

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 : MATÉRIAUX POUR L'INGÉNIEURIE MÉCANIQUE

PAR :

LARAB NAIMI

CHALAL OUALID

Thème

Contribution à l'optimisation des pertes d'énergies d'une pièce tournante à l'aide d'une lubrification optimale combiné d'un dépôt obtenu par projection thermique.

Devant le jury composé de:

Président : Pr BRADAI M A

Rapporteur : Dr YOUNES R

Examineur : Dr SADEDDINE A

Examineur : Dr AMARI DJ

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2016-2017

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 vont à Mr R.YOUNES, notre promoteur, pour son aide, ces 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, l'équipe d'Algérie Métallisation de Rouïba

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

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

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers respectueux parents :

Vraiment aucune dédicace ne saurait exprimer mon attachement, mon amour et mon affection. Je vous offre ce travail en témoignage de tous les sacrifices et l'immense tendresse dont vous m'avez toujours su combler.

A mes frères

A mes sœurs

Puisse dieu tout puissant vous garder et vous procurer santé et bonheur.

A mes chers amis : qui ont été a mes cotés et m'ont toujours soutenu.

A mon binôme et sa famille.

Et a tout les membres de ma famille petits et grands.

Naimi

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers respectueux parents et grand parents :

Vraiment aucune dédicace ne saurait exprimer mon attachement, mon amour et mon affection. Je vous offre ce travail en témoignage de tous les sacrifices et l'immense tendresse dont vous m'avez toujours su combler.

A mon frère : ouassaa

A mes sœurs :

Puisse dieu tout puissant vous garder et vous procurer santé et bonheur.

A souad

A mes chers amis qui ont été a mes cotés et m'ont toujours soutenu.

A mon binôme et sa famille.

Et a tout les membres de ma famille petits et grands.

A mes collègues.

A toutes les personnes qui m'ont aidé et soutenu de près ou de loin.

oualid

SOMMAIRE

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I: Eléments bibliographiques

I.1. projection thermique	3
I.1.1. Historique.....	3
I.1.2. Définition	4
I.1.3. Principe de la projection thermique	4
I.1.4. Différents types de procédés de projection thermique	5
I.1.4.1. Projection par arc électrique entre deux fils	5
I.1.4.2. Projection flamme	7
I.1.4.2.1. Projection flamme poudre	8
I.1.4.2.2. Projection flamme fil	9
I.1.4.2.3. Projection au canon a détonation	10
I.1.4.2.4. Projection a tir continu	11
I.1.4.3. La torche plasma	12
I.1.4.4. Les plasmas à arc soufflé ou à arc non transféré (PTA)	13
I.1.4.5. Les plasmas à arc transféré	14
I.1.5. Construction d'un dépôt	15
I.1.6. Paramètres de projection influant sur le dépôt.....	17
I.1.7. Préparation de surface	18
I.1.7.1. Dégraissage	18
I.1.7.2. Décapage	18
I.1.7.3. Polissage	19

sommaire

I.1.7.4. Sablage	20
I.1.7.5. Préchauffage	20
I.2. Les dépôts	20
I.2.1. Propriétés du molybdène	21
I.2.2. Structure cristalline du Mo	23
I.3. La lubrification	24
I.3.1. Types de lubrification	24
I.3.2. Les types de lubrifiants	26
I.3.2.1. Les graisses	27
I.3.2.2. Les huiles	27
I.3.2.3. Les lubrifiants solides	27
I.3.2.4. Les pâtes	28
I.3.3. Caractéristique des lubrifiants	28
I.3.3.1. La viscosité	28
I.3.3.2. Viscosité cinématique (ν)	28
I.3.3.3. Viscosité dynamique (μ)	28
I.3.3.4. Le point d'écoulement	29
I.3.4. Principales classifications	29
I.3.4.1. Classification des lubrifiants par le domaine d'utilisation	29
I.3.4.2. Classification ISO	30
I.3.4.3. Classification SAE	30
I.3.5. Analyses physico-chimiques	31
I.3.5.1. La viscosité	31
I.3.5.2. L'indice de viscosité(VI)	31
I.4. La tribologie	32
I.4.1. Surface	32
I.4.2. Le circuit tribologique	33

sommaire

I.4.3. Paramètres fonctionnels	34
I.4.3.1. Mode de contact	34
I.4.3.2. La charge du contact	34
I.4.3.3. La vitesse du contact	35
I.4.4. Les différents types d'usure	35
I.4.5. Evaluation de l'usure	37
I.4.6. Le frottement	37
I.4.6.1. Types de frottement	38
I.1.6.1.1. Frottement sec	38
I.1.6.1.2. Frottement hydrodynamique	39
I.1.6.1.3. Frottement hydrodynamique	39
Chapitre II: Matériaux techniques expérimentales	
II.1. Matériaux utilisés	40
II.1.1. Le substrat	40
II.1.2. Dépôts réalisés	40
II.2. Présentation des échantillons	41
II.2.1. Elaboration des échantillons	41
II.2.2. Préparation des surfaces à revêtir	42
II.2.2.1. Dégraissage	42
II.2.2.2. Sablage	42
II.2.2.3. Préchauffage	43
II.3. Réalisation des dépôts	43
II.3.1. Paramètres de projection	43
II.3.2. Pistolet utilisé	43
II.4. Test tribologique	44
II.4.1. Préparation des échantillons pour les essais d'usure	44
II.4.2. Tests Tribologique	44

sommaire

II.4.3. Principe du test d'usure	46
II.4.4. Procédure des essais	46
II.4.5. Les paramètres à prendre en compte lors des tests d'usure	47
II.5. Observation métallurgique	47
Chapitre III: Résultats et discussions:	
III.1. La caractérisation microstructural	48
III.1.1. faciès d'usure des surfaces des échantillons avec ou sans dépôt réalisé par microscope optique(MO)	48
III.2. Perte de masse relative des différents échantillons réalisés	54
III.2.1. Perte de masse relative en fonction du temps a des vitesses de glissement 0.5m/s et 1m/s à charge fixe de 10N et 30N pour échantillons en acier a régime sec ou lubrifié	55
III.2.2. Perte de masse relative en fonction du temps à des vitesses de glissement 0.5m/s et 1m/s à charge fixe de 10N et 30N pour échantillons en molybdène régime sec ou lubrifié	57
III.2.3. Perte de masse relative en fonction du temps à des vitesses de glissement de 0.5m/s et 1m/s à charge fixe de 10N et 30N pour échantillons en acier et molybdène régime sec	59
III.2.4. Perte de masse relative en fonction du temps à des vitesses de glissement de 0.5m/s et 1m/s à charge fixe de 10N et 30N pour échantillons en acier et molybdène régime lubrifié	61
III.2.5. Perte de masse relative en fonction de la charge appliquée à des vitesses de glissement de 0.5m/s et 1m/s pour échantillons en acier régime sec ou lubrifié	63
III.2.6. Perte de masse relative en fonction de la charge appliquée à des vitesses de glissement de 0.5m/s et 1m/s pour échantillons en molybdène régime sec ou lubrifié	65
III.2.7. Perte de masse relative en fonction de la charge appliquée à des vitesses de glissement de 0.5m/s et 1m/s pour échantillons en acier et molybdène régime lubrifié	67
Conclusion général.....	69
Références	

sommaire

liste des figures

Liste des figures

Chapitre I: Elément bibliographique		
Figure I.1	Schéma simplifié du principe de la projection thermique.	5
Figure I.2	Schéma de principe de la projection à l'arc.	6
Figure I.3	Projection flamme.	7
Figure I.4	Schéma de principe de la projection à la flamme poudre.	8
Figure I.5	Principe de la projection à la flamme fil.	9
Figure I.6	Schéma de principe du canon à détonation.	10
Figure I.7	Schéma de principe de la projection HVOF.	11
Figure I.8	Schéma de principe de la projection par torche à plasma.	12
Figure I.9	Torche plasma à arc soufflé.	13
Figure I.10	Torche plasma à arc transféré.	14
Figure I.11	Schéma de principe de la construction de dépôt par projection thermique.	15
Figure I.12	Résultats des interactions des particules avec le substrat.	16
Figure I.13	Structure cristalline Mo	23
Figure I.14	Structure cristalline MoC.	23
Figure I.15	Lubrification Hydrodynamique.	24
Figure I.16	Lubrification Hydrostatique.	25
Figure I.17	Lubrification Elastohydrodynamique.	25
Figure I.18	Lubrification par barbotage.	26
Figure I.19	Représentation schématique du circuit tribologique dans le cas d'un contact entre deux solides.	33
Figure I.20	Solide sur un support horizontal.	38
Chapitre II: Matériaux et techniques expérimentales		
Figure II.1	Echantillon utilisé pour la projection.	42
Figure II.2	Pistolet arc électrique entre deux fils.	44
Figure II.3	Dispositif d'usure utilisé.	45
Figure II.4	Microscope optique	47
Chapitre III: Résultats et discussions		
Figure III.1	faciès d'usure de l'échantillon Acier préparé pour les tests	48

liste des figures

	d'usure.	
Figure III.2	faciès d'usure de l'échantillon Acier après usure a une vitesse de glissement de 0.5m/s à différente charge dans un régime sec.	49
Figure III.3	faciès d'usure de l'échantillon Acier après usure à une vitesse de glissement de 0.5m/s à différente charge dans un régime lubrifié.	49
Figure III.4	faciès d'usure de l'échantillon Acier après usure a une vitesse de glissement de 1m/s à différente charge dans un régime sec.	50
Figure III.5	faciès d'usure de l'échantillon Acier après usure à une vitesse de glissement de 1m/s à différente charge dans un régime lubrifié.	51
Figure III.6	Microstructure de l'échantillon Molybdène preparer pour les test d'usure	51
Figure III.7	faciès d'usure de l'échantillon Molybdène après usure à une vitesse de glissement de 0.5m/s à différente charge dans un régime sec.	52
Figure III.8	faciès d'usure de l'échantillon Molybdène après usure à une vitesse de glissement de 0.5m/s à différente charge dans un régime lubrifié.	52
Figure III.9	faciès d'usure de l'échantillon Molybdène après usure à une vitesse de glissement de 1m/s à déférente charge dans un régime sec.	53
Figure III.10	faciès d'usure de l'échantillon Molybdène après usure à une vitesse de glissement de 0.5m/s à différente charge dans un régime lubrifié.	54
Figure III.11	Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps dans un régime sec.	55
Figure III.12	Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps régime lubrifié.	56
Figure III.13	Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps régime sec.	57
Figure III.14	Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps régime lubrifié.	58
Figure III.15	Comparaison de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement 0.5m/s (régime sec).	59

liste des figures

Figure III.16	Comparaison de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 1m/s (régime sec).	60
Figure III.17	Comparaison de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 0.5m/s régime lubrifié.	61
Figure III.18	Comparaison de la perte de masse relative en fonction du temps 180tr régime Lubrifié.	62
Figure III.19	Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée régime sec pendant 1h.	63
Figure III.20	Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée régime lubrifié pendant 1h.	64
Figure III.21	Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée régime sec.	65
Figure III.22	Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée régime lubrifié.	66
Figure III.23	Comparaison de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée à une vitesse de glissement de 0.5m/s.	67
Figure III.24	Comparaison de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée à une vitesse de glissement de 1m/s.	68

Liste des tableaux

Chapitre I: Elément bibliographique		
Tableau I.1	Propriétés du molybdène.	22
Tableau I.2	Classification des lubrifiants par le domaine d'utilisation.	29
Tableau I.3	Classification iso de la viscosité des huiles.	30
Tableau I.4	Classification SAE des huiles.	31
Tableau I.5	Différentes formes d'usure.	36
Chapitre II: Matériaux techniques expérimentales		
Tableau II.1	Compositions et caractéristiques du fil utilisé pour le dépôt donné par le fournisseur.	41
Tableau II.2	Paramètres de projection utilisée par l'entreprise.	43

INTRODUCTION
GÉNÉRALE

Introduction générale

Introduction générale

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

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

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

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

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

Ce mémoire va donc présenter l'ensemble des travaux qui ont été réalisés, la réalisation des revêtements par projection thermique moyennant le procédé arc électrique entre deux fils, ainsi que l'évaluation de l'usure par perte de masse à différentes vitesses de glissement en fonction du temps et à charge appliquée sur les surfaces d'échantillons sans dépôt acier E 24 ou avec dépôt de molybdène à des régimes secs et lubrifiés.

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

Introduction générale

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

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

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

CHAPITRE I

ELÉMENTS BIBLIOGRAPHIQUES

Eléments Bibliographiques

I.1. projection thermique :

I.1.1. Historique :

Parmi les techniques dites «propres», la projection thermique est l'une des plus anciennes. Ce travail concerne un nouveau développement de cette technologie. La projection thermique a plus de 100 ans. Au début du 20ème siècle (1909) un ingénieur suisse de Zurich, le Docteur Max Ulrich Schoop a minutieusement étudié l'impact de balles en plomb sur un mur en béton, ce qui lui a inspiré de réaliser une invention portant sur l'utilisation de la technique de revêtement en plomb ou en zinc par projection de métal fondu. Dans un premier temps, il a utilisé un creuset rempli de métal fondu et de l'air préalablement chauffé pour la pulvérisation et la projection du métal.

Après différentes évolutions techniques, l'utilisation d'un chalumeau comme source d'énergie et d'un métal en poudre a été qualifiée et brevetée en 1911. Concernant la source enthalpique, la première innovation a été brevetée par Hermann Drösse. Il a proposé un appareil de chauffage par arc électrique. Depuis, les procédés avec utilisation de l'arc n'ont pas cessé d'évoluer. En 1912 Schoop remplace la poudre par un film métallique en créant un véritable pistolet de projection.. Son inventeur reçoit une récompense de mérite en 1915 et la technologie est mondialement connue depuis sous le nom de «schoopage».

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

La combustion a été au départ le procédé le plus développé, marqué par l'apparition du canon à détonation (D-Gun Coatings) breveté par Praxair Surface Technology dans les années 50. La nécessité d'utiliser des matériaux réfractaires, notamment dans le domaine de l'aérospatial, a entraîné le développement de nouvelles techniques, en particulier l'utilisation de l'énergie du plasma. Le développement des équipements, notamment des générateurs de plasma, a permis d'améliorer la longévité des torches (brevet SNECMA déposé en 1960) et par conséquent rendu de plus en plus utilisés les procédés de projection par plasma dont l'abréviation anglaise APS (Atmospheric Plasma Spraying) est largement répandue dans les publications depuis.

Les années 70 montrent le développement de la projection plasma sous faible pression résiduelle. Le premier dépôt a été obtenu par Muehlberger en utilisant la technique baptisée par la suite Vacuum Plasma Spraying (VPS) ou Low Pressure Plasma Spraying (LPPS). Elle permet d'exploiter le

Éléments Bibliographiques

procédé pour l'obtention de dépôts métalliques denses sans présence d'oxydes et avec une meilleure adhérence.

