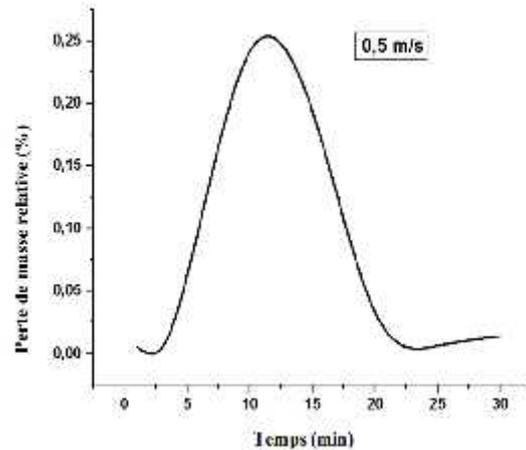


Figure III.4 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction du temps à 30 (N).

Dans la figure III.3 on remarque un palier de perte de masse relative stable allant jusqu'à environ 12 minutes, puis une augmentation sévère et rapide tout le reste de l'essai, la valeur la plus importante est de 0.035 (%). Alors que pour une charge de 30 (N) sous une vitesse toujours de 0.5 (m/s), on remarque une augmentation dès le début de l'essai atteignant 0,25 (%) à la dixième minute, suivi d'une diminution pondérée à la fin de l'essai ce qui est schématisé par le palier stable des dernières minutes.

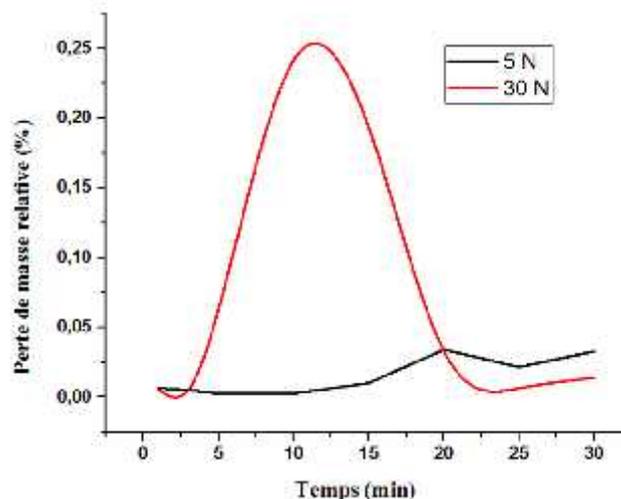


Figure III.5 : courbe comparative d'évolution de la perte de masse en fonction du temps sous deux charges 5 (N), 30 (N).

Résultats et discussions

L'évolution de la perte de masse en fonction du temps sous deux charges 5 (N) et 30 (N) à 0,5 (m/s), figure III .5 : on remarque que la perte de masse relative à 30 (N) augmente rapidement jusqu'à la valeur maximale 25 (%) puis elle diminue, par contre à 5 (N) elle reste presque stable tout au long de l'essai, cette différence s'explique avec la présence des contraintes de cisaillement très élevées sous la charge 30 (N) ce qui implique une perte de masse importante. Par contre l'essai de 5 (N) les contraintes de cisaillement a l'interface de contact sont très faibles et ne provoquent presque pas de perte de masse.

III.2.2. Influence des charges sur le comportement thermique sous une vitesse de 0,5 (m /s) :

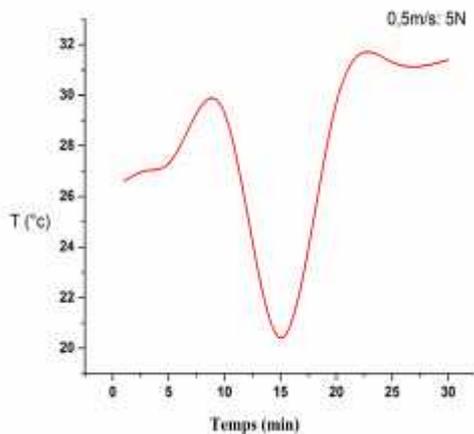


Figure III.6 : courbe d'évaluation de température en fonction de temps à 5 (N).

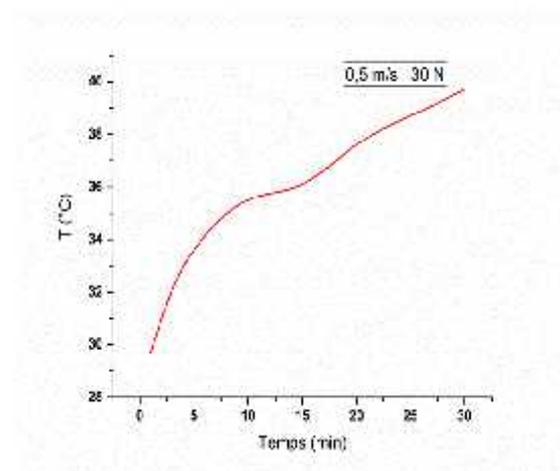


Figure III.7 : courbe d'évaluation de en fonction de temps à 30 (N).

On remarque dans la figure III.6 que le palier de température à 5 (N) est stable allant jusqu' a environ de 10 minute, puis une diminution sévère et rapide jusqu'à 21 (°C) à la quinzième minute suivi d'une augmentation rapide jusqu'à la valeur 31,4 (°C), et pour la figure III.7 on remarque un palier de température à 30 (N) qui augmente progressivement de jusqu'à la fin de l'essai.

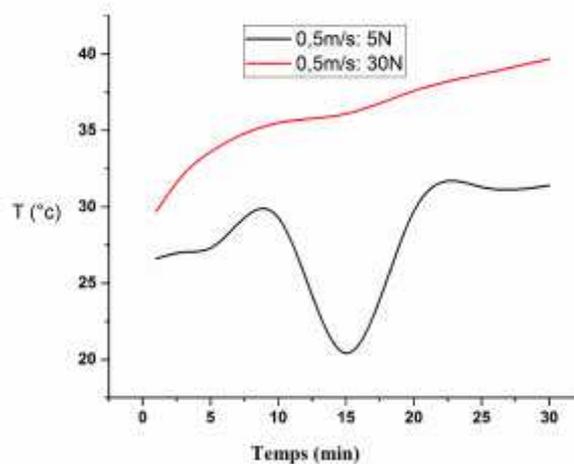


Figure III.8 : courbe comparative d'évolution de la température en fonction du temps sous deux charges 5 (N), 30 (N).

On remarque que la température lors de l'essai à 30 (N) est plus élevée et augmente progressivement par contre lors de l'essai à 5 (N) la température est moins basse et présente des variations tout au long de l'essai. Cela est dû à la différence des contraintes de cisaillement à l'interface de contact entre le dépôt et l'acier qui sont plus élevée sous la charge de 30N ce qui implique une agitation .

III.2.3. Influence des charges sur le comportement tribologique sous une vitesse de 1 (m/s) :

Dans cette partie nous allons étudier la perte de masse relative sous forme de courbes pour les différents échantillons avec un dépôt pour une charge fixe 5 (N) et 30 (N), avec une vitesse de glissement de 1 (m/s) pour observer, déduire et analyser leur comportement vis-à-vis du frottement et leur résistance thermique et à l'usure.

Résultats et discussions

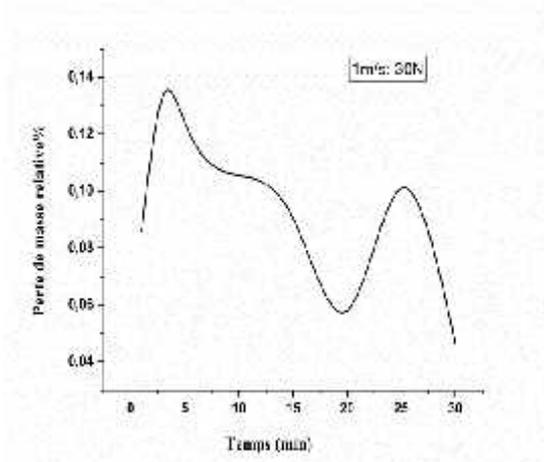


Figure III.9 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction du temps à 30 (N)

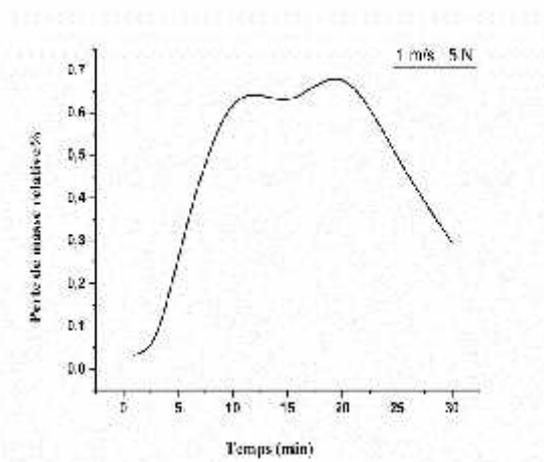


Figure III.10 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction du temps à 5 (N).

On remarque que l'évolution de la perte de masse à 30 (N) augmente rapidement jusqu'à 0,1333 (%) puis d'une diminution pondérée jusqu'à 0,0579 (%) suivi d'un palier qui augmente et qui redescend encore vers la 25 (min), Tandis que la perte de masse à 5 (N) augmente rapidement au début de l'essai jusqu'à la valeur 0,61687473 (%) puis une diminution à partir de la vingtième minute jusqu'à la fin de l'essai.