Un autre procédé qui a marqué l'évolution technologique de la projection thermique mais par source enthalpique gazeuse est en 1983 le procédé High Velocity Oxy-fuel (HVOF), technique de Browning Engineering qui a fourni des revêtements à haute température pour les turbines à gaz dans le domaine aéronautique et spatial.

Ainsi depuis les premiers travaux de Schoop, la compréhension des phénomènes physiques impliqués dans le procédé, l'avancement des modélisations, le développement des systèmes de contrôle en ligne, la robotisation et l'automatisation des processus ont assuré un progrès constant de la projection thermique et de son application pour l'élaboration de nouveaux matériaux [1].

I.1.2. Définition :

La projection thermique est un procédé permettant de déposer des revêtements métalliques et non métalliques sur des matériaux, principalement des aciers, afin d'améliorer les propriétés anti-usure et anticorrosives des pièces produites pour différentes applications. Cette technologie a plusieurs avantages. Un des principaux est la grande variété de matériaux qui peuvent être utilisés pour produire les revêtements.

I.1.3. Principe de la projection thermique :

Le principe consiste à projeter à l'aide d'un gaz vecteur un matériau dit d'apport chauffé à haute température sur un matériau support pour en modifier ses propriétés (**Figure I.1**). En s'agglomérant, les particules forment le revêtement. Les liaisons sont purement mécaniques.

Éléments Bibliographiques

L'épaisseur du revêtement est comprise entre 50 microns et quelques millimètres.

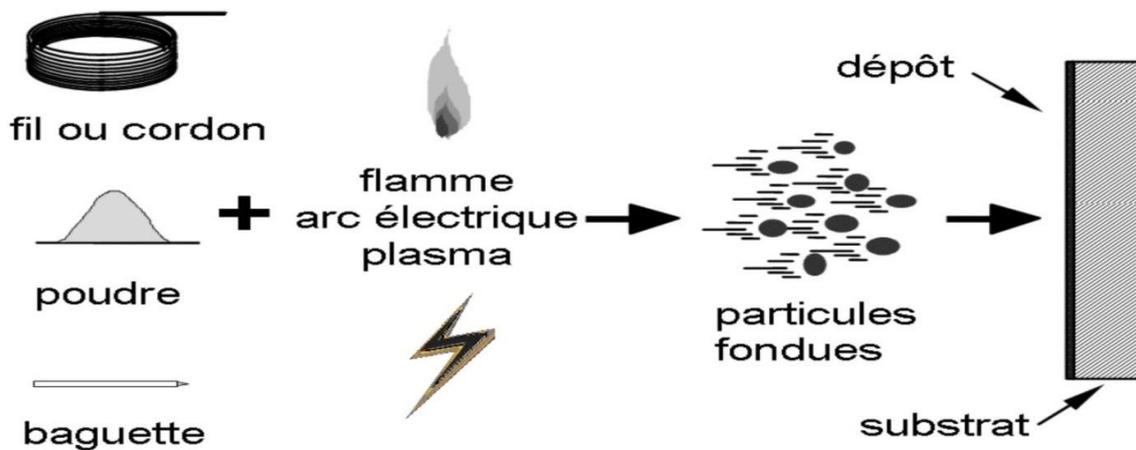


Figure I.1: Schéma simplifié du principe de la projection thermique[2].

Les procédés de projection thermique peuvent être classés en 2 catégories :

- Les procédés dont la source de chaleur est un chalumeau oxy-acétylénique : procédé flamme-poudre (FP), procédé flamme-fil ou cordon (FF), procédé HVOF (HV) et procédé par canon à détonation (CD).
- Les procédés dont la source de chaleur est un arc électrique : procédé à l'arc électrique (AE) et procédé plasma (PS).

I.1.4. Différents types de procédés de projection thermique :

I.1.4.1. Projection par arc électrique entre deux fils :

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

L'équipement consiste en un pistolet de projection, un système d'avancement des fils, un générateur de courant asservi par une régulation automatique et une source de gaz comprimé (généralement de l'air mais l'utilisation d'un gaz neutre est possible). Les fils sont amenés dans la zone de fusion du pistolet à travers des électrodes guides qui assurent leur bon positionnement et le transfert du courant (**Figure I.2**). L'arc électrique est généré entre les deux fils en contact et permet de les fondre. La température dans la zone de fusion peut être de l'ordre de 6000 K. Le métal fondu

Eléments Bibliographiques

est pulvérisé grâce au jet de gaz comprimé et projeté sur le substrat. Les épaisseurs des dépôts varient de 0.2 à 3 mm avec un taux de porosité de 5 à 10% et une adhérence de 20 à 40 MPA. La technique est simple et peu coûteuse et permet de déposer la matière avec un débit important (de 5 à 30 kg/h). L'utilisation d'un gaz neutre diminue sensiblement la présence d'oxydes dans le dépôt. Des modifications du pistolet et l'emploi d'un second jet de gaz ont permis de concentrer le flux de matière atomisée et de diminuer la porosité des couches [3].

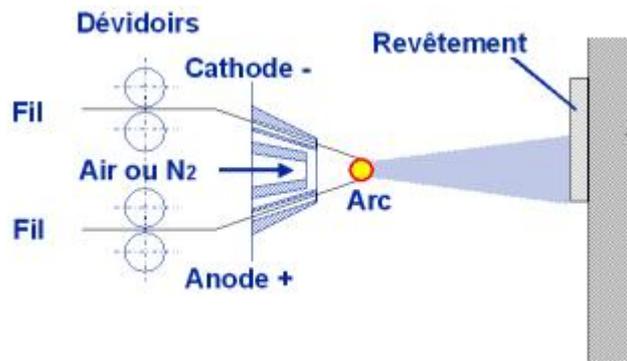


Figure I.2: Schéma de principe de la projection à l'arc. [4]

Les matériaux projetés sont des métaux conducteurs électriques (aluminium, cuivre, zinc, molybdène), des aciers mais aussi des alliages NiCrAl, NiMoAl. L'une des limites importantes du procédé est la nature des matériaux (très fiabilité et conductibilité). La gamme des matériaux projetés peut être élargie en utilisant la technologie des fils fourrés qui permet de déposer des carbures (CrC, WC, TiC) et des oxydes ainsi que d'élaborer des couches composites [11].

Éléments Bibliographiques

I.1.4.2. Projection flamme :

Il s'agit du procédé le plus ancien, à l'origine de la projection thermique. Elle est communément appelée (métallisation). Elle est particulièrement adaptée aux matériaux à bas point de fusion. Elle fait appel à une flamme oxyacétylénique comme source de chaleur. La température à l'intérieur de la flamme peut atteindre 3000°C. Le matériau d'apport est véhiculé par l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion (**Figure I.3**).

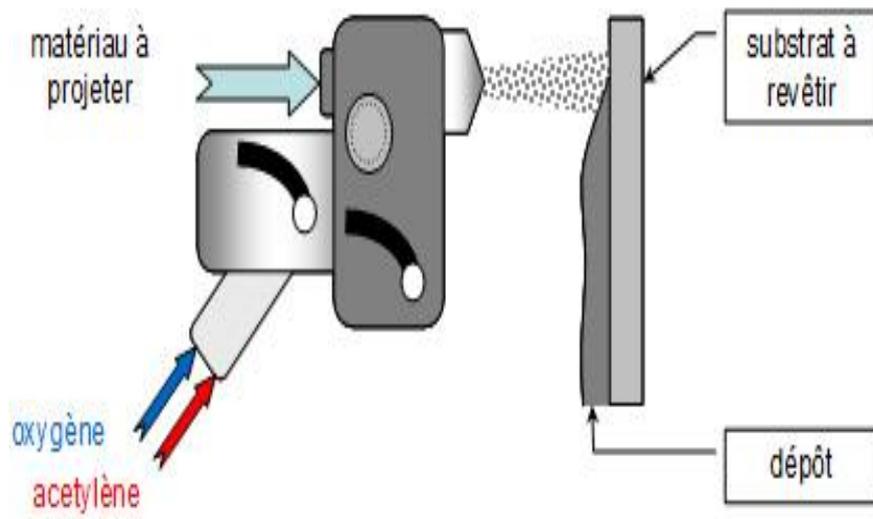


Figure I.3: Projection flamme. [5]

Eléments Bibliographiques

I.1.4.2.1. Projection flamme poudre :

Dans ce cas le matériau d'apport se présente sous forme de poudre. La température des particules atteint 2000°C au sein de la flamme. La vitesse des particules est faible et la distance entre la buse et le support ne doit être que de quelques millimètres. Les matériaux d'apport les plus fréquemment utilisés sont les alliages auto fusible sa base de nickel et le cobalt. Ce procédé est très répandu dans la plupart des industries pour résoudre des problèmes d'abrasion, de corrosion, d'usure, d'isolation thermique ou électrique [6].

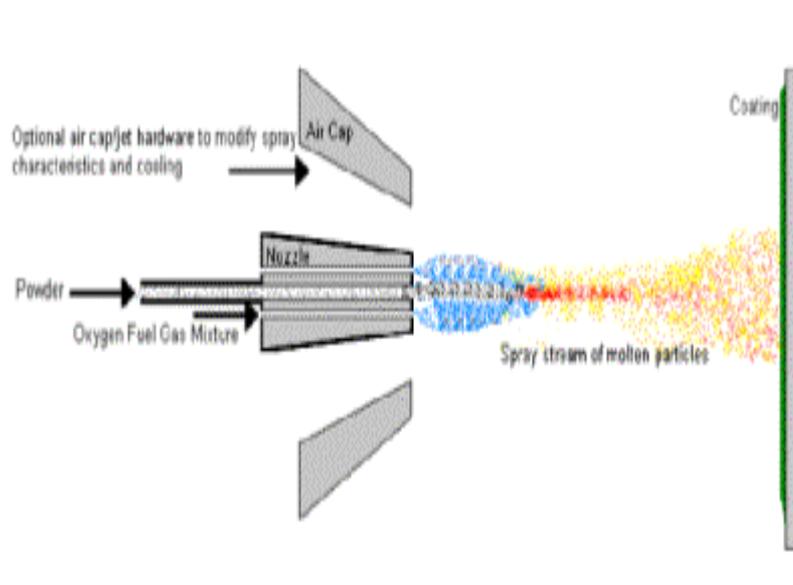


Figure I.4: Schéma de principe de la projection à la flamme poudre. [7]

Eléments Bibliographiques

I.1.4.2.2. Projection flamme fil :

Le matériau d'apport se présente sous forme de fil, de cordon, de baguette ou de fil fourré, la flamme ne sert, dans ce cas, qu'à la fonte du matériau. Les particules obtenues seront véhiculées par un flux d'air comprimé. Les matériaux d'apport les plus fréquemment utilisés sont les métaux (Zn, Al, Cu, Sn, Pb, Ni, Mo), les aciers inoxydables ou non, les alliages à base de zinc, de cuivre, de nickel ou d'étain, les céramiques (NiAl , NiCrBSi , Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_3$, Cr_2O_3 , $\text{ZrO}_2\text{-CaO}$). Ces dernières se présentent sous forme de cordon ou de baguettes exclusivement. Ce procédé peut être mis en œuvre dans tous les domaines-aéronautique, automobile, aciéré, sidérurgie, construction d'infrastructures [8].

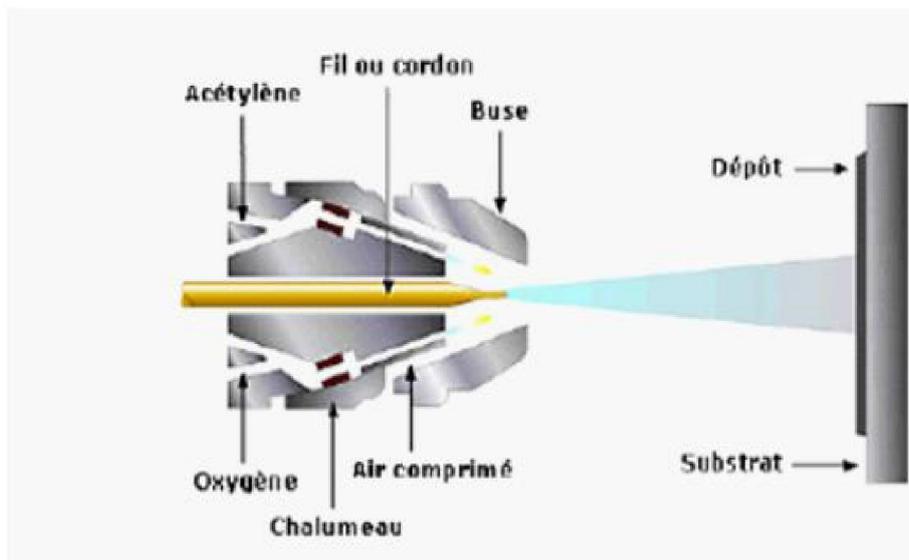


Figure I.5: Principe de la projection à la flamme fil. [9]

Éléments Bibliographiques

I.1.4.2.3. Projection au canon à détonation :

Le matériau d'apport se présente sous forme de poudre et est chargé dans un tube –le canon détonation- en même temps que le gaz. La détonation est provoquée par l'explosion de ce mélange sous l'action d'une étincelle (**Figure I.6**). Les matériaux utilisés sont principalement les carbures de chrome ou de tungstène avec un liant métallique de nickel ou de cobalt, l'alumine et l'oxyde de chrome. Ce procédé n'est utilisé qu'en sous-traitance, du fait du bruit émis lors de la détonation et des contraintes de mise en œuvre. Les principaux domaines d'utilisation sont le textile, la sidérurgie, l'aéronautique. [10]

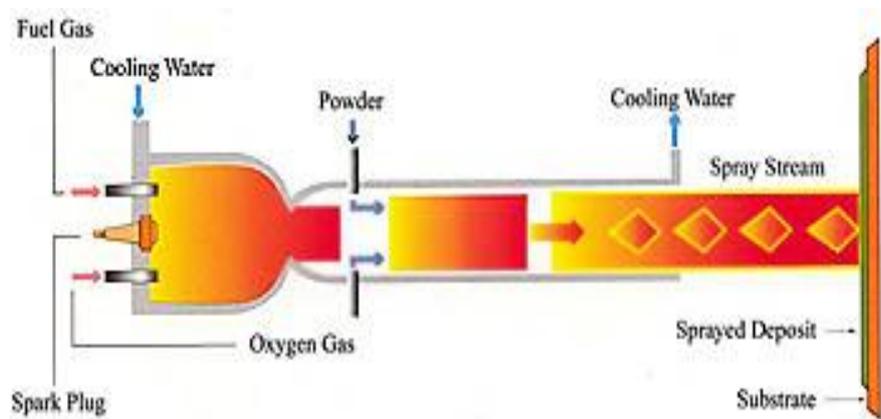


Figure I.6: Schéma de principe du canon à détonation.