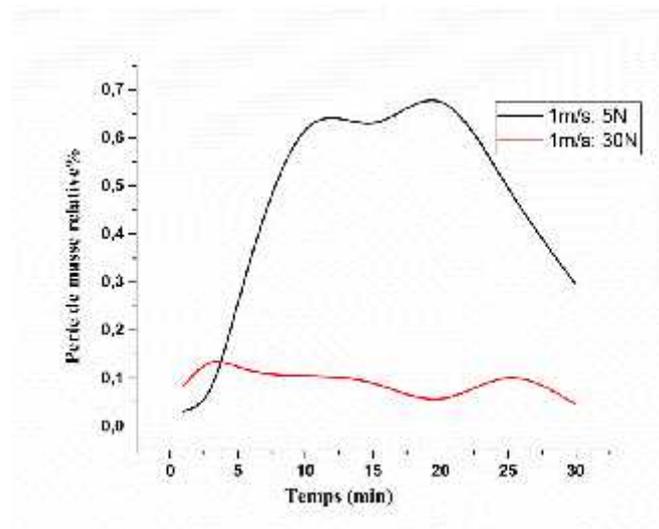


Figure III.11 : courbe comparative de l'évolution de la perte de masse en fonction du temps sous deux charges 5 (N), 30 (N).

On remarque que la perte de masse lors de l'essai à 5 (N) est plus élevée que celle à l'essai de 30 (N), cette différence s'explique avec l'arrachement important de la matière qui présente

Résultats et discussions

des phases transitoires et des impuretés au début de l'essai par contre lors de l'essai à 30 (N) le manque des phases transitoires et des impuretés donne une surface de contact plus dur ce qui explique la diminution de la perte de masse.

III.2.4. Influence des charges sur le comportement thermique sous une vitesse de 1 m /s:

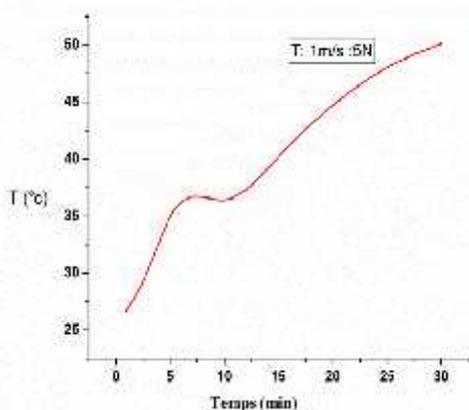


Figure III.12 : courbe d'évaluation de température en fonction de temps à 5 (N).

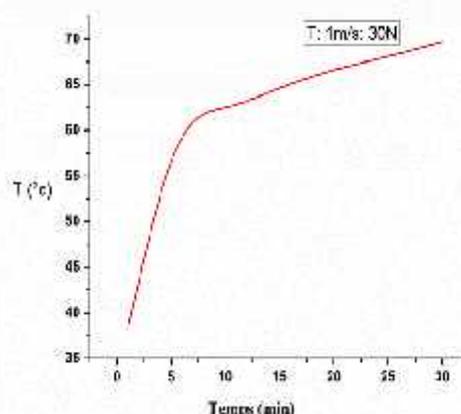


Figure III.13 : courbe d'évolution de la température en fonction du temps à 30 (N).

On remarque que le palier de la température à 5 (N) augmente dès le début de l'essai jusqu'à la fin. Pour le palier de la température à 30(N) augmente rapidement de 38,2 (°C) jusqu'à 62,5 (°C) à la 6 (min) suivi d'une légère augmentation jusqu'à elle atteint sa valeur qu'est de 69,7 (°C) à la 30 (min).

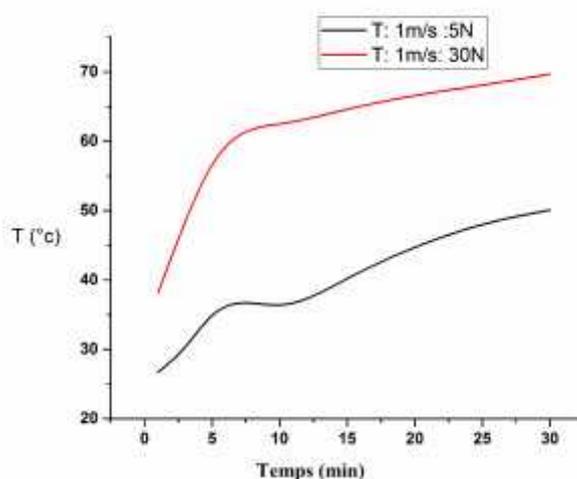


Figure III.14 : courbe comparative d'évolution de la température en fonction du temps sous deux charges 5 (N), 30 (N).

On remarque que la température lors de l'essai à 30(N) est plus élevée que celle de l'essai à 5(N) et cela s'explique par une agitation thermique très importante des atomes aux couches

Résultats et discussions

superficielles du dépôt sous la charge de 30 (N) ce qui implique un dissipation considérable de la chaleur, et ce qui apparait moins important sous la charge de 5 (N).

III.2.5. Influence des charges sur le comportement tribologique sous des vitesses différentes 0,5 (m/s), 1 (m/s) :

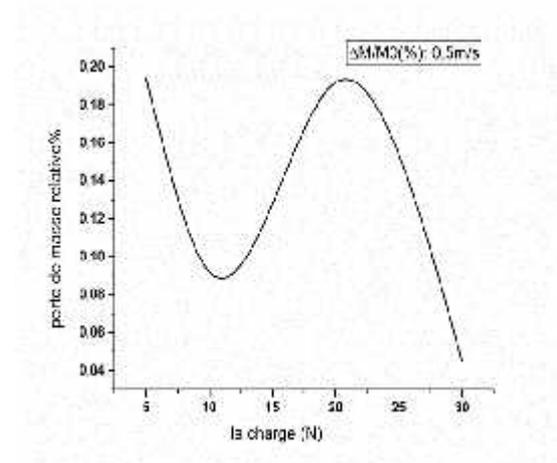


Figure III.15 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction de la charge à 0,5 (m/s).

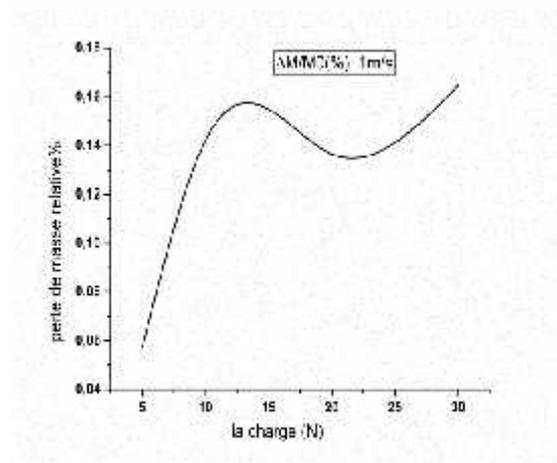


Figure III.16 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction de la charge à 1(m/s).

On remarque que la perte de masse lors de l'essai à 0,5 (m/s) diminue rapidement puis augmente à partir de 10 (N) jusqu'à la valeur 0,1918 (%), puis une diminution encore a partir de 20 (N) jusqu'à fin de l'essai. Tandis que la perte de masse lors de l'essai à 1 (m/s) augmente rapidement au début atteignant la valeur 0,1581 (%) à 15 (N) suivi d'un palier relativement stable jusqu'à la fin de l'essai.

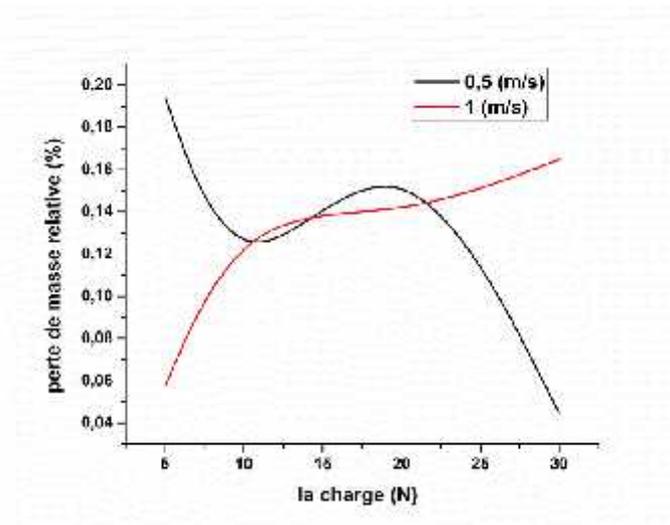


Figure III.17 : courbe comparative d'évolution de la perte de masse en fonction de la charge avec deux vitesses 0,5 (m/s) et 1 (m/s).

On remarque que la courbe de la perte de masse à 0,5 (m/s) est une courbe décroissante par contre à la vitesse de 1 (m/s) est une courbe croissante cela s'explique avec une surface d'usure plus grande à la vitesse de 1 (m/s) ce qui implique une augmentation de la perte de masse au cours de l'essai.

III.2.6. Influence des charges sur le comportement thermique sous à des vitesses différentes 0,5 (m/s), 1 (m/s) :

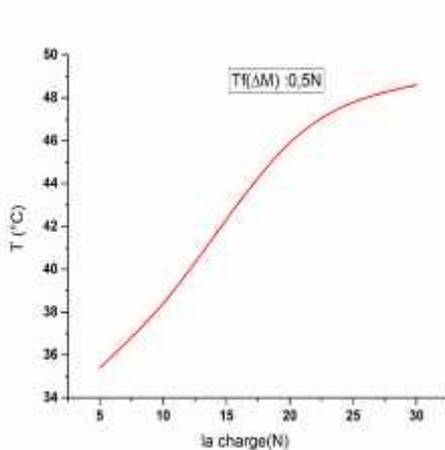


Figure III.18 : courbe d'évolution de la température en fonction de la charge.

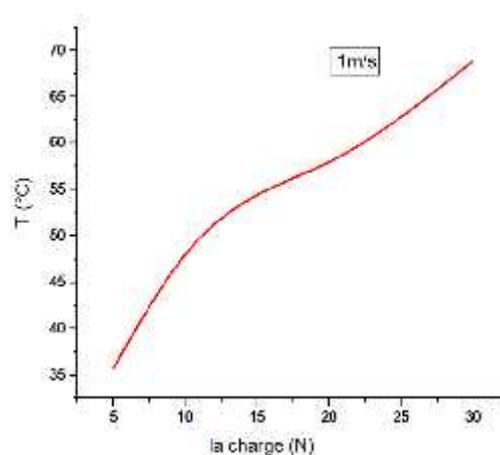


Figure III.19 : courbe d'évolution de la température en fonction de la charge.

On remarque que la température augmente proportionnellement avec la charge appliqué jusqu'à atteindre sa valeur maximale pour les deux vitesses.

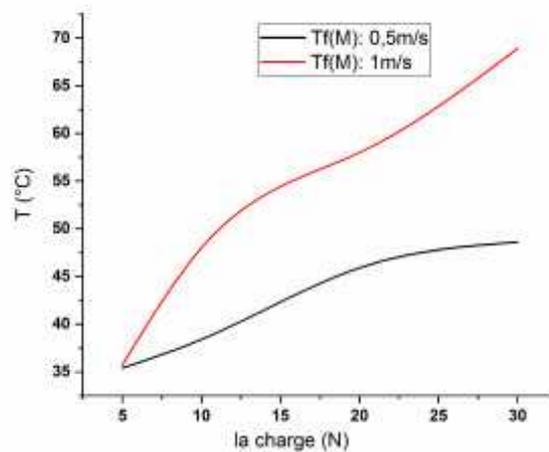
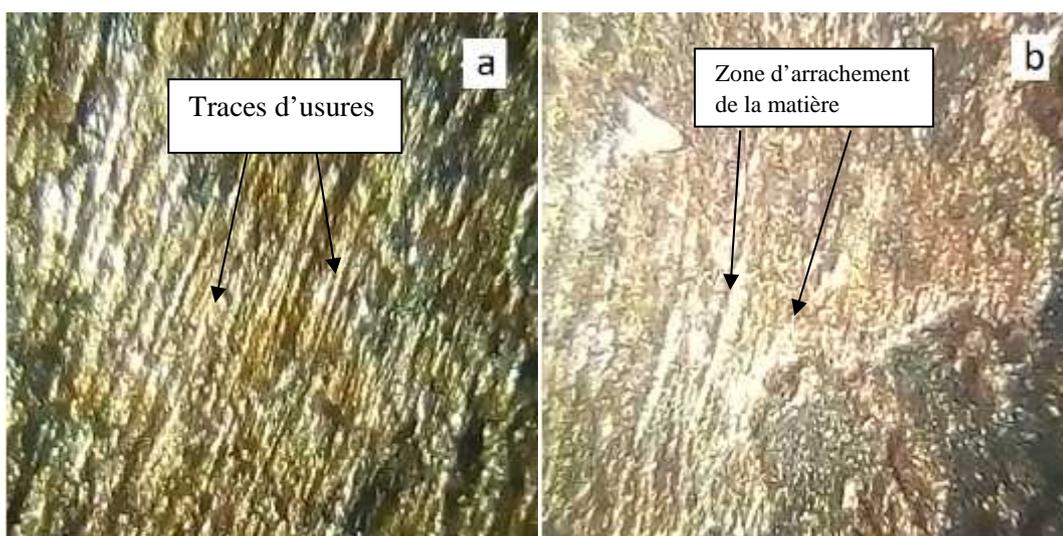


Figure III.20 : courbe comparative d'évolution de la température en fonction de la charge appliquée à des vitesses 0,5 (m/s), 1 (m/s).

On remarque que l'évolution de la température lors des deux essais est semblable mais elle est plus élevée à 1 (m/s) et cela s'explique par une agitation thermique très importante des atomes aux couches superficielles du dépôt lors de l'essai à 1 (m/s) ce implique un dégagement considérable de la chaleur, et ce qui apparait moins important lors de l'essai à 0,5 (m/s).

III.3. Microscopie optique de dépôt 21021

La microscopie optique nous a permis de mieux observer l'état de surface des trois échantillons. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure (III.21).



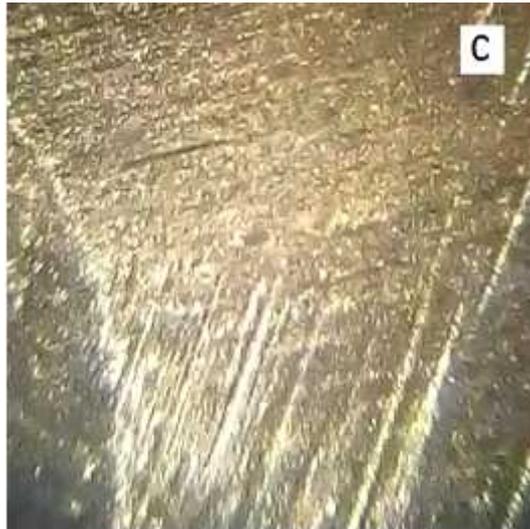


Figure III.21 : Traces d'usure des surfaces des différents échantillons obtenues après le test tribologique : **a**) 0.5 (m/s), **b**) 1(m/s), **c**) différentes charges appliquées.

On remarque que :

Pour l'échantillon **(a)** à la vitesse de 0,5 (m/s) : les traces d'usure commencent à apparaître sans arrachement de la matière.

Pour l'échantillon **(b)** à la vitesse de 1 (m/s) : les traces d'usure avec arrachement de la matière.

Pour l'échantillon **(c)** à des charges différentes que les traces d'usure apparaissent avec un arrachement de la matière plus important.

III.4. Détermination des paramètres tribologiques et thermiques du dépôt 21031

III.4.1 Influence des charges sur le comportement tribologique sous une vitesse de 0.5 (m/s) :

Dans cette partie nous allons étudier la perte de masse relative sous forme de courbes pour les différents échantillons avec un dépôt sous une charge 5 (N) et 30 (N), avec une vitesse de glissement de 0.5m/s pour observer, déduire et analyser leur comportement vis-à-vis du frottement et leur résistance thermique et à l'usure.

Résultats et discussions

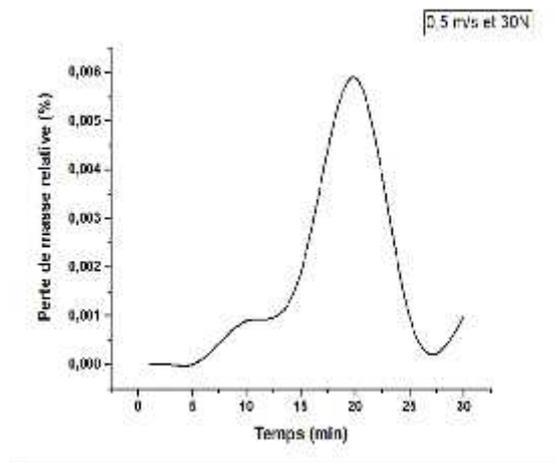
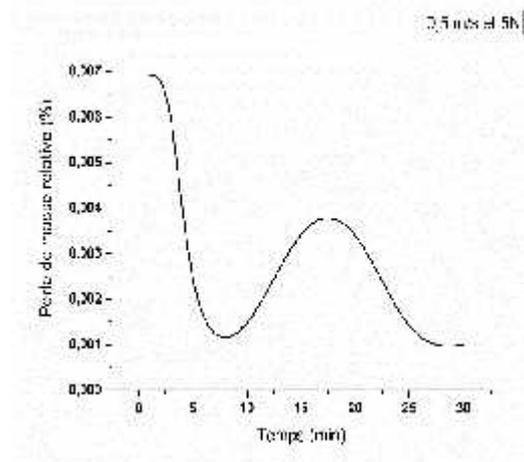


Figure III.22 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction du temps à 5 (N).

Figure III.23 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction du temps à 5 (N).

Pour la figure III.22 : on remarque que la perte de masse relative diminue au début de l'expérience puis augmente à partir de la dixième minute jusqu'à la valeur 0,004 (%) puis diminue encore à la vingtième minute jusqu'à la valeur 0,001(%).

Pour la figure III.23 : on remarque que la perte de masse relative est stable jusqu'à la quinzième minute où elle augmente rapidement jusqu'à la valeur 0,006 (%) puis diminue encore à la vingtième minute jusqu'à la valeur 0.001 (%).

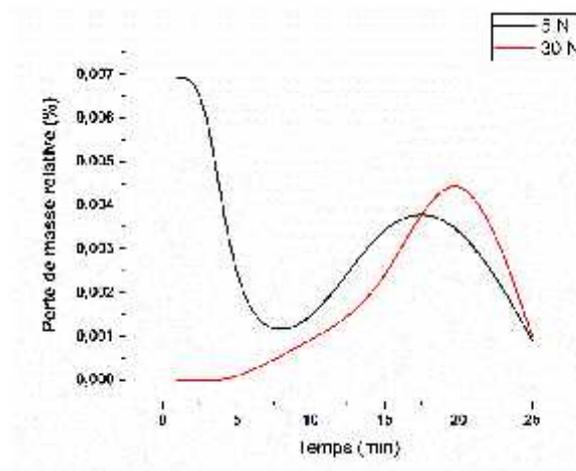


Figure III.24 : courbe comparative d'évolution de la perte de masse relative en fonction du temps sous deux charges 5 (N), 30 (N).