Éléments Bibliographiques

I.1.4.2.4. Projection a tir continu :

Deux procédés peuvent être mis en œuvre : le procédé HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) et le procédé HVAF (High Velocity Air-Fuel) (**Figure I.7**). Le choix entre ces deux procédés se fait pour des raisons économiques. Les matériaux d'apports utilisés sont les métaux et les alliages à base de nickel et de cobalt. Les carbures à base de chrome ou de tungstène sont également des matériaux projetables par cette technique. Par contre, les oxydes sont très rarement utilisés. Ce procédé est principalement utilisé dans le traitement anticorrosion dans le secteur aéronautique, l'aciérie [11-12].

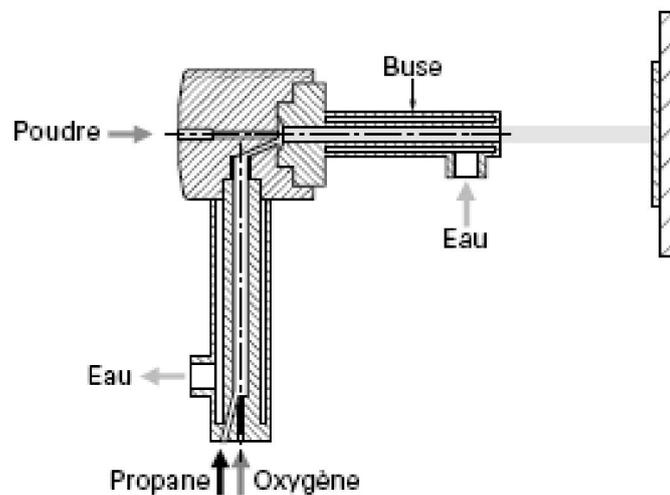


Figure I.7: Schéma de principe de la projection HVOF. [1]

Éléments Bibliographiques

I.1.4.3. La torche plasma :

Le principe de ce procédé est l'utilisation d'un arc électrique dans un plasma gazeux. Le matériau d'apport sous forme de poudre est introduit dans cette source de chaleur d'une température comprise entre 15000° et 20000° C (**Figure I.8**). Ce procédé est essentiellement mis en œuvre dans l'air ambiant, mais pour obtenir des revêtements plus épais à de plus faibles températures, il peut être mis en œuvre sous atmosphère contrôlée ou sous vide. L'épaisseur des dépôts est variable en fonction des demandes et la porosité est inférieure à 10 %.

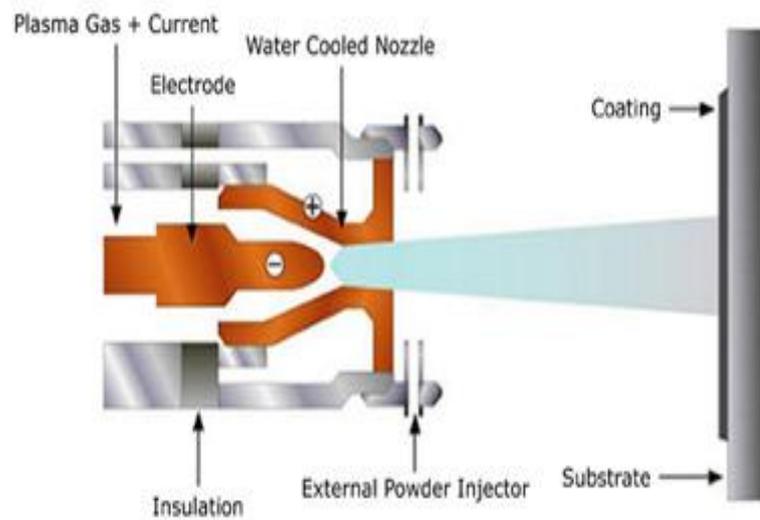


Figure I.8: Schéma de principe de la projection par torche à plasma. [13]

Ce procédé peut être facilement mis en œuvre et permet de résoudre des problèmes d'usure, de corrosion, de barrière thermique, de frottement ou d'oxydation, notamment dans les secteurs de l'aéronautique et de l'automobile [14].

Éléments Bibliographiques

I.1.4.4. Les plasmas à arc soufflé ou à arc non transféré (PTA) :

Comportent deux électrodes (l'anode et la cathode). L'anode est percée d'un trou central servant de tuyère d'éjection de la colonne de plasma (**Figure I.9**). Le gaz est injecté autour de la cathode, traverse l'arc électrique et s'échappe par la tuyère anodique. Ce générateur à arc interne permet d'obtenir une colonne plasma à une température supérieure à 10000°K.

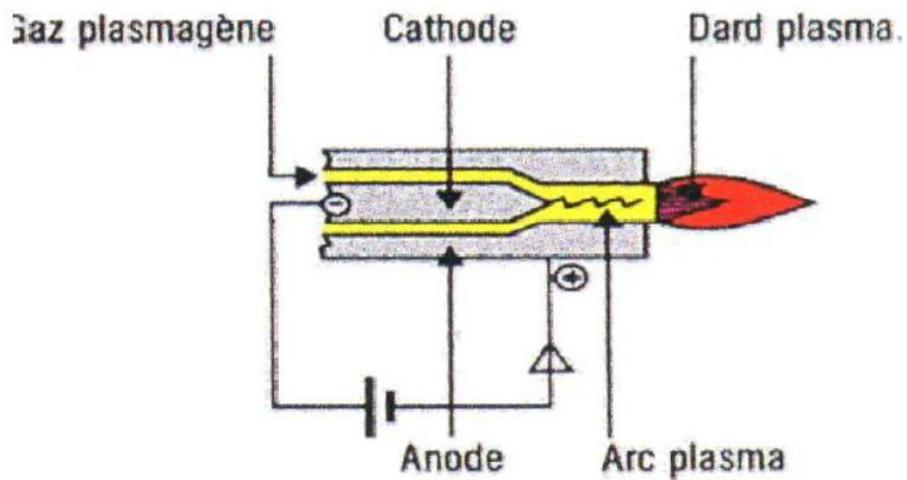


Figure I.9 : Torche plasma à arc soufflé.

Éléments Bibliographiques

I.1.4.5. Les plasmas à arc transféré :

Elles ne comportent qu'une seule électrode (froide ou chaude). L'arc jaillit entre l'électrode interne et un corps conducteur (généralement le bain) en contact avec une contre électrode (**Figure I.10**). La résistivité électrique du bain est mise à profit pour y créer une émission complémentaire d'énergie par effet Joule.

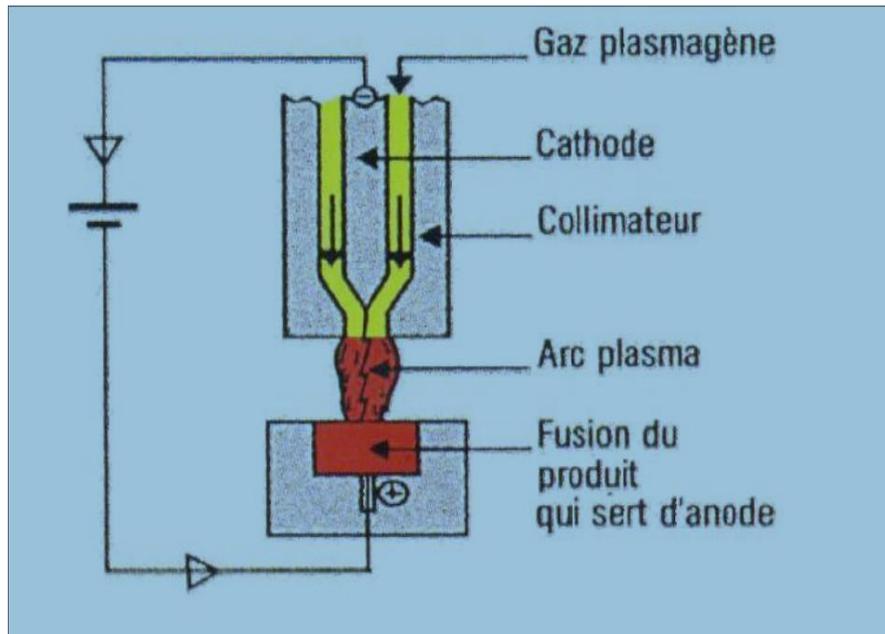


Figure I.10: Torche plasma à arc transféré.

Éléments Bibliographiques

I.1.5. Construction d'un dépôt :

La construction du revêtement par projection à basse pression est similaire à la construction du revêtement en APS classique. L'aspect typique d'un empilement de particules peut être observé dans la microstructure dans le cas d'une température d'élaboration insuffisante pour la cristallisation du dépôt en cours de la projection. Une structure lamellaire (**figure I.11**) obtenue par des écrasements et solidification successive de particules totalement ou partiellement fondues et projetées par le jet de plasma peut contenir les éléments suivants :

- des particules infondues.
- des pores.
- des oxydes, dans le cas de présence d'oxygène dans le matériau projeté ou dans l'environnement.

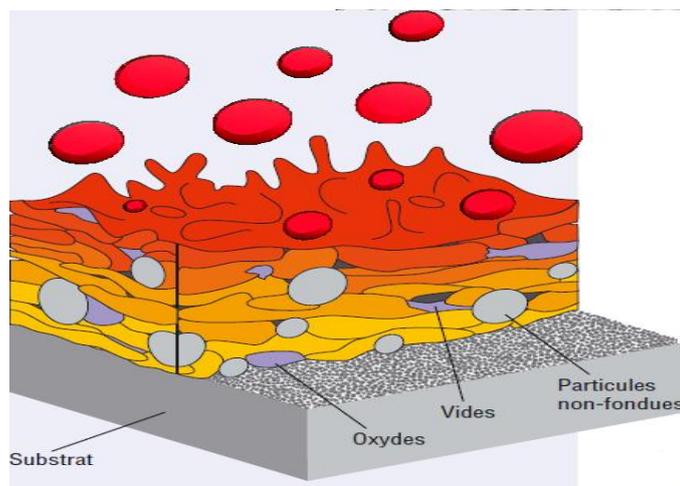


Figure I.11: Schéma de principe de la construction de dépôt par projection thermique. [15].

Ces différents éléments ont une forte influence sur les caractéristiques mécaniques du dépôt. Si la température d'élaboration avoisine la température de mise en solution du matériau, une cristallisation du dépôt a lieu et les frontières entre lamelles sont moins présentes ou disparaissent complètement, avec observation de grains. Le temps de traitement de la particule dans le jet de plasma est de l'ordre de la milliseconde. Le processus d'écrasement de la particule est très rapide, la durée entre l'impact et l'étalement d'une gouttelette est de l'ordre d'une microseconde [16]. Le mécanisme d'étalement et de solidification d'une gouttelette est et fondamental pour la projection

Eléments Bibliographiques

thermique car c'est une clef de la construction du dépôt. Ce processus est dépendant de plusieurs paramètres :

- nature et forme du matériau,
- température et vitesse de la particule à l'impact,
- tension superficielle de la gouttelette,
- nature du substrat,
- température, rugosité, mouillabilité du substrat

Les interactions possibles avec le substrat ont été étudiées et classées par Kudinov [22]. La (Figure I.12) représente les résultats des écrasements en fonction du type de particule, de sa température, de sa vitesse et des conditions de mouillabilité à la surface du substrat.

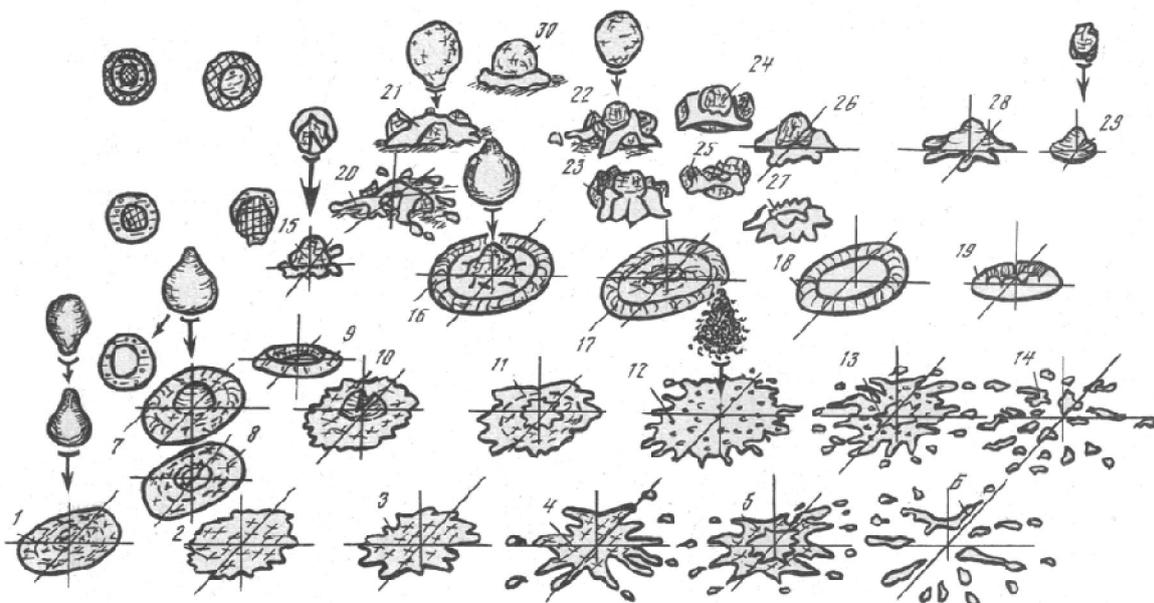


Figure I.12: Résultats des interactions des particules avec le substrat. [17]

Les numéros dans la (Figure I.12) correspondent aux différents états de la particule : la particule est complètement fondue (1-6), la particule est complètement fondue avec une cavité remplie de gaz (7-11), la particule est surchauffée avec un début d'évaporation (12-14), la particule est fondue en surface (15), partiellement fondue avec un noyau solide (16-19), la particule est ré-solidifiée en surface et possède un noyau fondu (20, 21, 30), la particule est ré-solidifiée en surface et possède une couche intermédiaire fondue et un noyau solide (22-30), la particule est solide et

Eléments Bibliographiques

accélérée (28,29). L'éclaboussement de la particule dépend fortement de la température et de l'état de surface du substrat.

I.1.6. Paramètres de projection influant sur le dépôt :

- **Débit des gaz :** Un excès d'oxygène (flamme oxydante) augmente l'oxydation du dépôt, donc sa dureté est réduite sa résistance mécanique. Le dépôt devient fragile et difficile à usiner. Un excès du taux d'acétylène (flamme carburante) entraîne un charbonnage du revêtement. Dans les deux cas, on note l'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 de fil ou de cordon plus grand augmente le grain du dépôt et les pertes.
- **Vitesse du fil ou du cordon:** Trop grande, elle augmente la cadence et la grosseur du grain, trop faible, elle augmente l'oxydation du dépôt.
- **Pression de l'air :**(air comprimé vecteur de la projection). Son accroissement diminue la grosseur du grain mais augmente l'oxydation du dépôt.
- **Distance de projection:** Trop faible, elle crée des turbulences, des pertes et des défauts d'adhérence et surchauffe du dépôt 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:** Trop rapide, elle augmente les pertes de métal et donne des épaisseurs de dépôt trop minces trop lente, elle donne des épaisseurs de dépôt irrégulières et élève la température du support.
- **Vitesse de rotation:** Trop rapide, elle entraîne un rebondissement des particules et une pollution du dépôt trop lente, elle entraîne une surchauffe du dépôt et une couche trop épaisse du revêtement.

Éléments Bibliographiques

- **Refroidissement:** trop rapide, il génère le délaminage des couches trop lent, il entraîne une surchauffe et donc une augmentation de l'oxydation du dépôt.

I.1.7. Préparation de surface :

La qualité d'un revêtement dépend énormément de la préparation préalable de la surface. De façon générale, le but de la préparation de la surface est l'augmentation de l'adhérence. Pour qu'il y ait une adhérence, il faut avoir des liaisons directes entre le substrat et le revêtement donc il faut éliminer les agents étrangers déposés sur la surface, essentiellement les graisses et les produits chimiques. L'existence d'une rugosité facilite l'accrochage. Préalablement, on peut faire une opération de sablage (écrouissage superficielle) pour créer une certaine rugosité.

Il y a 3 opérations de préparation des surfaces : dégraissage, décapage et polissage

I.1.7.1. Dégraissage :

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, exempte de traces de calamine, de rouille, d'huile, ou de graisse, afin de ne pas nuire à 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.1.7.2. Décapage :

Opération qui consiste à se débarrasser des oxydes formés naturellement ou lors de formages à haute température. Il existe 3 types de décapage : décapage chimique ; décapage mécanique ; décapage électrolytique.

- **Décapage chimique :**

Action d'un réactif chimique qui va dissoudre l'oxyde. On utilise des acides : HCl, H₂SO₄, il faut dissoudre le moins possible le métal. On adjoint un inhibiteur de corrosion qui ralentit

Eléments Bibliographiques

beaucoup la vitesse de corrosion. Il intervient par un mécanisme d'adsorption sur le métal et bloque les sites réactifs. Le décapage à la soude existe aussi.

- **Décapage mécanique :**

Se fait par voie abrasive. Il faut dégraisser au préalable. Exemple : grattage, brossage. Industriellement, on réalise une projection d'abrasif : sablage (projection de sable avec une lance à la pression de 2 à 5 kg, ce qui entraîne l'enlèvement de la rouille et des oxydes). La méthode est simple, bon marché mais dangereuse. On peut aussi faire un grenailage (sable remplacé par de petites billes d'acier).

- **Décapage électrolyte**

On utilise la turbulence du dégagement gazeux obtenu par électrolyse, ce qui facilite le décollement des couches s'oxyde. Cette méthode est très utilisée pour éliminer les couches minces.

⇒ **Inconvénients :**

- Si le métal constitue la cathode, le dégagement de l'hydrogène fragilise la pièce.
- Si le métal est en anode, l'oxygène dégagé entraîne la passivation.

On enlève l'oxyde mais en risque d'en former un autre. On peut travailler en courant alternatif pour diminuer les inconvénients.

I.1.7.3. Polissage :

A pour but s'obtenir le polie spéculaire (élimination de toutes les imperfections au niveau de la surface géométrique et microscopique afin de pouvoir observer au microscope les constituants de l'alliage).

Il existe trois types de polissage :

- Mécanique (disques abrasifs).
- Chimique : trempe de la pièce dans un bain chimique de façon à enlever les irrégularités.
- électrolytique : dissolution anodique des irrégularités de la surface.

Éléments Bibliographiques

I.1.7.4. Sablage :

C'est une technique de nettoyage des grandes surfaces en utilisant un abrasif projeté à grande vitesse à l'aide d'air comprimé au travers d'une buse, sur le matériau à décaper.

Quand l'abrasif est constitué de billes, on parle aussi ou plutôt de grenailage. Il permet de décaper, désoxyde, enlève une couche superficielle fragile, il crée une rugosité qui facilite l'accrochage d'un revêtement.

A forte puissance les impacts provoquent une déformation plastique et modifient la surface.

A faible puissance avec des abrasifs de gommage, on peut nettoyer sans abimer le substrat.

I.1.7.5. Préchauffage :

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

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

I.2. Les dépôts :

Longtemps confondu avec des composés de carbone ou de plomb, le molybdène est découvert au XVIII^e siècle. L'oxyde de molybdène a été isolé pour la première fois en 1778 par Scheele. Quant à l'obtention d'un métal impur, elle intervient en 1782 grâce à Hjelm.

Le molybdène est un métal de transition. Le métal pur est d'aspect blanc métallique et il est très dur. Il a été souvent confondu avec du minerai de graphite et de galène. Il a un haut module d'élasticité et seuls le tungstène et le tantale, des métaux plus aisément disponibles, ont des points de fusion plus élevés. C'est un agent d'alliage valable, car il contribue à la trempabilité et à la dureté des aciers éteints et gâchés. Il améliore également la force de l'acier aux températures élevées. Du molybdène est employé en alliages, électrodes et catalyseurs.

Éléments Bibliographiques

I.2.1. Propriétés du molybdène :

Très dur, le molybdène apparaît blanc métallique et peut être confondu avec des minerais de graphite et de galène. Son module d'élasticité est particulièrement important.

- L'addition d'une faible quantité de molybdène durcit l'acier. Plus des deux tiers de la production de molybdène sont utilisés dans les alliages. L'utilisation du molybdène grimpa en flèche pendant la 1^{ere} Guerre mondiale, lorsque la demande pour le tungstène rendit celui-ci rare et que les alliages haute résistance étaient très demandés.

- Le molybdène est encore utilisé de nos jours dans les alliages haute résistance et les aciers haute température. Des alliages spéciaux contenant du molybdène, comme l'Hastelloy, sont résistants et ne se corrodent pas à température élevée.

- L'addition d'une faible quantité de molybdène (1%) durcit l'uranium métal. Il a notamment été utilisé pour fabriquer le combustible des premiers réacteurs nucléaires graphite gaz d'EDF dans les années 1960.

- Le molybdène est utilisé dans certaines parties d'avions et de missiles, et également comme filament. On utilise le molybdène comme catalyseur, particulièrement dans l'industrie pétrolière, pour éliminer les composés organiques soufrés du pétrole. Il entre aussi dans la composition de l'acier inoxydable utilisé dans le milieu marin, pour sa forte résistance à la corrosion chimique.

- Le molybdène est utilisé en alliage comme support du silicium pour la réalisation de semi-conducteurs de puissance, grâce aux coefficients de dilatation très voisins de ces deux matériaux.

- Le disulfure de molybdène est un bon lubrifiant, particulièrement à haute température.

- Le molybdène, souvent appelé « moly », est utilisé dans l'industrie comme élément chauffant pour les fours sous vide ou ambiance gazeuse à haute température. Il est conseillé de l'utiliser pour les pièces composées de titane ou d'alliage titane, en lieu et place des éléments chauffants en graphite qui polluent la pièce par dépôt d'éléments graphitiques lors de l'opération de

Eléments Bibliographiques

traitement thermique. Le molybdène est cependant fragile en industrie du fait des changements rapides de température et de pression qui engendrent des grossissements de grains et rendent la pièce cassante. De plus, il semblerait qu'en pratique, 25 % d'énergie supplémentaire soit nécessaire afin d'obtenir la même température au sein du four en cas d'utilisation de molybdène. Celui-ci est également plus coûteux à l'achat et en pièce de remplacement. L'élément graphite ne peut être utilisé en cas de température trop élevée combinée à une pression trop basse afin d'éviter de dépasser la tension de vaporisation au risque de retrouver tout le graphite aggloméré dans la zone froide du four.

Tableau I.1 : Propriétés du molybdène.

Numéro atomique	42
Module de Young	329 GPa
Masse atomique	95,94
Point de fusion	2620°C
Point d'ébullition	5560°C
Volume atomique	0,0153 [nm ³]
Densité à 20 °C	10,2 [g/cm ³]
Structure cristalline	structure cubique centrée
Constante du réseau cristallin	0,3147 [nm]
Dureté Vickers	1530 MPa

Éléments Bibliographiques

I.2.2. Structure cristalline du Mo :

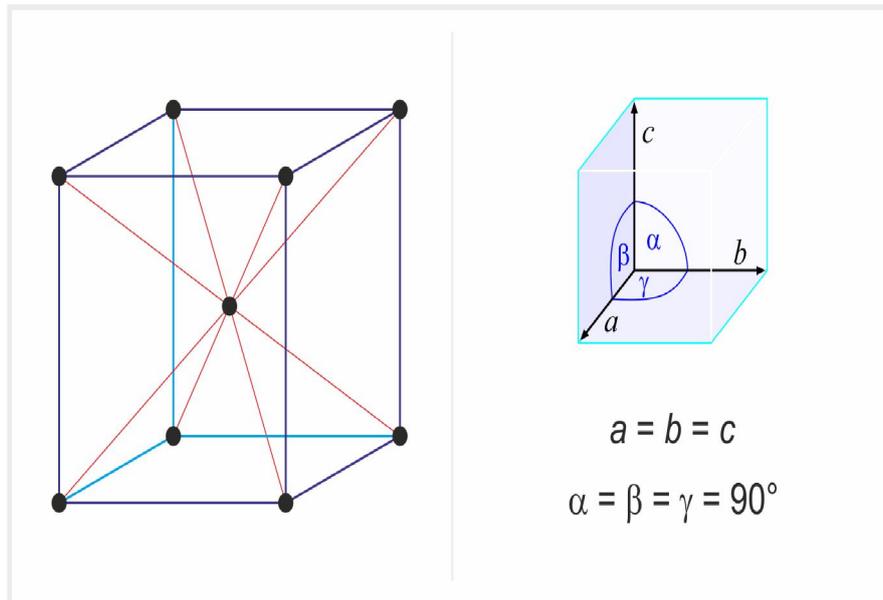


Figure I.13 : Structure cristalline Mo. [18]

Le carbure de molybdène (Mo_2C) peut se présenter sous de nombreuses formes cristallines, la plus courante étant α -MoC et la β -MoC. C'est la dernière phase qui est stable à basses températures et se produit dans les aciers. Le β -MoC possède une structure cristalline hexagonale fermée, les atomes de carbone se trouvant dans la moitié des interstices octaédriques disponibles[19]. Les paramètres de réseau pris pour les diagrammes ci-dessous sont :

$a = 0,3007 \text{ nm}$ et $c = 0,4729 \text{ nm}$.

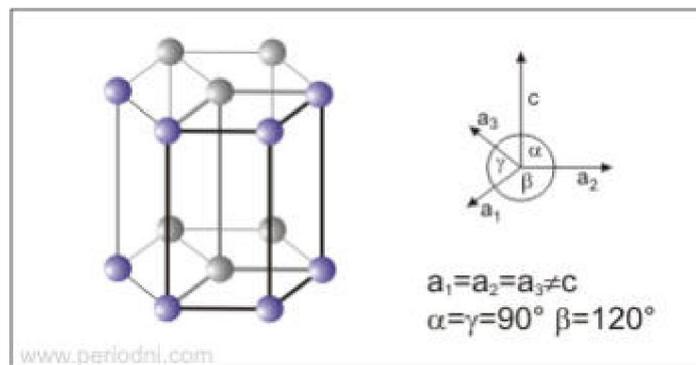


Figure I 14 : Structure cristalline MoC. [20]

Éléments Bibliographiques

I.3. La lubrification :

Les lubrifiants ont pour rôle de réduire les frottements entre pièces en mouvement, ou de diminuer la résistance passive de pièces fixes. Ils sont obtenus par raffinage des fractions lourdes du pétrole brut. Les lubrifiants peuvent être liquides ou fluides (huiles), consistants (graisses ou gel de silicone), ou solides (graphite, téflon).

Les performances et caractéristiques diffèrent d'un lubrifiant à l'autre, leur seul point commun est qu'ils sont tous composés d'un constituant principal appelé « base lubrifiante », qui représente 75 à 85% de l'huile ou d'une graisse et qui peut être d'origine pétrolière ou synthétique. [21]

I.3.1. Types de lubrification :

- **Hydrodynamique:** séparation de deux surfaces par un film relativement épais, par un mouvement dynamique de la pièce en mouvement.

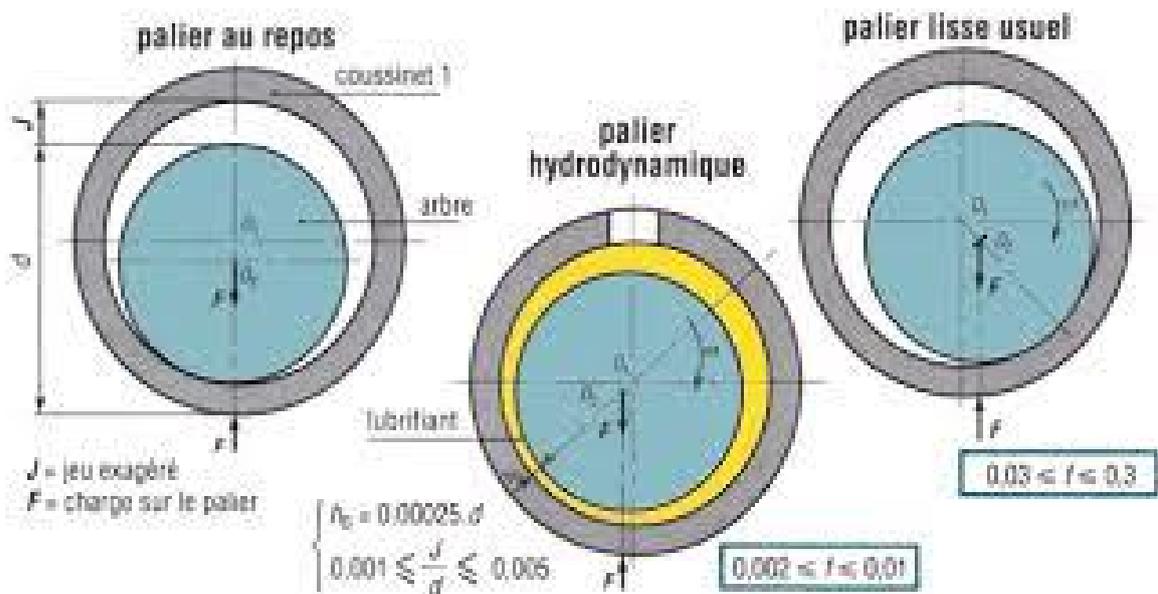


Figure I.15 : Lubrification Hydrodynamique. [22]

Éléments Bibliographiques

- **Hydrostatique:** introduction de lubrifiant sous pression entre les surfaces en mouvement (source de pression).