On remarque que la perte de masse relative au début de l'expérience est plus élevée pendant l'essai à 5 (N) mais à partir de la vingtième minute la perte de masse relative est très élevée lors de l'essai à 30 (N). Ces variations s'expliquent avec l'arrachement important de la matière

Résultats et discussions

qui présentent des impuretés et des phases transitoires au début de l'essai, mais à partir de la vingtième minute la perte de masse est plus élevée lors de l'essai à 30 (N) à cause des contraintes de cisaillements trop importantes à l'interface de contact entre le dépôt et le disque.

III.4.2. Influence des charges sur le comportement thermique à une vitesse de 0,5 (m /s) :

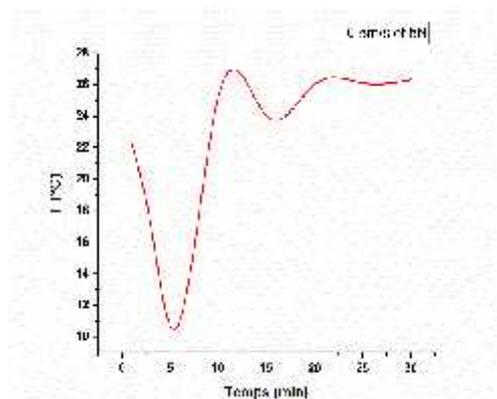


Figure III.25 : courbe d'évaluation de la température en fonction de temps à 5 (N).

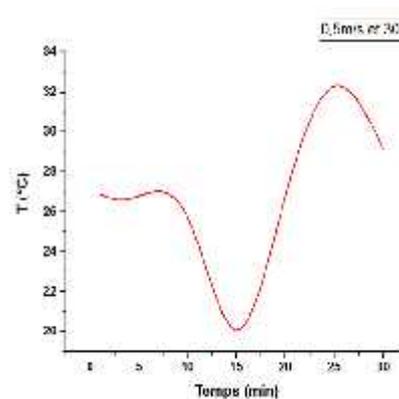


Figure III.26 : courbe d'évaluation de la température fonction de temps à 30 (N).

Pour la figure III.25 : on remarque que la température diminue au début de l'expérience puis augmente à la cinquième minute jusqu'à la valeur 26(°C) où elle demeure élevée jusqu'à la trentième minute mais avec des petites variations.

Pour la figure III.26 : on remarque que la température est stable à la valeur de 27(°C) jusqu'à la dixième minutes où elle diminue rapidement puis remonte à partir de la quinzième minute jusqu'à la valeur 32 (°C).

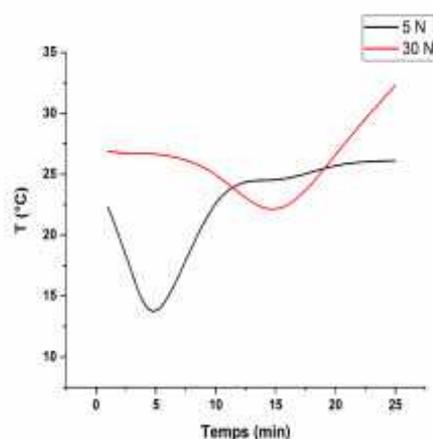


Figure III.27 : courbe comparative de l'évaluation de la température au cours du temps, sous deux charges 5 (N) et 30 (N) à 0,5 (m/s).

Résultats et discussions

On remarque que la température est plus élevée lors de l'essai sous la charge de 30 (N) que celle de l'essai sous la charge de 5 (N) mais cette dernière présente plus de variations au cours du temps. Cela est dû à l'agitation thermique trop importante des particules aux couches superficielles du dépôt lors de l'essai à 30 (N).

III.4.3. Influence des charges sur le comportement tribologique à une vitesse de 1 (m/s) :

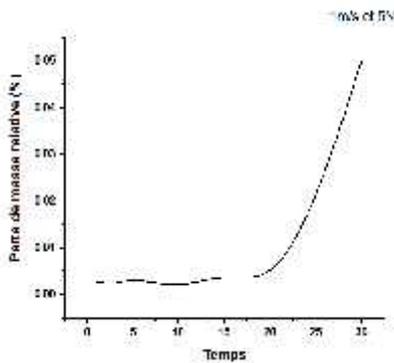


Figure III.28 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction du temps à 5 (N).

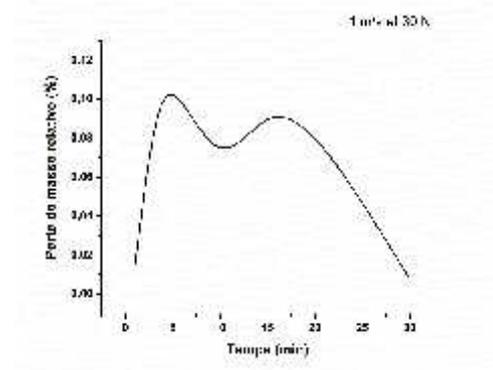


Figure III.29: courbe d'évolution de la perte de masse en fonction du temps à 30 (N).

Pour la figure III.28 : on remarque que la perte de masse relative est presque stable jusqu'à la vingtième minute puis augmente jusqu'à la valeur 0,05(%).

Pour la figure III.29 : on remarque que la perte de masse relative augmente jusqu'à la valeur 0,10 (%) puis varie jusqu'à la vingtième minutes puis diminue encore jusqu'à la valeur 0,01 (%) au bout de la trentième minute.

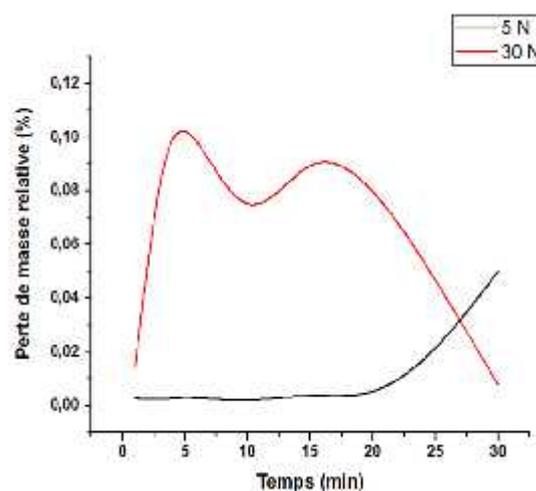


Figure III.30 : courbe comparative d'évolution de la perte de masse relative en fonction du temps sous deux charges 5 (N), 30 (N).

Résultats et discussions

On remarque que la perte de masse relative est plus élevée lors de l'essai à 30 (N) qu'à l'essai à 5 (N), cette différence s'explique avec la présence des contraintes de cisaillement très élevées sous la charge 30 (N) ce qui implique une perte de masse importante. Par contre l'essai de 5 (N) les contraintes de cisaillement à l'interface de contact sont très faibles et ne provoquent presque pas de perte de masse sauf légèrement à la fin de l'essai.

III.4.4. Influence des charges sur le comportement thermique à une vitesse de 1 (m/s) :

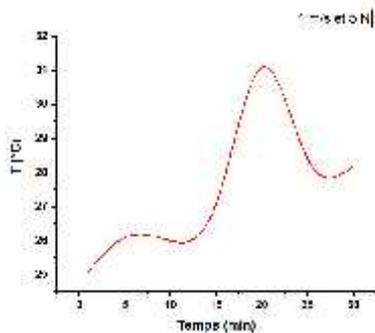


Figure III.31 : courbe d'évaluation de température en fonction de temps à 5 (N).

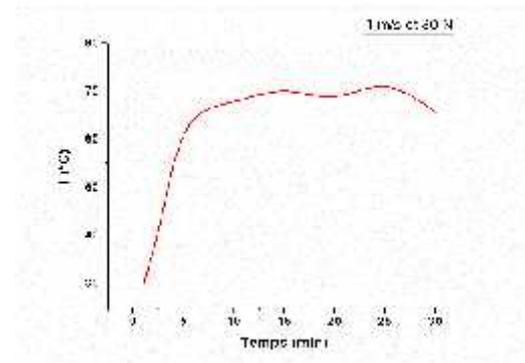


Figure III.32 : courbe d'évaluation de en fonction de temps à 30 (N).

Pour la figure III.31 : on remarque que la température est relativement stable jusqu'à la douzième minute puis elle augmente rapidement jusqu'à la valeur 31 (°C) suivi d'une diminution pondérée jusqu'à la fin de l'essai.

Pour la figure III.32 : on remarque au début de l'essai une augmentation rapide de la température jusqu'à la valeur 65 (°C) suivi d'un palier stable jusqu'à la fin de l'expérience.

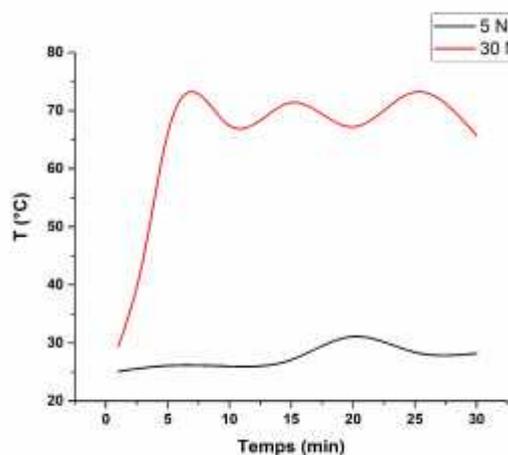


Figure III.33 : courbe comparative de l'évaluation de la température au cours du temps, sous deux charges 5 (N) et 30 (N) à vitesse de glissement de 1 (m/s).