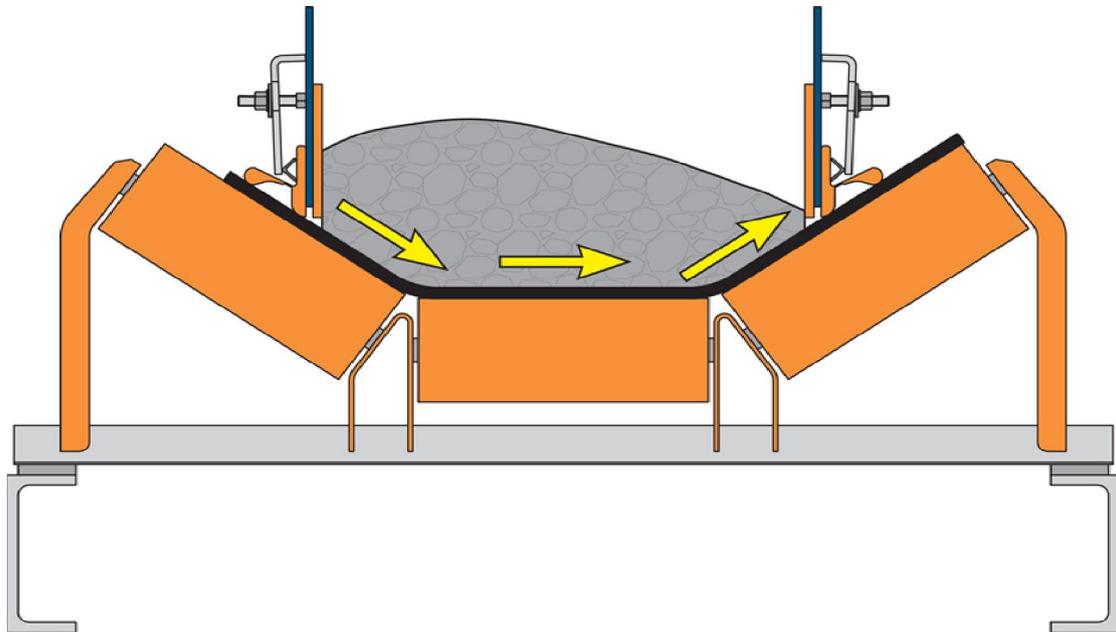


Figure I.16 : Lubrification Hydrostatique.

- **Elastohydrodynamique:** semblable à hydrodynamique mais une des surfaces roule (roulement, dent profilée d'engrenage). [21]

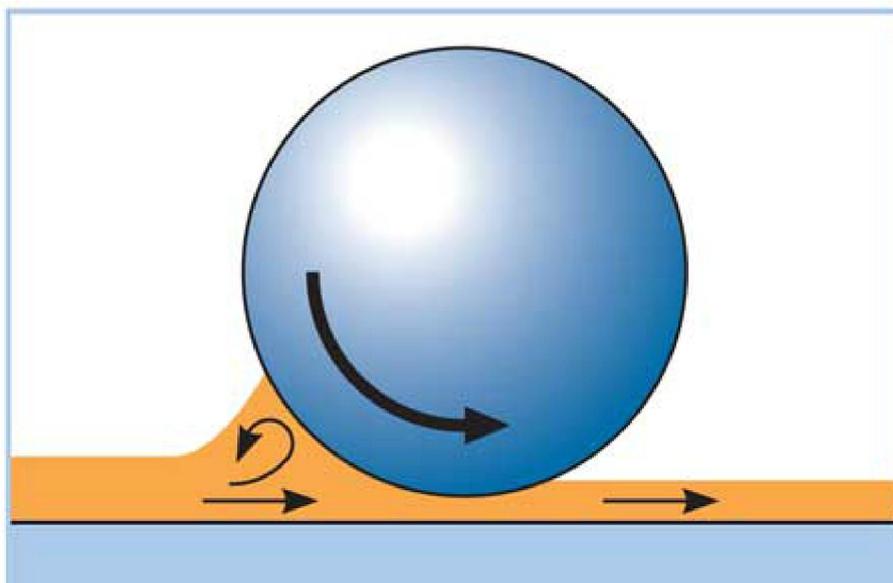


Figure I.17 : Lubrification Elastohydrodynamique.

Éléments Bibliographiques

- **Lubrification par barbotage ou par bain d'huile:** utilisable même aux faibles vitesses, c'est la plus simple et la plus usuelle. Une partie du mécanisme en mouvement (roue dentée...) trempe dans le bain et emporte par adhérence de l'huile vers les points à lubrifier. La quantité d'huile du bain doit être suffisante et tenir compte des conditions de service : calories à évacuer, éviter les vidanges trop rapprochées, etc. [23]

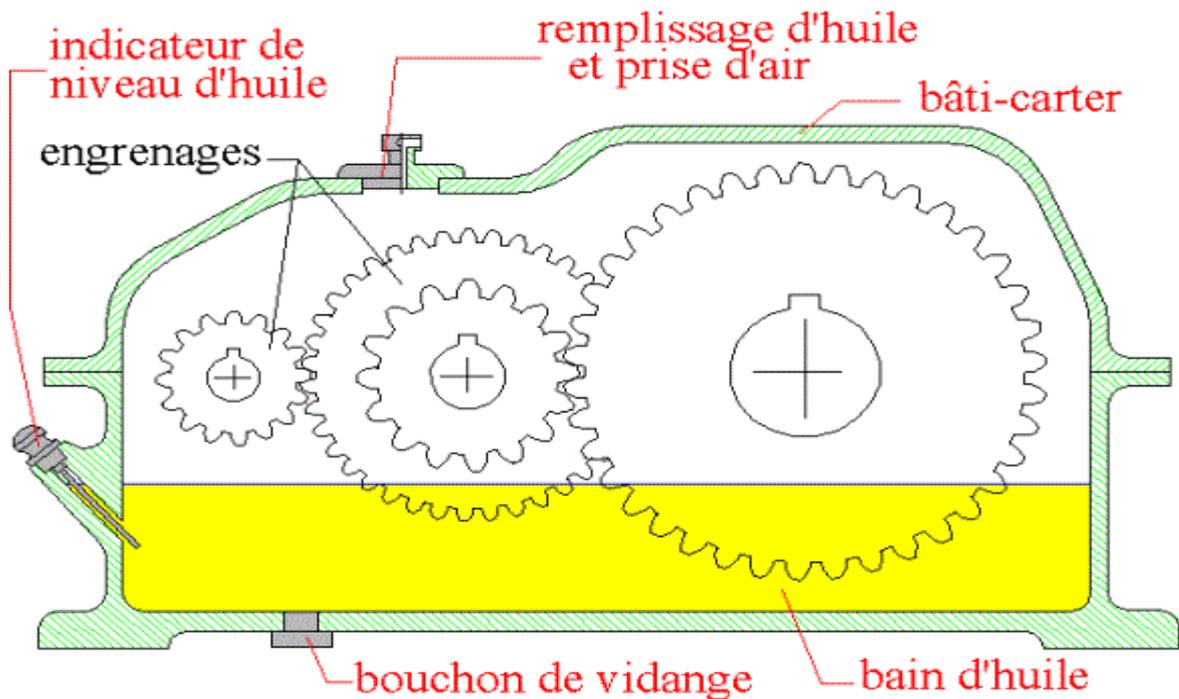


Figure I.18 : Lubrification par barbotage.

I.3.2. Les types de lubrifiants :

Les bases minérales sont fabriquées à partir du pétrole brut. Elles sont de très loin les plus utilisées, aussi bien dans les applications automobiles qu'industrielles. Ce sont des mélanges d'hydrocarbures ayant subi de nombreuses opérations de raffinage.

Les bases de synthèse sont des produits obtenus par réaction chimique de plusieurs composants. Deux grandes familles de produits sont utilisées pour la formulation des lubrifiants : les esters et les hydrocarbures de synthèse. Ces produits présentent une viscosité remarquablement stable quelle que soit la température.

Éléments Bibliographiques

Cette propriété est une supériorité majeure sur les bases minérales qui nécessitent l'adjonction d'additifs améliorants de viscosité en plus grande quantité. Leur résistance à l'oxydation est aussi accrue, d'où une plus grande longévité de l'huile qui permet un espacement entre vidange plus important.

A noter qu'il existe aussi des huiles dites de semi synthèse qui s'obtiennent à partir d'un mélange des deux précédentes (généralement 70 à 80% d'huile minérale et 20 à 30% d'huile de synthèse).
[26]

I.3.2.1. Les graisses :

Une graisse est un produit de consistance semi-fluide à solide, obtenu par dispersion d'un agent épaississant (savon) dans un liquide lubrifiant (huile minérale ou synthétique). Pour apporter certaines propriétés particulières, des produits d'addition peuvent être inclus, L'utilisation croissante de roulements lubrifiés à la graisse, associée au développement du concept de graissage à vie, fait de la graisse un composant à part entière du roulement. La durée de vie du roulement, son comportement dans des environnements divers, sont largement conditionnés par les propriétés de la graisse utilisée.

I.3.2.2. Les huiles :

La lubrification à l'huile est généralement employée lorsque le roulement est intégré dans un mécanisme déjà lubrifié à l'huile (réducteur, boîte de vitesses) ou bien lorsqu'il peut bénéficier d'un système de graissage centralisé où l'huile est utilisée aussi comme réfrigérant.

- **Huile végétale** : est un corps gras extrait d'une plante oléagineuse, c'est-à-dire une plante dont les graines, noix ou fruits contiennent des lipides. On nomme également huile végétale les "macérats" huileux et les beurres végétaux
- **Huile synthétiques** : sont obtenues par synthèse chimique. Leur utilisation nécessite parfois des précautions.

I.3.2.3. Les lubrifiants solides :

Sont utilisés principalement pour des opérations de lubrification sous conditions extrêmes (par exemple sous conditions de frictions sévères). Qui bien souvent peut aussi se substituer au bisulfure

Eléments Bibliographiques

de molybdène (MoS_2). Ils sont utilisés brut sous forme de poudre, dans des suspensions, mélangés à des métaux ou du plastique, dans des vernis de glissement et dans les garnitures de friction.

I.3.2.4. Les pâtes :

Sont utilisées dans les roulements tournants lentement (roulements à billes et paliers), pour des lubrifications simples, en tant que pâtes de montage, de séparation, agents conducteurs mais aussi pour les températures supérieures à $+300^\circ\text{C}$ (évaporation de l'huile de base). Grâce à l'action des lubrifiants solides, les pâtes sont parfaites pour les applications sous fortes charges. Nous les utilisons afin d'améliorer leurs propriétés lubrifiantes et de séparation.

I.3.3. Caractéristique des lubrifiants :

On s'intéressera à quelques propriétés essentielles comme la viscosité et le point d'écoulement.

I.3.3.1. La viscosité :

Plus une huile est épaisse, plus sa viscosité est élevée. La fluidité est la propriété inverse de la viscosité. La viscosité de la majorité des fluides diminue lorsque la température augmente.

I.3.3.2. Viscosité cinématique (ν) :

Elle est déterminée en mesurant, à une vitesse donnée, la durée de l'écoulement d'un volume connu de liquide à travers un appareil comportant un orifice (tube capillaire) de dimensions normalisées.

Son unité est $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$: stoke (st) ou centistokes (cst).

$$1 \text{ cst} = 1 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}; 106 \text{ cst} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

I.3.3.3. Viscosité dynamique (μ) :

C'est le produit de la viscosité cinématique (ν) par la masse volumique du fluide (ρ)

$$\mu = \nu \cdot \rho ; \text{ avec } (\mu) \text{ en pa.s ; poise(p) ; } 1 \text{ poise} = 1 \text{ p} = 0,1 \text{ pa.s.}$$

Éléments Bibliographiques

I.3.3.4. Le point d'écoulement :

C'est la température à partir de laquelle, une huile chauffée, puis refroidie dans des conditions bien précises, cesse de couler (début de cristallisation ou de solidification).

I.3.4. Principales classifications :

I.3.4.1. Classification des lubrifiants par le domaine d'utilisation :

La norme ISO 6743 établit un système général de classification qui s'applique aux lubrifiants, huiles industrielles et produits connexes, désignés par la lettre préfixe L.

Exemple :

Un lubrifiant est désigné par le symbole suivant: ISO L HM 32.

L : Lubrifiant

HM : Hydraulique, anti-usure, anti-oxydant, anti-corrosion.

32 : Grade ISO VG 32 (32cst à 40°C)

Tableau I.2 : Classification des lubrifiants par le domaine d'utilisation

Lettre symbole	Domaine d'utilisation
A	Graissage perdu
B	Démoulage
C	Engrenages
D	Compresseurs, pompes à vide
E	Moteurs à combustion interne
F	Broches, paliers et embrayages associés
G	Glissières
H	Systèmes hydrauliques
M	Travail des métaux
N	Isolation électrique
P	Outils pneumatiques
Q	Transfert de chaleur
R	Protection temporaire contre la corrosion
T	Turbines
U	Traitement thermique
X	Application nécessitant l'emploi de graisse
Y	Autres applications
Z	Cylindres pour machine à vapeur

Éléments Bibliographiques

I.3.4.2. Classification ISO :

On classe les huiles à partir de leur viscosité cinématique. Désignation ISO VG suivi de la valeur de la viscosité mesuré à 40°C en centistoke. Exemple une huile ISO VG 22 a pour limites de la viscosité moyenne la plus probable 24.2 cst, 22 cst représentent la viscosité moyenne la plus probable.

Tableau I.3 : Classification iso de la viscosité des huiles

Classe ISO de viscosité	Limites de viscosité cst à 40°C	Viscosité moyenne
ISO VG 2	1,98 à 2,42	2,2
ISO VG 3	2,88 à 3,52	3,2
ISO VG 5	4,14 à 5,06	4,6
ISO VG 7	6,12 à 7,48	6,8
ISO VG 10	9,00 à 11,0	10
ISO VG 15	13,5 à 16,5	15
ISO VG 22	19,8 à 24,2	22
ISO VG 32	28,8 à 35,2	32
ISO VG 46	41,4 à 50,6	46
ISO VG 68	61,2 à 74,8	68
ISO VG 100	90,0 à 110	100
ISO VG 150	135 à 165	150
ISO VG 220	198 à 242	220
ISO VG 320	288 à 352	320
ISO VG 460	414 à 506	460
ISO VG 680	612 à 748	680
ISO VG 1000	900 à 1100	1000
ISO VG 1500	1350 à 1650	1500

I.3.4.3. Classification SAE :

Elle est utilisée pour l'automobile et les véhicules industriels. Elle classe les huiles par tranches ou intervalles de viscosités cinématiques.

- La classification SAE 20, SAE 30,..., pour huiles mono grades, utilise la viscosité à 100°C (huiles dites pour « hautes » températures).
- La classification SAE 5W, SAE 0W (W pour Winter) utilise la viscosité à -18°C (huiles dites pour « basse » températures ou « hiver »).

Eléments Bibliographiques

- Huiles multigrades : elles présentent deux viscosités caractéristiques, par exemple : l'huile SAE 10W-40 a la même viscosité qu'une huile SAE 40 à 100°C et une même viscosité qu'une huile SAE 10W à -18°C
- Les « huiles multi-fonctionnelle » permettent de simplifier l'utilisation et la maintenance. Exemple : huile utilisable à la fois pour le moteur, la boîte, le pont et l'hydraulique sur des matériels destinés à l'agriculture.

Tableau I.4 : Classification SAE des huiles

Grade SAE	Viscosité cinématique à 100°C (cst)	Viscosité dynamique maxi (Pa.s)
0W	3,8 mini	3,25 à -30°C
5W	3,8 mini	3,5 à -25°C
10W	4,1 mini	3,5 à -20°C
15W	5,6 mini	3,5 à -15°C
20W	5,6 mini	4,5 à -10°C
25W	9,3 mini	6 à -5°C
20	5,6 à 9,3	
30	9,3 à 12,5	
40	12,5 à 16,3	
50	16,3 à 21,9	

I.3.5. Analyses physico-chimiques :

I.3.5.1. La viscosité :

Est essentielle puisque la comparaison avec celle du lubrifiant usagé permet de vérifier ses propriétés d'écoulement mais aussi son éventuelle dilution, par du carburant par exemple. Selon la norme NF T 60-100, il faut mesurer le temps d'écoulement d'une quantité de lubrifiant à travers un capillaire pourvu de deux repères déterminant une constante à une température donnée [24].

I.3.5.2. L'indice de viscosité (VI) :

Caractérise le comportement de la viscosité en fonction de la température. Pour analyser l'huile donnée, on choisit deux huiles de référence, une huile 0 et une huile 100 ayant même viscosité à 100°C que l'huile à caractériser puis on compare leur viscosité cinématique à 40°C [24].

Éléments Bibliographiques

I.4. La tribologie :

La tribologie est la science qui étudie l'ensemble des phénomènes qui ont lieu lorsque des corps en contact sont mis en mouvement relatif. Elle présente trois aspects distincts : le frottement qui est la résistance à un déplacement imposé, l'usure suite à la dégradation des surfaces qui se traduit par une perte de matière et la lubrification qui consiste à interposer un fluide entre les deux corps en contact. C'est une science pluridisciplinaire faisant intervenir des notions de mécanique, de physicochimie et de science des matériaux en général.

Au début du vingtième siècle, la tribologie s'appuyait sur l'étude des volumes, avec une domination des concepts de la mécanique permettant d'établir des lois de comportement au milieu du vingtième siècle, la tribologie s'est tournée vers l'étude des surfaces grâce aux concepts de la physique des surfaces. Depuis une vingtaine d'années, la recherche en tribologie porte sur l'étude de la dynamique des interfaces avec la prise de conscience du rôle fondamental des éléments interfaciaux dans un contact.

Les phénomènes de frottement ne sont pas décrits par des propriétés intrinsèques des matériaux, ce qui rend leur prédiction particulièrement délicate. En outre, le frottement et l'usure sont des phénomènes indépendants. Il est en effet possible de concevoir des systèmes à usure faible et frottement élevé (freins) ou à usure forte et frottement faible (usinage).

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

I.4.1. Surface :

La notion de surface est définie par l'ensemble des propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux en présence mais aussi par les caractéristiques géométriques du contact. Citons par exemple l'énergie superficielle : elle influe sur les propriétés de frottement à sec des matériaux au travers des forces d'adhésion mais aussi sur le comportement du contact en régime lubrifié au travers des phénomènes de mouillage et d'étalement. La topographie est une caractéristique géométrique de grande importance. La rugosité joue un rôle essentiel puisqu'elle détermine l'aire effective de contact et donc la distribution des pressions superficielles. Il faut aussi garder à l'esprit qu'un état poli miroir ne correspond pas forcément à la rugosité idéale des surfaces pour conférer

Éléments Bibliographiques

une vie saine au système tribologique. Par exemple, dans le cas de deux matériaux frottant de dureté différente, la diminution de la rugosité du corps le plus dur est une bonne solution pour diminuer le frottement et l'usure par abrasion alors qu'une certaine rugosité du corps le moins dur facilite la rétention d'un lubrifiant et limite également le frottement et l'usure par adhésion.

I.4.2. Le circuit tribologique :

Au cours du frottement, les particules du troisième corps sont constamment en mouvement et sont soumis à des gradients de vitesse. Cette circulation de matière à l'intérieur et à l'extérieur du contact est définie sous le terme de circuit tribologique, concept proposé par Y. Berthier [25-26] pour compléter celui des mécanismes d'accommodation des vitesses et comprendre la relation entre le troisième corps et l'usure dans un contact donné. Il s'agit d'une représentation en deux dimensions des débits de troisième corps dans un contact élémentaire (**Figure I.19**).

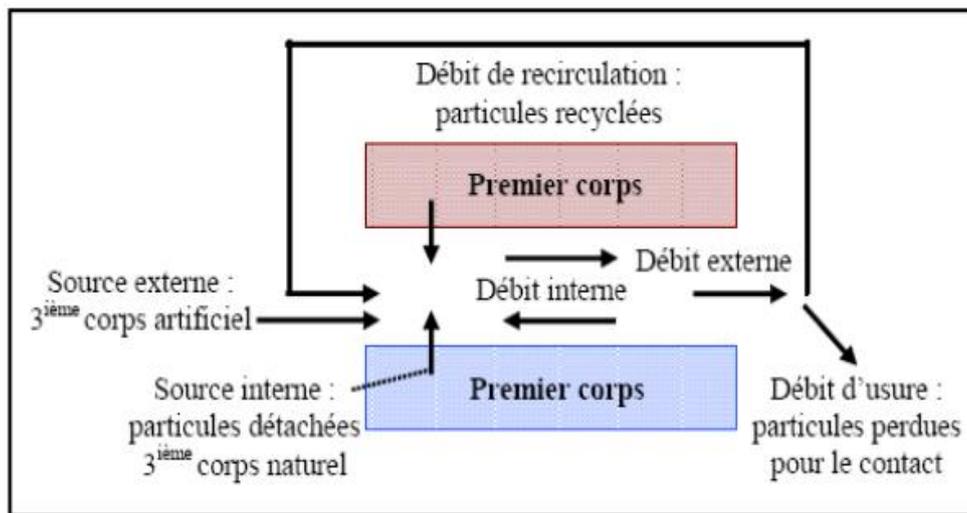


Figure I.19 : Représentation schématique du circuit tribologique dans le cas d'un contact entre deux solides. [27]

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

Éléments Bibliographiques

contact. Il se divise en deux composantes : un débit de recirculation lorsque les particules sont réintroduites dans le contact et un débit d'usure lorsque les particules sont définitivement perdues pour le contact et ne participent plus à l'accommodation de vitesse [27].

I.4.3. Paramètres fonctionnels :

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

I.4.3.1. Mode de contact :

Il s'agit de définir la nature et la géométrie du contact. Ces informations participeront à l'évaluation du champ de contraintes imposé au contact. Par nature du contact on entend la définition générale de ce qui constitue le contact : solide/solide, liquide/solide, liquide + particules/solide, liquide + vapeur/solide...La géométrie du contact caractérise la forme des surfaces qui limitent les solides au voisinage de la zone de contact. On définit trois types de contacts:

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

I.4.3.2. La charge du contact :

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

Éléments Bibliographiques

I.4.3.3. La vitesse du contact :

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

I.4.4. Les différents types d'usure :

Les mécanismes de dégradation des surfaces rencontrés sont nombreux et variés comme on peut le constater dans le **(Tableau I.5)**. 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 dans le mécanisme en mouvement, à la perte de cote, à l'émission de débris, à l'endommagement de surfaces [29].

Éléments Bibliographiques

Tableau I.5: différentes formes d'usure. [29]

Forme d'usure	Manifestation	Circonstances d'apparition
Usure par adhésion	Des particules sont transférées d'un corps sur l'autre ; si les matériaux sont de natures différentes, le transfert s'effectue préférentiellement du corps le plus tendre, ou le moins tenace, sur le corps le plus dur.	Frottement donnant lieu à des liaisons (jusqu'à la soudure) dont la résistance mécanique est supérieure à celle de l'un au moins des matériaux.
Usure par sur contraintes : Déformation plastiques Fractures, égrènements	Modification géométriques et dimensionnelles (en général sans perte de poids) Fissurations, décohésion-écaillage superficiel, émission de particules.	Pressions moyennes élevées, ou surpressions locales, entraînant dépassement de la limite d'élasticité Contraintes anormalement élevées par rapport aux caractéristiques mécaniques des matériaux;
Usure par fatigue des surfaces	Piqures, cavités, pouvant intéresser des profondeurs de plusieurs dixièmes de millimètres	Contacts soumis à des chargements cycliques avec des sollicitations de roulement, de chocs, ou de glissement en régime lubrifié.
Usure par abrasion-érosion	Pertes de poids et/ou de cote Rayures, sillons cavités... dus à des effets de coupe ou de déformation.	Abrasion a deux corps : les rugosités, défauts de surface, labourent ou abrasent l'antagoniste ; Abrasion a trois corps : des particules dures et pulvérulentes sont présentes à l'interface ; ces particules sont libres de se mouvoir entre les surfaces ou sont enchâssées dans l'une d'entre elles.
Usure par fretting corrosion	Coloration des surfaces Usure par abrasion avec perte de cote.	Ensembles mécaniques soumis à vibrations ; Pièces soumises à des mouvements relatifs alternés de faible amplitude.

Eléments Bibliographiques

En réalité ces mécanismes, dits d'usure, sont des mécanismes de transformations tribologiques de surface avec ou sans détachement de particules ; et l'usure, au sens de la mécanique, se traduit par l'émission de débris hors du contact dans le respect de la conservation des débits.

I.4.5. Evaluation de l'usure :

En 1953, Archard établit expérimentalement une relation permettant d'estimer pour un contact pion-disque le volume de matériau usé V dans le cas d'un contact glissant à vitesse constante[30]. et pour des matériaux de dureté très différente :

$$V = K \frac{F_n}{P_m} d$$

En fonction d'un coefficient d'usure k sans dimension, de la force normale appliquée F_n de la dureté ou de la contrainte d'écoulement P_m du matériau le plus mou et de la distance de glissement d . La loi d'Archard s'exprime également sous la forme :

$$V = k F_n d$$

Avec :

$$k = K P_m$$

K : vitesse d'usure ($mm^3 \cdot N^{-1} \cdot m^{-1}$).

V : le volume de matière perdue (m^3).

F_n : la charge appliquée (N).

d : la longueur de glissement (m).

I.4.6. Le frottement :

Le frottement peut être défini comme la résistance au mouvement qui existe lorsqu'un objet solide est déplacé tangentiellement par rapport à la surface d'un autre qu'il touche, ou lorsque l'on essaie de provoquer un autre déplacement [31].

Pour présenter les différents phénomènes de frottements ainsi que leurs différents modèles, on s'intéresse à un mobile de masse m sur un plan horizontal. Il est soumis à son propre poids suivant l'axe (Oy) et subit une force u suivant l'axe (Ox). Comme sur la (**Figure I. 20**), nous considérons un mouvement rectiligne.

Éléments Bibliographiques

Quel que soit le matériau d'un solide, sa surface n'est pas parfaitement lisse. Comme le montre la (**Figure I. 20**), elle est rugueuse, comportant des irrégularités dues à l'usinage de la pièce ou même à sa nature. Lorsque 2 pièces mécaniques en contact se déplacent l'une par rapport à l'autre, ces aspérités se déforiment et s'entrechoquent, dissipant ainsi de l'énergie.

Cette énergie est représentée de façon macroscopique par les frottements. Suivant les matériaux utilisés, il y aura soit plus de déformations élastiques soit plus de chocs pour vanter jusqu'à arracher de la matière [32].

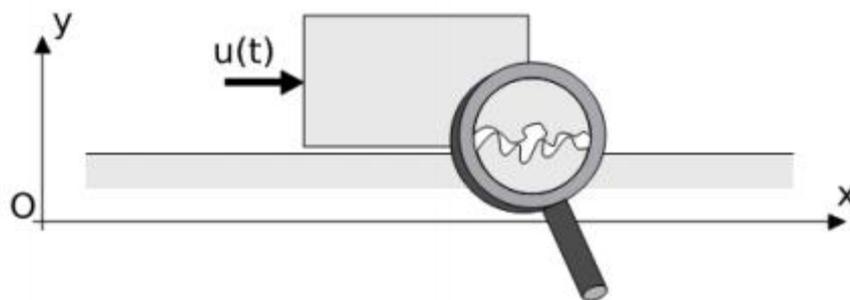


Figure I.20: Solide sur un support horizontal. [37].

Les normes ne définissent pas le frottement mais la force de frottement qui est la force résistante tangentielle à l'interface entre deux corps lorsque, sous l'action d'une force extérieure, un corps se déplace ou tend à se déplacer relativement à l'autre [33].

I.4.6.1. Types de frottement :

Il existe trois types de frottement :

I.4.6.1.1. Frottement sec :

Le frottement sec désigne l'ensemble des phénomènes qui naissent dans la zone de contact entre deux corps, en l'absence de lubrification, et qui s'opposent au glissement de ces corps. S'il y a glissement relatif entre les deux corps en contact, on parle du frottement dynamique, sinon le frottement est dit statique. La compréhension des mécanismes entrant en jeu est restée longtemps très lacunaire, malgré l'intérêt porté à ce problème depuis déjà de nombreuses années. Ce n'est que ces dernières décennies, grâce à l'accumulation de données expérimentales et de résultats théoriques, que des progrès importants ont été faits [34]. Cependant, des progrès importants ont été réalisés à la suite des travaux de Holm en 1938, qui montrent que les aspérités en contact se

Éléments Bibliographiques

déforment plastiquement et peuvent se souder, ainsi la force de frottement est directement reliée aux contraintes de cisaillement des jonctions formées.

Le modèle de Bowden et Tabor suppose que le frottement sec entre deux surfaces rugueuses est dû essentiellement à deux processus physiques fondamentaux: le cisaillement des micros jonctions adhésives formées au niveau des points de contact et le labourage des surfaces par les aspérités. La force du frottement sec est ainsi la somme d'une force de cisaillement due à l'adhésion et d'une force de déformation due au labourage [35].

$$F_t = F_{ad} + F_{def}$$

I.4.6.1.2. Frottement hydrodynamique :

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

I.4.6.1.3. Frottement onctueux :

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

CHAPITRE II

MATÉRIAUX ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

Introduction :

L'objectif de cette étude est la réalisation d'un dépôt en molybdène sous forme d'un fil sur un substrat en acier de type E24, on réalise le revêtement par une projection thermique en se servant d'un pistolet d'arc électrique entre deux fils, en réalise ce traitement dans le but d'améliorer la dureté superficielle du substrat pour ensuite effectuer le procédé d'usure sec et lubrifié, le choix du matériau (molybdène) est essentielle pour ses caractéristiques d'autolubrifiant.