Résultats et discussions

On remarque bien que la température lors de l'essai à 30 (N) a considérablement augmenté atteignant une valeur maximale de 72 (°C) par contre à 5 (N) la température a légèrement augmenté et n'a pas dépassé la valeur de 30 (°C). Ceci s'explique avec une agitation thermique trop importante des particules à l'interface d'usure sous la charge de 30 (N).

III.4.5. Influence des charges sur le comportement tribologique sous des vitesses différentes 0,5 (m/s), 1 (m/s) :

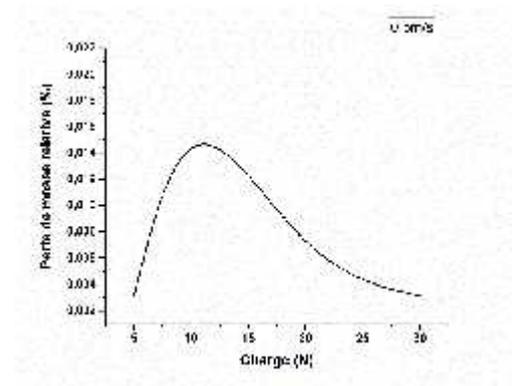


Figure III.34 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction de la charge à 0,5 (m/s).

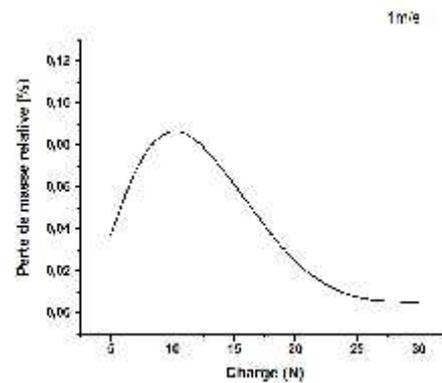


Figure III.35 : courbe d'évolution de la perte de masse en fonction de la charge à 1(m/s).

Pour la Figure III.34 : on remarque que la perte de masse relative augmente rapidement jusqu'à la valeur 0,014 (%) puis diminue progressivement à partir de la charge 10 (N) jusqu'à la valeur 0,004 (%).

Pour la Figure III.35 : on remarque que la perte de masse relative augmente rapidement jusqu'à la valeur 0,08 (%) puis diminue progressivement à partir de la charge 10 (N) jusqu'à la valeur 0,001 (%).

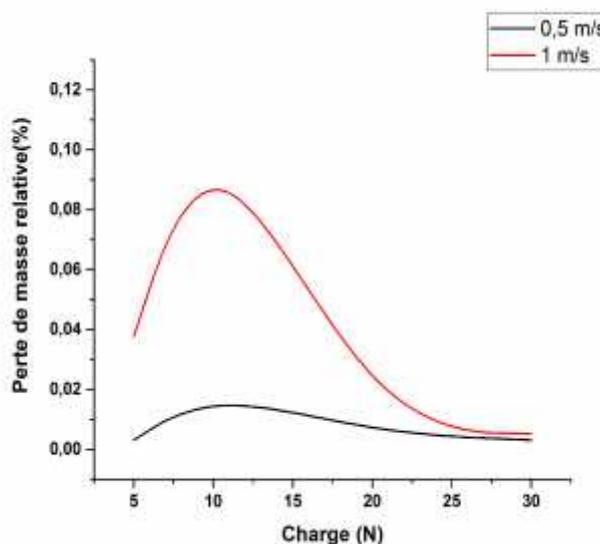


Figure III.36 : courbe comparative d'évolution de la perte de masse en fonction de la charge.

Résultats et discussions

On remarque que l'évolution de la perte de masse relative lors des deux essais est presque similaire mais elle est plus élevée lors de l'essai à vitesse de 1 (m/s) que celle à la vitesse de 0,5 (m/s). Cela s'explique avec une surface d'usure plus grande à la vitesse de 1 (m/s) ce qui implique une augmentation de la perte de masse au cours de l'essai.

II.4.6. Influence des charges sur le comportement thermique sous des vitesses différentes 0,5 (m/s), 1 (m/s) :

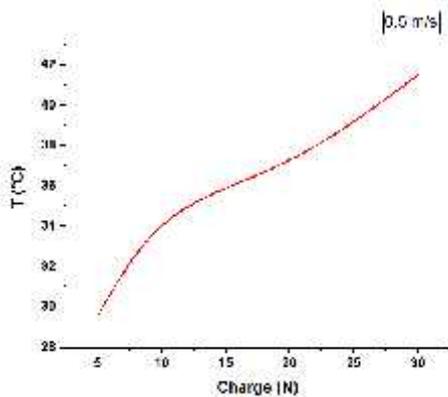


Figure III.37 : courbe d'évolution de la température en fonction de la charge.

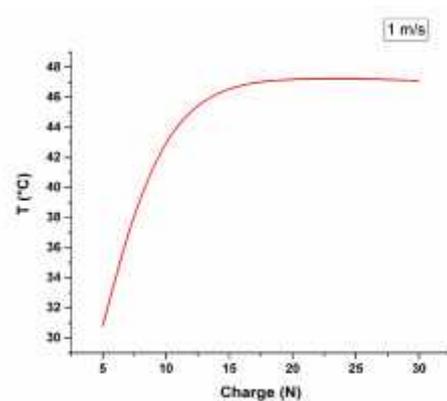


Figure III.38 : courbe d'évolution de la température en fonction de la charge.

Pour la figure III.37 : on remarque que la température est proportionnelle à la charge et augmente à chaque fois que la charge a augmenté.

Pour la figure III.38 : on remarque que la température a rapidement augmenté au début de l'essai jusqu'à la valeur 47 (°C) suivi d'une stabilité jusqu'à la fin de l'expérience.

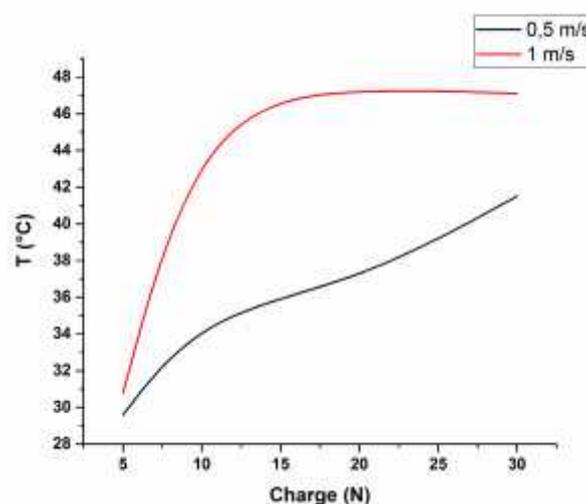


Figure III.39 : courbe comparative d'évolution de la température en fonction de la charge.

Résultats et discussions

On remarque que la température est plus élevée lors de l'essai à la vitesse de 1 (m/s) que celle à la vitesse de 0,5 (m/s) Ceci s'explique avec une agitation thermique trop importante des particules à l'interface entre le dépôt et l'acier lors de l'essai à la vitesse 1 (m/s).

III.5. Microscopie optique de dépôt 21031

La microscopie optique nous a permis de mieux observer l'état de surface des trois échantillons. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure (III.40).



Figure III.40 : Traces d'usure des surfaces des différents échantillons obtenue après le test tribologique : **a)** 0.5 (m/s), **b)** 1(m/s), **c)** différentes charges appliquées.

On remarque que :

Pour l'échantillon (a) : pas des traces d'usure.

Pour l'échantillon (b) : des traces d'usure.

Pour l'échantillon (c) : des zones d'arrachement de la matière et des porosités.

III.6. Étude comparative des paramètres thermiques des deux dépôts 21021 21031 en fonctions de la vitesse et de la charge appliquée

Dans ce qui suit on illustrera l'évolution de la température des deux dépôt 21021 et 21031 sous forme de courbe en fonction des vitesses de glissement 0,5 (m/s), 1 (m/s) et en fonction des charges appliquées.

Résultats et discussions

III.6.1. Évolution de la température à vitesse de glissement 0,5 (m/s) :

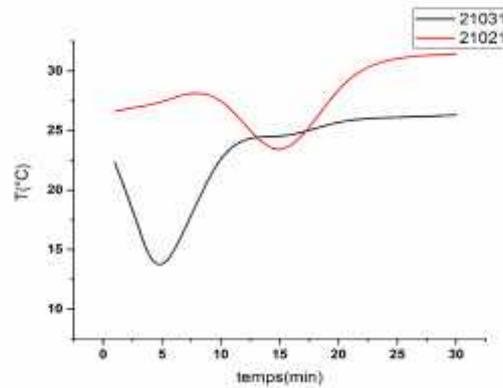


Figure III.41 : évolution de la température des deux dépôts en fonction du temps sous une charge de 5 (N).

On remarque que la température du dépôt 21021 au début de l'essai est relativement stable qui décroît à partir de la dixième minute suivi d'une augmentation jusqu'à la fin de l'essai. Tandis que la température du dépôt 21031 décroît au début de l'essai suivie d'une augmentation rapide jusqu'à la dixième minute puis une stabilité jusqu'à la fin de l'essai.

On peut dire que la température d'usure du dépôt 21021 est plus élevée que celle du dépôt 21031 mais elles sont presque égales aux environs de la quinzième minute.

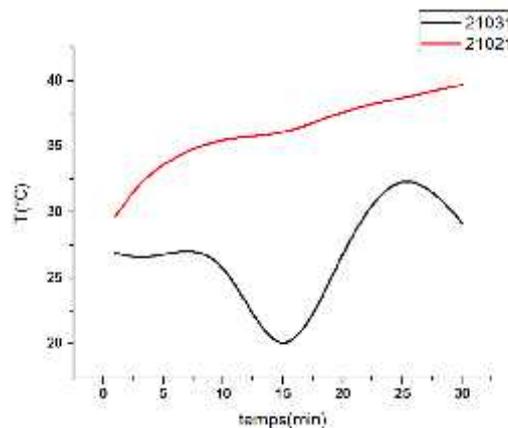


Figure III.42 : évolution de la température des deux dépôts en fonction du temps sous une charge de 30 (N).

On remarque que la température de dépôt 21021 augmente rapidement au début de l'essai suivi d'une augmentation lente jusqu'à la fin de l'essai. Tandis que la température du dépôt 21031 est stable jusqu'à la dixième minute suivi d'une diminution et qui augmente encore à

Résultats et discussions

partir de la quinzième minute. En générale on remarque que la température du dépôt 21021 pendant l'essai d'usure est nettement plus élevée qu'à celle du dépôt 21031.

III.6.2. Évolution de la température de deux dépôts à une vitesse de glissement 1 (m/s) :

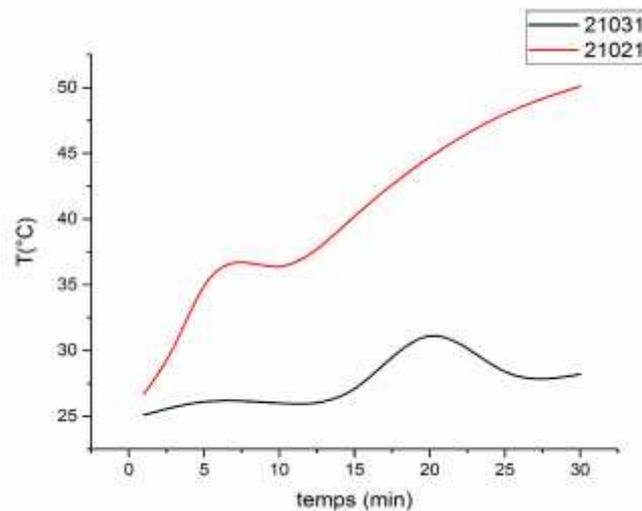


Figure III.43 : évolution de la température en fonction du temps sous une charge de 5 (N).

On remarque que la température du dépôt 21021 au cours de l'essai augmente de manière progressive alors la température d'usure du dépôt 21031 est relativement stable suivie d'une petite variation à partir de la quinzième minute. L'essai nous montre que la température du dépôt 21021 est clairement plus élevée que celle du dépôt 21031.

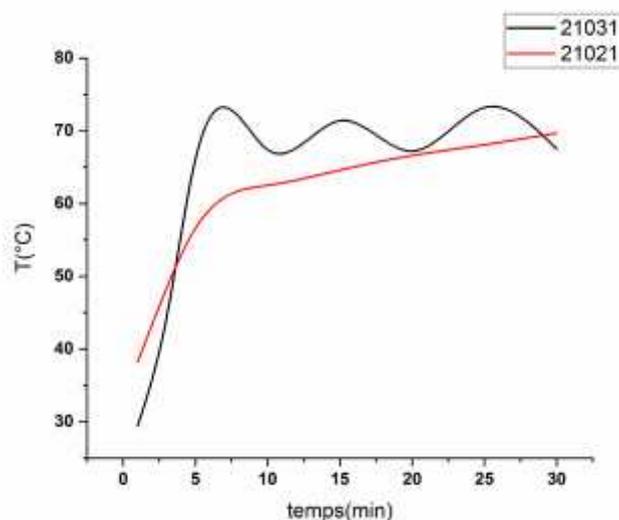


Figure III.44 : évolution de la température en fonction du temps sous une charge de 30 (N).

Résultats et discussions

On remarque que la température des deux dépôts augmente rapidement au début de l'essai mais à partir de la cinquième minute celle du dépôt 21021 continue d'augmenter mais lentement alors que celle du dépôt 21031 connaît des variations jusqu'à la fin de l'essai.

On peut déduire que le comportement thermique des deux dépôts est semblable mais avec une température du dépôt 21031 légèrement plus élevée que celle du dépôt 21021.

L'étude comparative du comportement thermique des deux échantillons avec deux vitesses et sous deux charges différentes 5 (N) et 30 (N), nous a montré que les températures lors des essais d'usure pour le dépôt 21021 sont plus élevées que celles du dépôt 21031, ceci s'explique avec la microstructure du dépôt 21021 qui se caractérise par une dureté très élevée et une capacité de dissipation de chaleur très grande, ces deux propriétés sont améliorées grâce à l'ajout du Molybdène dans l'alliage Aluminium-Nickel.

III.6.3. Évolution de la température en fonction de la charge à une vitesse 0,5 (m/s) :

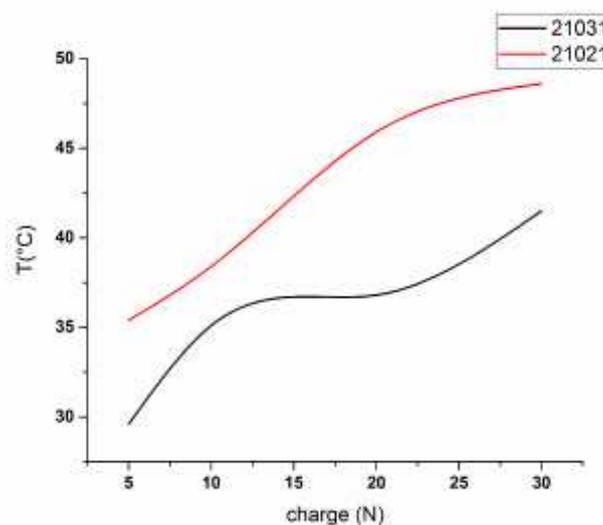


Figure III.45 : évolution de la température des deux dépôts en fonction la charge.

On remarque que la température du dépôt 21021 croît de manière progressive et celle du dépôt 21031 croît jusqu'à la dixième minute suivi d'une stabilité puis elle croît encore à partir de la vingt cinquième.

On déduit que la température du dépôt 21021 pendant l'essai d'usure est remarquablement plus élevée que celle du dépôt 21031.

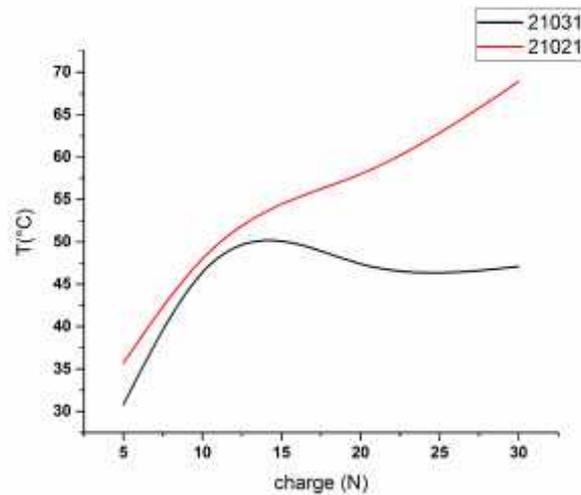


Figure III.46 : évolution de la température des deux dépôts en fonction la charge à vitesse de glissement 1 (m/s).

On remarque que la température du dépôt 21021 pendant l'essai d'usure augmente de manière progressive jusqu'à la fin de l'essai, alors que la température du dépôt 21031 augmente jusqu'à la quinzième minute suivie d'une diminution pondérée jusqu'à la fin de l'essai.

On peut dire que l'évolution des deux températures a été semblable jusqu'à la quinzième minute puis la température du dépôt 21021 est devenu plus élevée que celle du dépôt 21031.

L'étude du comportement thermique des deux échantillons en fonction de la charge et à deux vitesses nous a montré que la température lors des essais d'usures pour le dépôt 21021 est plus élevée que celle du dépôt 21031, cette différence s'explique avec la microstructure du dépôt 21021 qui se caractérise par une capacité de dissipation de chaleur très grande et une dureté très élevée.

*Conclusion
générale*

Conclusion générale

Tout d'abord il est important de comprendre que l'usure des pièces est l'une des causes principale de la dégradation et l'endommagement des pièces mécaniques. Dans notre cas nous avons choisi l'étude de l'usure par abrasion, ce type d'usure se traduit par un déplacement de matière sur la surface en contact, et il peut être fortement limité en connaissant les propriétés physiques et mécaniques des pièces mécaniques avant l'usage.

Ce mémoire avait pour objectif de mettre en évidence la différence du comportement thermique et tribologique entre deux dépôts différents et de distinguer celui qui possède les meilleures propriétés physique et mécanique les plus adéquates pour les essais mécaniques.