En prend les échantillons réalisés (avec dépôt et sans dépôt) et on leurs fait subir le test d'usure dans une configuration pion-cylindre rotatif à charge appliquée fix (10N et 30N), ensuite à différents charges (10,20,30 et 40N) avec des vitesses de glissement de 0.5m/set 1m/s en fonction du temps afin d'évaluer les pertes de masse relative.

A la fin de chaque étape de ce procédé, on effectue une observation métallurgique à l'aide de microscope optique pour analyser et comprendre l'effet subi par le substrat.

II.1. Matériaux utilisés :

II.1.1. Le substrat :

Le substrat utilise pour réaliser les dépôts est un acier de construction mécanique soudable qui correspond a S235JR (EN 10027) qui est un acier non allié, doux hypoeutectoïde, avec une résistance a la traction de 37 daN/mm^2 et une limite élastique de 235 MP_a

II.1.2. Dépôts réalisés :

Dans notre travail, nous avons utilisé un fil en molybdène, ce matériau projeté thermiquement adhère par lui-même aux aciers, ce qui permet de l'utiliser en couche de 1mm

Matériaux et techniques expérimentales

Il est conçue pour avoir une surface très dure qui se caractérise par ces propriétés de résistance à l'usure et au frottement et à la corrosion à haute température ce fil a été projeté sur les surfaces des échantillons par le pistolet arc électrique.

Tableau II.1 : Compositions et caractéristiques du fil utilisé pour le dépôt donné par le fournisseur.

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

II.2. Présentation des échantillons :

II.2.1. Elaboration des échantillons :

Les échantillons utilisés pour la projection thermique, ont été usinés sur le tour parallèle au niveau du hall de technologie ou 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.

Matériaux et techniques expérimentales

Les échantillons élaborés présentent la forme :

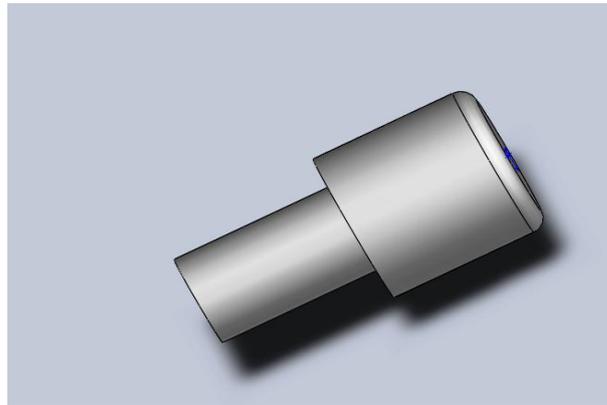


Figure II.1 : Echantillon utilisé pour la projection.

II.2.2. Préparation des surfaces à revêtir :

A la fin de l'usinage des échantillons, on est passé à la procédure de préparation de surface qui s'effectue comme suit :

II.2.2.1. Dégraissage :

Le but de ce traitement est d'éliminer toutes traces de substances organiques, huiles, produit gras qui s'empiles sur la surface, dues aux différentes manipulations effectuées sur le matériau auparavant (déchargement, accrochage, emballage, etc...). Les échantillons sont dégraissés et nettoyés avec de l'éthanol.

II.2.2.2. Sablage :

Afin de créer des surfaces rugueuses prêtes à se revêtir par un dépôt, on a donc effectué un sablage avec du corindon. Ce pré-traitement consiste à cribler la surface à revêtir par un jet de particules à une pression d'air de 5 bars. Il offre l'avantage simultané de donner à la surface une bonne rugosité et d'induire des contraintes résiduelles de compression donnant ainsi une bonne adhérence physique et mécanique.

A la fin de cette opération, on dégraisse et on nettoie les échantillons avec de l'éthanol afin d'éliminer les souillures.

Matériaux et techniques expérimentales

II.2.2.3. Préchauffage :

La différence de température entre le substrat et le métal de dépôt nous oblige à effectuer un préchauffage sur les substrats d'acier E24 afin d'augmenter le pouvoir d'adhérence et aussi pour parfaire la surface des porosités et des impuretés telle que les graisses et les huiles qui sont absorbés dans les porosités.

II.3. Réalisation des dépôts :

Il est essentiel de bien respecter certaines étapes avant de procéder à l'opération de projection, telles que la bonne usinabilité des échantillons, respecte la forme déterminée (**voir Figure I.1**) ainsi que la préparation de la surface par sablage et enfin les paramètres de projection.

II.3.1. Paramètres de projection :

Le dépôt réalisé a été obtenu selon les paramètres de projection utilisés par l'entreprise, ils sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II.2 : Paramètres de projection utilisée par l'entreprise.

Matériaux de projection	Pression de l'air	Voltage	Intensité	taux de Dépôt	Surface dépôt	Vitesse projection	Distance projection	Diamètre fil
Fil molybdène	4,5 bar	35 V	100 A	60 %	8m ² /h /0,1m	2m/min	140mm	1,6mm

II.3.2. Pistolet utilisé :

L'arc électrique entre deux fils, le matériau projeté est introduit sous forme d'un fil de molybdène consommables à l'aide d'un jet de gaz comprimé qui sert à pulvériser et à projeter le métal fondu en fines gouttelettes sur le substrat. (**Figure II.2**)

L'équipement consiste en un pistolet de projection, un système d'avancement des fils, un générateur de courant asservi par une régulation automatique et une source de gaz comprimé.

Matériaux et techniques expérimentales

La température dans la zone de fusion peut être de l'ordre de 6000 K. Le métal fondu est pulvérisé grâce au jet de gaz comprimé et projeté sur le substrat

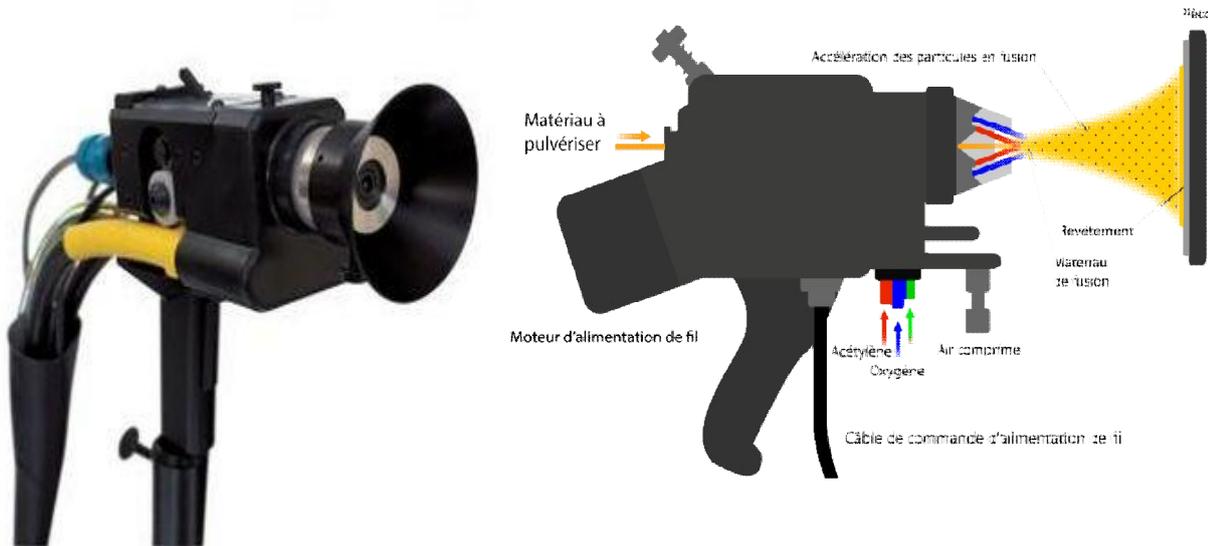


Figure II.2. Pistolet arc électrique entre deux fils.

II.4. Test tribologique :

II.4.1. Préparation des échantillons pour les essais d'usure :

Avant de commencer les tests d'usure on a d'abord effectué un polissage mécanique qui consiste à rendre les surfaces uniformes afin d'avoir un maximum de contact entre le pion et le cylindre.

On a procédé par abrasion à l'aide de papiers abrasifs revêtus de carbure de silicium de grades progressifs (180, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 grains/ cm²) sous lubrification de l'eau.

II.4.2. Tests Tribologique :

Les essais d'usure sont effectués dans une configuration type pion stationnaire-cylindre rotatif (**Figure II.3**). Le pion présente une tête de diamètre 10mm avec un axe de longueur 20mm et de diamètre 6mm pour les besoins de sa fixation sur la tige articulée du dispositif d'essai d'usure. L'ensemble est monté sur un tour. Les revêtements ont été déposés sur la surface de la tête du pion et polis aux papiers abrasifs jusqu'à la granulométrie fine (1500) pour être dans les mêmes conditions d'une pièce rénovée qui subit systématiquement une rectification. Le cylindre rotatif

Matériaux et techniques expérimentales

utilisé, est un acier martensitique de nuance Z200Cr13 ayant une dureté de 63 HRC à 65 HRC. Les essais d'usure ont été réalisés en deux régime à sec et lubrifié avec charge fixe (10N et 30N) puis à différentes charges (10, 20, 30 et 40N) et deux vitesses de glissement (0,5m/s et 1m/s) pendant 30min La perte de masse pour chaque essai est mesurée à l'aide d'une balance analytique de précision 0,1mg. Enfin en observé les strie causé par le frottement du pion avec le disque a l'aide de microscope optique.

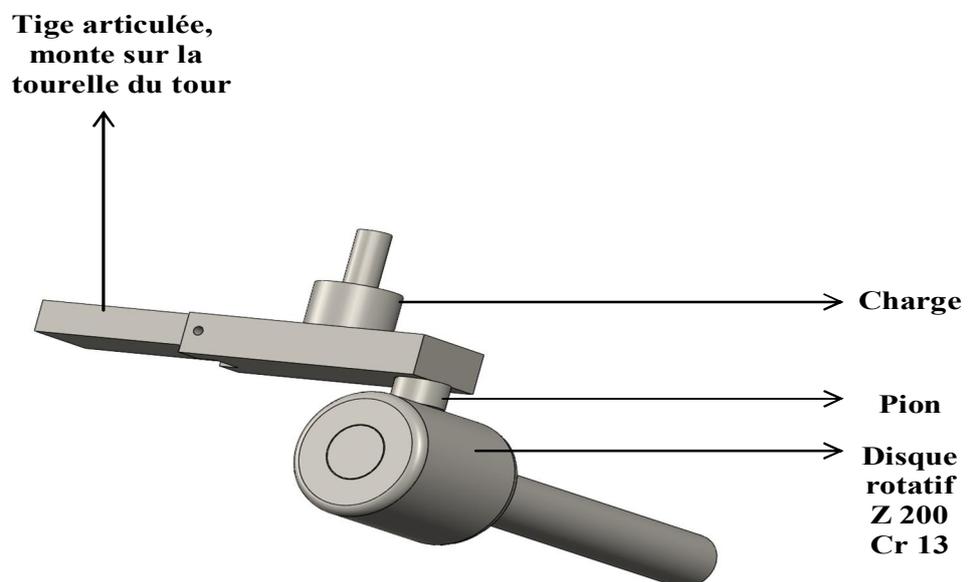


Figure II.3 : Dispositif d'usure utilisé.

II.4.3. Principe du test d'usure :

L'essai d'usure est réalisé à l'aide d'un tribomètre pion-cylindre. Un échantillon pion sur lequel une charge de compression axial est appliquée, il subit un mouvement rotatif (frottement) en étant mis en contact avec un cylindre qui provoque l'usure de l'échantillon. L'essai se déroule sous air ambiant ou milieu lubrifié. Le but de ce principe est d'estimer l'usure (perte de masse, état de surface)

II.4.4. Procédure des essais :

La procédure des tests est comme suit :

Avant l'entame des essais d'usure on nettoie la surface des échantillons avec de l'éthanol

1. Prendre la masse initiale (m_0) de l'échantillon à l'aide d'une balance analytique de précision 0.1 mg.
2. Nettoyer le cylindre monté sur le mandrin.
3. Introduire l'échantillon dans le dispositif, et actionner le tour.
4. Après la fin du temps de chaque étape dans les (30 min) d'essai, on prend la nouvelle valeur de sa masse (m_f) tout en nettoyant l'échantillon des additifs.
5. On mesure la température de l'échantillon pendant chaque étape.
6. Observation des phénomènes d'usure à l'aide d'un microscope optique.
7. Nettoyer le cylindre monté sur le mandrin.
8. A la fin des essais d'usure dans le régime sec on les refait avec les mêmes paramètres dans un régime lubrifié (huile Naftal 10W40 avec une concentration de 2%).

II.4.5. Les paramètres à prendre en compte lors des tests d'usure :

- **Les charges:** Les charges que nous avons appliquées à nos échantillons sont de 10, 20, 30 et 40 Newtons.
- **La vitesse:** Nous avons travaillé avec deux vitesses, 90 trs/min, qui correspond à 0,5 m/s, et 180 trs/min qui correspond à 1 m/s.
- **La durée:** la durée appliquée à nos échantillons est de 30 min.
- **Le milieu:** régime sec, régime lubrifié

II.5. Observation métallurgique :

- **Microscope optique :**

Le microscope optique permet de visualiser des objets ou des détails invisibles pour nos yeux, dont la résolution est trop faible.

Ce qui nous sert à voir les stries causées par le frottement de la surface du pion avec le cylindre.



Figure II.3 : Microscope optique

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Résultats et discussions

Introduction :

Ce chapitre est consacré à la caractérisation microstructurale des surfaces du substrat avec ou sans dépôt à l'aide d'un microscope optique (MO) pour l'observation d'usure, les revêtements sont réalisés par un dépôt d'un fil de molybdène projeté par un pistolet arc électrique entre deux fils.

La deuxième étape, c'est la description des résultats expérimentaux exprimé sous forme de courbe de la perte de masse relative en fonction du temps et de la charge appliquée pendant une heure pour les vitesses de glissement de 0.5 m/s et 1 m/s, test dans deux régimes sec et lubrifiant.

III.1. La caractérisation microstructural :

La microstructure des différents échantillons ont été réalisées en utilisant le microscope optique(MO).

III.1.1. faciès d'usure des échantillons avec ou sans dépôt réalisé par microscope optique(MO) :

Surface de l'échantillon préparé pour les tests d'usure .