Notre travail est une étude comparative portée sur deux types de dépôt le premier est le 21021 (Ni-Al-Mo) et le deuxième est le 21031 (Ni-Al)

Les observations au microscope électronique à balayage obtenus pour les dépôts Ni-Al-Mo et Ni-Al ont montré que :

- Des particules non fondues et des porosités pour le 21031.
- Des oxydes d'Aluminium (Al_2O_3) pour le 21031.
- Une structure dense et compacte pour le 21021.
- Des oxydes à base de Molybdène pour le 21021.

Les essais tribologique effectuées sous différentes charge et sous des vitesses de 0,5 (m/s) et 1 (m/s) ont révélé que :

- La perte de masse augmente avec l'augmentation de la vitesse, et de la charge imposée.
- Le dépôt 21031 perd plus de masse en fonction des deux paramètres que le dépôt 21021.
- Le dépôt 21021 résiste mieux aux phénomènes de l'usure que le dépôt 21031.

- Il ressort donc, que les paramètres mécaniques et la nature des matériaux jouent un rôle important et déterminent la durée de vie des couples étudiées.

- Les facteurs charges et vitesses ont une influence significative sur l'usure du dépôt 21031 (Ni-Al), et leurs effets demeure faible pour les contacts étudiés sur le dépôt 21021 (Ni-Al-Mo).

Conclusion générale

Les températures de contact au niveau de interface ont révélé que :

- Le dépôt 21021 peut dissiper plus de chaleur que le dépôt 21031.
- La température à l'interface augmente avec l'augmentation de la vitesse.
- La température à l'interface augmente avec l'augmentation de la charge imposée.

Les essais tribologiques sous différentes charges ont permis de caractériser l'usure et l'énergie dissipée (température) pour les couples étudiés. Pour le couple 21031/Acier, l'usure est plus importante ce qui génère une température de contact plus élevée. Tandis que le couple 21021/Acier, le régime est caractérisé par une faible augmentation d'usure, lorsque l'énergie dissipée croît, ceci s'explique par la présence de l'élément du molybdène qui fait dissiper la température et stabilise la perte de masse.

Les résultats des essais d'usure ne peuvent pas être généralisés à cause de l'influence des différents facteurs sur l'usure, ceci nous amène donc à formuler des réserves, le modèle s'applique aux essais d'usure pratiqués en laboratoire (conditions de température fixes, protocoles expérimentaux respectés).

Perspectives et recommandations:

En dépit des résultats obtenus, nous sommes conscient que ce travail est une première approche et il pourrait être complété par :

- Détermination des coefficients de frottements.
- Simulation des tests assistée par ordinateur donne une approche plus précise des résultats.
- Détermination de la nature des phases par diffraction X.

Références
Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **L. Pawlowski**, the science and engineering of thermal spray coatings, John Wiley & sons, Ltd, England (2003).
- [2] **R.W .Smith, R .Novak**, Advances and application in us thermal spray Technologie and Materials, Powder Metallurgy international.
- [3] Guide pratique de la projection thermique.
- [4] **Alain Prôner**, Revêtement par projection thermique techniques de l'ingénieur, traité matériaux métalliques.
- [5] **A. Prôner**, Revêtements par projection thermique, technique de l'ingénieur.
- [6] **E. Pfender**, Fundamental studies associated with the plasma Spray Process, Thermal Spray, Advances in coatings Technology, (Ed.) C .C Berndt. (Pt). ASM International, Materials Park. Ohio, USA.
- [7] **P. Fauchais, A. Vardelle, B. Dassoubs**, Quo Vadis Thermal spraying, Thermal spray Technology, vol. 10 (N° 1), (2001).
- [8] **S. Narouzi**, contribution à l'étude du procédé arc –fil pour la réalisation de dépôts Métalliques durs résistants à l'usure abrasive. Thèse de doctorat, Université de Limoges, France, (2004).
- [9] **K. Belkacem**, élaboration par projection plasma d'arc de dépôts de Zircone et d'Alumine croissance colonnaire, contraintes résiduelles et modélisation. Thèse de doctorat, Université de Limoges, France.
- [10] **M. Vardelle**, Etude de la structure des dépôts d'alumine obtenus par projection plasma en fonction des températures et des vitesses des particules au moment de leur impact sur la cible, Thèse de troisième cycle, Université de Limoges, France.
- [11] **S. Valette**, Influence de la pré-oxydation d'un acier sur l'adhérence de son revêtement en alumine Déposé par voie plasma thermique, Thèse de doctorat, Université de Limoges, France (2004).
- [12] **Thermal Spraying: Practice, theory and application**, committee on thermal spraying, American welding society, Miami, USA.
- [13] **M. L. Thorpe**, Thermal spray application, Advanced Materials and processes, vol. 10.
- [15] **K. H. Busse**, Arc spraying of cored wires, Sprayter GmbH, Germany.
- [16] **H. Drzniek, H. D. Steffens**, cored tube wires Arc And flame spraying, proceedings of 10 Th ITSC.
- [17] **S. Dallaire, H. Levert**, phenomen ology retive cored wire Arc spraying: International Advances incoating Technology, (Ed.) C. C. Berndt,(pub.) ASM International, Materials Park Ohio, USA.
- [18] **M. Khalid Fataouiz**, "Développement de modèles thermomécaniques de construction de dépôts obtenus par projection thermique", Thèse de Doctorat, Université Chouaib Doukkalli El-Jadida, Maroc, (2007).
- [19] **J. Deruelle**, Préparation des surfaces – Introduction Techniques de l'ingénieur M1435

Références bibliographiques

- [20] **R. Jules**, études des problèmes dynamiques de contact et de frottement. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, France.
- [21] **M. Vardelle, S. Bousard, P. Fauchais, C. Bossoutrou, F. Braillard**, Laboratoire Sciences des Procédés et de Traitements de Surfaces (SPCTS), UMR-CNRS 6638. Journée Scientifique barrière thermique ONERA. Limoges, France. (2002).
- [22] **R. Gheriani**, Influence de la projection de phases dans le domaine de températures (400c° -1000c°) sur des films de Ti et de Cr, déposé sur des substrats aciers, Thèse de doctorat, Université de Constantine (2005).
- [23] **G.Zambelli, L.Vincent**, Matériaux et Contacts – une approche tribologique, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- [24] **F. Gazanion**, Amélioration de la résistance à l'usure abrasive du titane grâce à la réalisation de traitement de surface par laser. Mémoire de grade maître en sciences (M. Sc.), Faculté des études supérieures de l'Université de Laval, juillet (2000).
- [25] **R. Younes, A. Hanni**, Influence des post-traitements sur la tenue à l'usure d'un dépôt à base du fer réalisé par projection thermique. Mémoire Master en génie mécanique, option maintenance industrielle, Université de Béjaia (2012).
- [26] **F. Robbe-Valoire, B. Baffoni, R. Progrid**, Load transmission by elastic, elasto-plastic or fully plastic deformation of rough interface asperities, *Mechanics of Materials*, (2001).
- [27] **M. Levesque**, Etude du comportement l'usure de divers revêtements obtenus par pulvérisation cathodique à magnétron et par nitruration ionique. Mémoire de grade maître en sciences (M. Sc.), Faculté des études supérieures de l'Université de Laval, septembre.
- [28] **R. Jules**, études des problèmes dynamiques de contact et de frottement. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, France.
- [29] **J.J. Caubet**, dans son livre « Théorie et pratique industrielle du frottement » édition diamond (2001).
- [30] **A. Nady**, Caractérisation par diffraction des neutrons et rayonnement de revêtement épais a base de cobalt obtenu par le procédé plasma à arc transféré, Thèse de doctorat, Université de Reims, France.
- [31] **J.J Salgon, F. Robbe-Valoire, J. Blouet et J. Bransier**; A mechanical and geometrical approach to thermal contact resistance ; *Int. J. Heat Mass Transfer*.
- [32] **L. Mazo, B. Cassagne, D. Badie-Levet et J.P. Bardon** ; Etude des conditions de liaison thermique dans le cas du frottement sec métal-plastique ; *Rev. Gén. Therm. Fr.*
- [33] **F. Robbe-Valloire et J. Blouet** ; Traitement statique des données. Applications à la métallurgie des surfaces ; *Mécanique Matériaux Electricité*.
- [34] **J. Denape, and N. Laraqi**, Aspect thermique du frottement: mise en évidence expérimentale et éléments de modélisation, *Mécanique & Industries*, 1, 563-579,(2000).

Références bibliographiques

- [35] **E. Guillot**, Etude expérimentale des transferts de chaleur à une interface pièce-outil de coupe, Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, (2009).
- [36] **J. P. Bardon**, Bases physiques des conditions de contact thermique imparfait entre milieux en glissement relatif, *Revue Générale de Thermique*, Fr.386.
- [37] **J. P. Bardon**, Heat transfer at solid-solid interface: Basic phenomenon, Recent works, Proc. Eurotherm N° 4, Nancy.
- [38] **K. J. Negus, M. M. Yovanovich, and J. V. Beck**, On the non dimensionalization of constriction resistance for semi-infinite heat flux tubes, *ASME Journal of Heat Transfer*, 111:804-807.
- [39] **B. Bourouga ; J. P. Bardon**, La résistance thermique de constriction en régime périodique établi, Congrès annuel de la SFT, Pau.
- [40] **N. Laraqi**, Thermal impedance and transient temperature due to a spot of heat on a half space. *International Journal of Thermal Sciences*, 49:529–533, (2010).
- [41] **A. Degiovanni, G. Sinicki, A. Gery et M. Laurent**, Un modèle de résistance thermique de contact en régime permanent, *Revue Générale de Thermique*, Fr. N° 267, 161 :175.
- [42] **N. Laraqi, A. Bairi**, Theory of thermal resistance between solids with randomly sized and located contacts, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45:4175-4180, (2002).
- [43] **N. Laraqi**, Velocity and relative contact size effects on the thermal constriction resistance in sliding solids, *ASME J. Heat Transfer*, 119: 173-177, February.
- [44] **B. Bourouga, J. P. Bardon**, La résistance thermique de constriction en régime Périodique établi, Congrès annuel de la SFT, Pau.
- [45] **K. J. Negus, M. M. Yovanovich and J. C. Thompson**, Constriction resistance of circular contacts on coated surfaces: Effect of boundary conditions, *J Thermophysics*, vol 2, N° 2:158-164.
- [46] **V. W. Antonetti and M. M. Yovanovich**, Enhancement of thermal contact conductance by metallic coatings: Theory and experiment, *ASME Journal of heat transfer*, 107:513519.
- [47] **B. Mazo, B. Cassagne, D. Badie-Levet et J. P. Bardon**, Etude des conditions de liaison thermique dans le cas du frottement métal-plastique, *Revue générale de thermique*, Fr. N° 204, 919-933.
- [48] **D. Badie-Levet**, Les champs de température engendrés par le frottement de deux anneaux concentriques en rotation relative, dans le cas d'une condition de contact parfait, *Revue générale de thermique*, Fr. N° 275, 671-679.
- [49] **N. Laraqi**, Phénomène de constriction thermique dans les contacts glissants, *Int.J.Heat mass Transfer*, Vol 38, No.17, 3717-3724.
- [50] **Y. S. Muzychka and M. M. Yovanovich**, Thermal resistance models for non-circular moving heat sources on a half space. *ASME, Journal of Heat Transfer*, 123:624–632, (2001).
- [51] **B. Salti, N. Laraqi**, 3-D numerical modelling of heat transfer between two sliding bodies: temperature and thermal contact resistance, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 42:2363-2374.
- [52] **Baunar** Annale de chimie.

Annexe

Annexe

Résultats obtenu par l'essai d'usure pour le dépôt 21021 (Ni-Al-Mo)

$V = 0,5$ (m/s);

$P = 5$ (N);

$M_0 = 7,9218$ (g).

temps (min)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	M	M/M0(%)
1	7,9213	26,6	0,0005	0,0063
3	7,9209	27,02	0,0004	0,0050
5	7,9211	27,3	0,0002	0,0025
10	7,9213	29,3	0,0002	0,0025
15	7,9205	20,4	0,0008	0,0101
20	7,9178	29,7	0,0027	0,0340
25	7,9161	31,3	0,0017	0,0214
30	7,9135	31,4	0,0026	0,0328

$V = 0,5$ (m/s);

$P = 30$ (N);

$M_0 = 7,9134$ (g).

Charge (N)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	M	M/M0(%)
1	7,913	29,7	0,0004	0,0050
3	7,9126	32,1	0,0004	0,0050
5	7,9076	33,6	0,005	0,0631
10	7,8885	35,5	0,0191	0,2413
15	7,8732	36,1	0,0153	0,1933
20	7,8706	37,6	0,0026	0,0328
25	7,8701	38,7	0,0005	0,0063
30	7,869	39,7	0,0011	0,0139

$V = 1$ (m/s);

$P = 5$ (N);

$M_0 = 8,8999$ (g).

temps (min)	Masse Finale M1 (g)	T (°C)	M	M/M0(%)
1	8,8968	26,7	0,0029	0,0325
3	8,8897	30,3	0,0071	0,0797
5	8,8669	34,9	0,0228	0,2561
10	8,812	36,4	0,0549	0,6168
15	8,7558	40,2	0,0562	0,6314
20	8,6957	44,7	0,0601	0,6753
25	8,6515	48	0,0442	0,4966
30	8,6252	50,1	0,0263	0,2955

Annexe

$V = 1$ (m/s);

$P = 30$ (N);

$M_0 = 8,6252$ (g).

Charge (N)	Masse Finale M1 (g)	T (°C)	M	M/M0(%)
1	8,6178	38,2	0,0074	0,0857
3	8,6063	48,3	0,0115	0,1333
5	8,5956	56,6	0,0107	0,1240
10	8,5865	62,5	0,0091	0,1055
15	8,5787	64,6	0,0078	0,0904
20	8,5737	66,6	0,005	0,0579
25	8,565	68,1	0,0087	0,1008
30	8,561	69,7	0,004	0,0463

$V = 0,5$ (m/s);

$T = 30$ (min);

$M_0 = 8,9132$ (g).

Charge (N)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	M	M/M0(%)
5	8,8959	35,4	0,0173	0,1940
10	8,8877	38,4	0,0082	0,0919
20	8,8706	45,9	0,0171	0,1918
30	8,8666	48,6	0,004	0,0448

$V = 1$ (m/s);

$T = 30$ (min);

$M_0 = 8,8866$ (g).

Charge (N)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	M	M/M0(%)
5	8,8615	35,7	0,0051	0,0575
10	8,8489	48	0,0126	0,1421
20	8,8368	58	0,0121	0,1364
30	8,8222	68,9	0,0146	0,1646

Annexe

Résultats obtenu par l'essai d'usure pour le dépôt 21031 (Ni-Al)

$V = 0,5$ (m/s);

$P = 5$ (N);

$M_0 = 10,0433$ (g).

Charge (N)	Masse Finale M1 (g)	T (°C)	M	M/M0(%)
1	10,0426	17,1	0,0007	0,0069
3	10,0416	10,7	0,001	0,0099
5	10,0428	25,2	0,0012	0,0119
10	10,042	24	0,0008	0,0079
15	10,046	26	0,004	0,0398
20	10,01415	26,1	0,0318	0,3171
25	10,0416	26,3	0,0274	0,2733
30	10,0417	26,3	1E-04	0,0010

$V = 1$ (m/s);

$P = 5$ (N);

$M_0 = 10,0416$ (g).

Charge (N)	Masse Finale M1 (g)	T (°C)	M	M/M0(%)
1	10,0416	26,9	0	0
3	10,042	26,9	0,0004	0,004
5	10,0419	26,6	1E-04	0,001
10	10,0416	26,8	0,0003	0,0029
15	10,0413	26,7	0,0003	0,003
20	10,0407	26,1	0,0006	0,006
25	10,0406	32,3	1E-04	0,001
30	10,0408	29,2	0,0002	0,002

$V = 1$ (m/s);

$P = 30$ (N);

$M_0 = 10,3595$ (g).

Charge (N)	Masse Finale M1 (g)	T (°C)	M	M/M0(%)
1	10,3485	29,4	0,0015	0,0145
3	10,339	44,2	0,0095	0,0918
5	10,3273	66,1	0,0117	0,1130
10	10,3211	67,4	0,0062	0,0599
15	10,3109	71,4	0,0102	0,0985
20	10,3023	76,2	0,0086	0,0831
25	10,2974	73,2	0,0049	0,0473
30	10,2966	76,5	0,0008	0,0078

Annexe

V = 1 (m/s);

P = 30 (N);

M₀ = 10,35 (g).

Charge (N)	Masse Finale M1 (g)	T (°C)	M	M/M0(%)
1	10,3592	25,1	0,0003	0,0029
3	10,359	25,7	0,0002	0,0019
5	10,3586	26,1	0,0004	0,0038
10	10,3581	26	0,0005	0,0049
15	10,358	27,1	1E-04	0,0009
20	10,3558	31,1	0,0022	0,0212
25	10,3506	28,4	0,0052	0,0502
30	10,35	28,2	0,0006	0,0058

V = 0,5 (m/s);

T = 30 (min);

M₀ = 9,509 (g).

Charge (N)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	M	M/M0(%)
5	9,5087	29,6	0,0003	0,0031
10	9,5068	35,1	0,0019	0,0199
20	9,5063	36,8	0,0005	0,0052
30	9,506	41,5	0,0003	0,0031

V = 1 (m/s);

T = 30 (min);

M₀ = 9,524 (g).

Charge (N)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	M	M/M0(%)
5	9,5204	30,8	0,0036	0,0378
10	9,5091	46,4	0,0113	0,1186
20	9,5085	47,1	0,0006	0,0063
30	9,5079	50,7	0,0006	0,0063

Résumé

L'usure reste l'une des principales causes d'endommagement des pièces mécanique, afin de mieux connaître la résistance de certains dépôts à l'usure, nous avons soumis deux échantillons (Ni-Al-Mo) et (Ni-Al) à des tests d'usure en modifiant à chaque fois l'un des paramètres tout en observant leurs comportement thermique et tribologique comparativement.

La caractérisation microstructurale des échantillons a été déterminée par microscope optique et microscope électronique à balayage (MEB), et a bien montré la morphologie et les différences entre les microstructures des deux dépôts

Les tests d'usure ont été de type « pion-disque », et nous ont permis de bien déterminer les comportements thermiques et tribologiques et d'en conclure quelques propriétés à propos de la réaction de ces deux dépôts face à l'usure.

Abstract

Wear remains one of the main causes of damage to mechanical parts, to better know the resistance of some deposits to wear, we submitted two samples (Ni-Al-Mo) and (Ni-Al) to wear tests by modifying one of the parameters each time while observing their comparative thermal and tribological behavior.

The microstructural characterization of the samples was determined by optical microscope and scanning electron microscope (SEM), and showed the morphology and differences between the microstructures of the two deposits.

The wear tests were of the "pion-disk" type, and allowed us to correctly determine the thermal and tribological behaviors and to conclude some properties about the reaction of these two deposits in the face of wear.