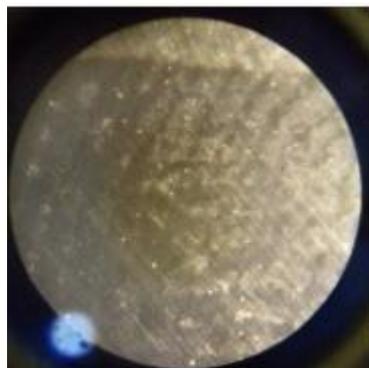


Figure III.1 faciès d'usure de l'échantillon acier préparé pour les tests d'usure.

Résultats et discussions

(1) A 10N/90tr sec

(2) A 20N/90tr sec

(3) A 40N/90tr sec



Figure III.2 faciès d'usure de l'échantillon acier après usure a une vitesse de glissement de 0.5m/s à différentes charge dans un régime sec.

On observe dans la **Figure III.2** :

- (1) Début d'usure sous forme de rayure dans une petite zone.
- (2) Usure plus importante sous forme de sillon dans une zone large.
- (3) Arrachement de matière dans la zone la plus fragile.

On conclut que l'usure est par abrasion, produite d'un frottement sec ce qui a conduit à l'apparition des rayures et des sillons.

(1) A 10N/90tr lubrifié

(2) A 20N/90tr lubrifié

(3) A 40N/90tr lubrifié



Figure III.3 faciès d'usure de l'échantillon acier après usure à une vitesse de glissement de 0.5m/s à différentes charge dans un régime lubrifié.

Résultats et discussions

On observe dans la **Figure III.3** :

- (1) Apparition d'usure sous forme de rayures.
- (2) Formations de cavités et piqures sur toute la surface.
- (3) Strie dans la zone de contact constant et petite piqure aux alentours.

On conclut que l'usure est par érosion et fatigue de la surface, causé par un frottement onctueux ce qui a provoqué l'apparition des rayures et la formation des piqures.

(1) A 10N/180tr sec

(2) 20N/180tr sec

(3) A 40N/180tr sec

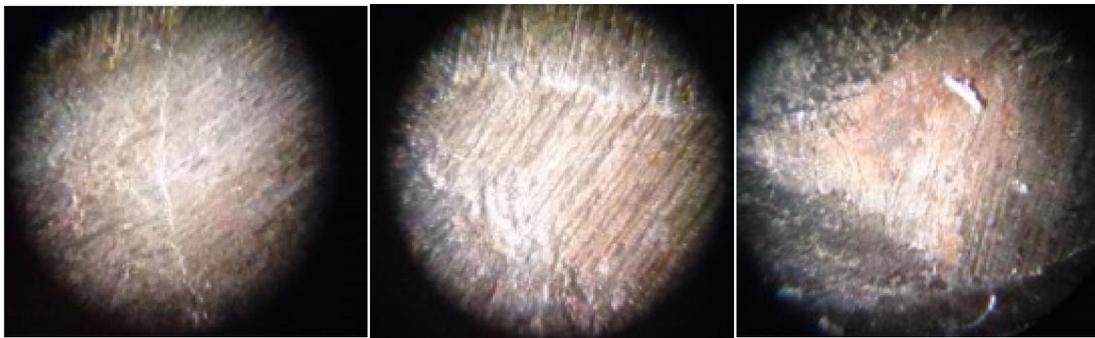


Figure III.4 faciès d'usure de l'échantillon acier après usure a une vitesse de glissement de 1m/s à différentes charge dans un régime sec.

On observe dans la **Figure III.4** :

- (1) Usure sous forme de rayures accumulées et sillons apparition de fissuration
- (2) Formations des stries et propagation des fissures
- (3) Arrachements de matière sur une grande partie de la surface

On conclut que l'usure est par abrasion et fracturation, produite par le frottement sec et à la vibration à sec ce qui a provoqué l'arrachement de matière.

Résultats et discussions

(1) A 10N/180tr lubrifié

(2) A 20N/180tr lubrifié

(3) A 40N/180tr lubrifié

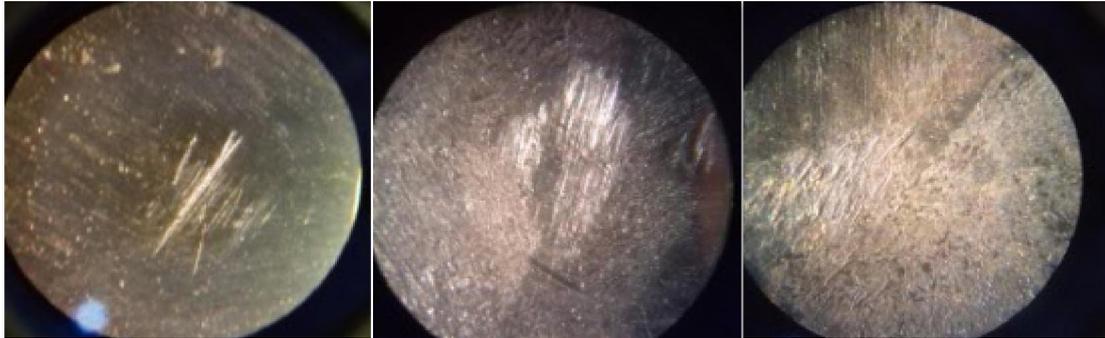


Figure III.5 faciès d'usure de l'échantillon acier après usure à une vitesse de glissement de 1m/s à différentes charge dans un régime lubrifié.

On observe dans la **Figure III.5** :

- (1) Apparition de l'usure sous forme de rayures dans une zone de contact ponctuel
- (2) Propagations des rayures et des sillons dans une faible zone
- (3) Formation des piques et des cavités

On conclut que l'usure est par érosion et fatigue de la surface, due en frottement onctueux ce qui a participé à l'apparition de piques.

Surface de l'échantillon préparé pour les tests d'usure

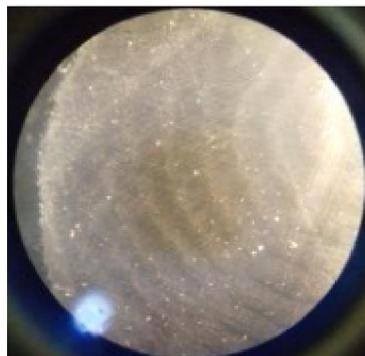


Figure III.6 : faciè d'usure de l'échantillon molybdène préparé pour les tests d'usure

Résultats et discussions

(1) Mo 10N/90tr sec

(2) Mo 20N/90tr sec

(3) Mo 40N/90tr sec



Figure III.7: faciès d'usure de l'échantillon molybdène après usure à une vitesse de glissement de 0.5m/s à différentes charge dans un régime sec.

On observer dans la **Figure III.7** :

- (1) Apparition d'usure sous forme de rayure sur toute la surface
- (2) Usure propagée sous forme de sillons et stries dans une zone large
- (3) Arrachements des particules dans toute la majorité de la surface en contact

On conclut que l'usure est par abrasion, produite d'un frottement sec ce qui a conduit à l'apparition des sillons et des stries et en détachements des particules.

(1) Mo 10N/90tr lubrifié

(2) Mo 20N/90tr lubrifié

(3) Mo40N/90tr lubrifié



Figure III.8: faciès d'usure de l'échantillon molybdène après usure à une vitesse de glissement de 0.5m/s à différentes charge dans un régime lubrifié.

Résultats et discussions

On observe dans la **Figure III.8** :

- (1) Apparition d'usure sous forme de piqures.
- (2) Formations de faibles tries sur toute la surface de contact.
- (3) Strie dans les zones de contact constant et piqure.

On conclut que l'usure est par érosion et fatigue de la surface, causé par un frottement onctueux ce qui a provoqué l'apparition des stries et la formation des piqures.

(1) Mo 10N/180tr sec

(2) Mo 20N/180tr sec

(3) Mo 40N/180tr sec



Figure III.9 : faciès d'usure de l'échantillon molybdène après usure à une vitesse de glissement de 1 m/s à différentes charge dans un régime sec.

On observe dans la **Figure III.9** :

- (1) Apparition d'usure sous forme de rayures accumulées et sillons apparition de légères fissuration.
- (2) Formations des stries et propagation des fissures
- (3) Détachements de particules dans les zones fissurées et formations de cavités.

On conclut que l'usure est par abrasion et fracturation, produite par le frottement sec et à la vibration à sec ce qui a provoqué les fissurations et le détachement des particules.

Résultats et discussions

(1) Mo 10N/180tr lubrifié

(2) Mo 20N/180tr lubrifié

(3) Mo 40N/180tr lubrifié

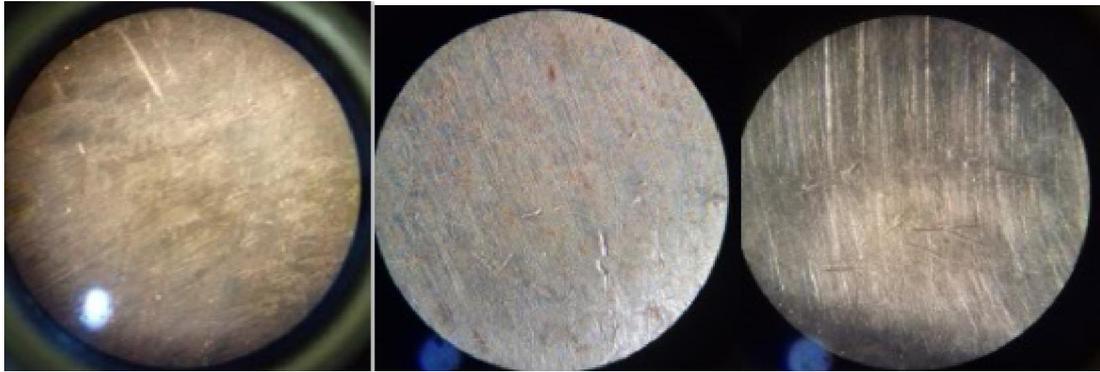


Figure III.10 : faciès d'usure de l'échantillon molybdène après usure à une vitesse de glissement de 0.5m/s à différentes charge dans un régime lubrifié.

On observe dans la **Figure III.10 :**

- (1) Apparition de l'usure sous forme de rayures
- (2) Propagation des rayures et formation de cavités sur une petite zone
- (3) Formation de stries et piqures

On conclut que l'usure est par érosion et fatigue de la surface, due en frottement onctueux ce qui a participé à l'apparition des cavités et des piqures.

III.2. Perte de masse relative des différents échantillons réalisés :

Dans cette partie, on présentera la perte de masse relative sous forme de courbes pour les différents échantillons avec ou sans dépôt pour une charge fixe (10N et 30N) et pour les différentes charges (10N, 20N, 30N et 40N) avec deux vitesses de glissement de 0.5m/s et 1m/s et pour deux régimes sec et lubrifiant, pour observer, déduire et analyser leur comportement vis-à-vis du frottement et leur résistance à l'usure.

Résultats et discussions

III.2.1. Perte de masse relative en fonction du temps a des vitesses de glissement 0.5m/s et 1m/s à charge fixe de 10N et 30N pour échantillons en acier a régime sec ou lubrifié :

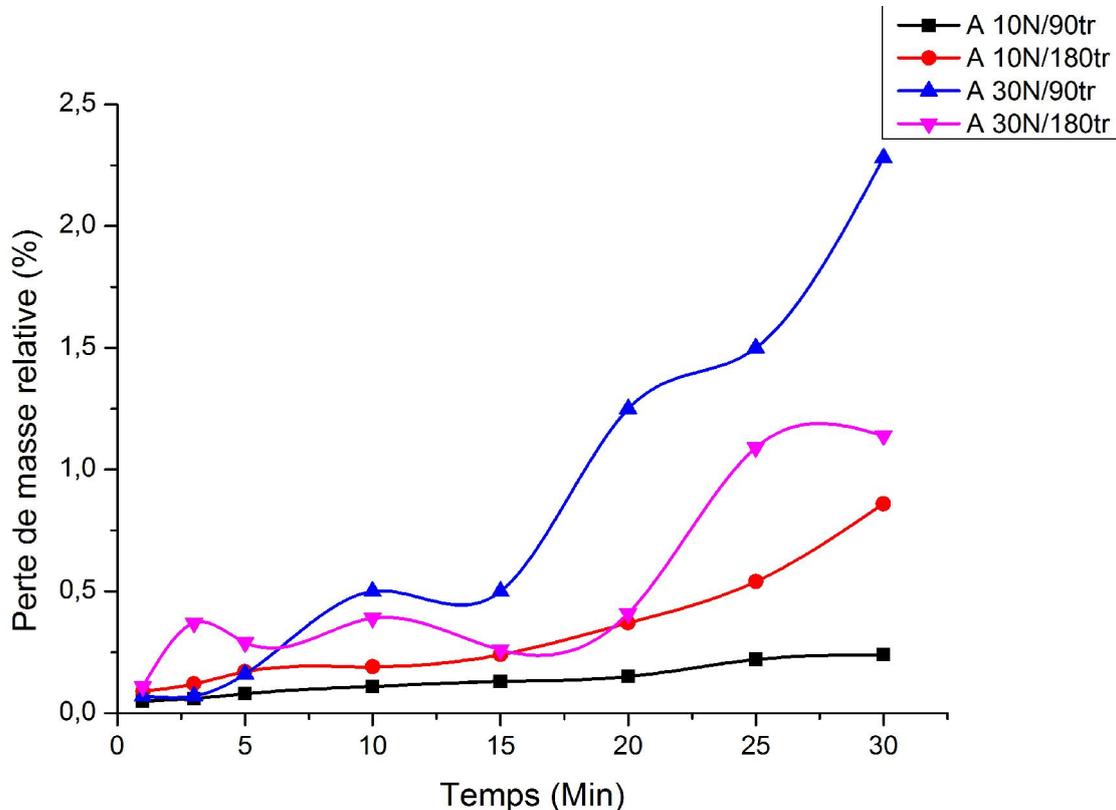


Figure III.11 : Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps dans un régime sec.

L'évaluation de la perte de masse relative en fonction du temps dans un régime sec dépend essentiellement de la charge appliquée on distingue que chaque graphe a la variation suivante :

Graphe (A 10N/0.5m/s) : la perte de masse relative est presque stable et varie de 0.089% à la 5min jusqu'à 0.0268% à la (30min).

Graphe (A 10N/1m/s) : la perte de masse relative est stable à la (3min) avec 0.0133% jusqu'à la (15min) elle atteint 0.0267% suivi d'une augmentation jusqu'à 0.0961% à la (30min).

Graphe (A 30N/0.5m/s) : la perte de masse relative augmente légèrement de 0.0177% à la (3min) jusqu'à 0.0554% a la (15min) suivi d'une augmentation considérable de 0.2537% à la (30min).

Résultats et discussions

Graphe (A 30N/1m/s) : la perte de masse relative est stable de la (3min) avec 0.0413% jusqu'à 0.0459% à la (20min), a la (30min) une augmentation de 0.1279%.

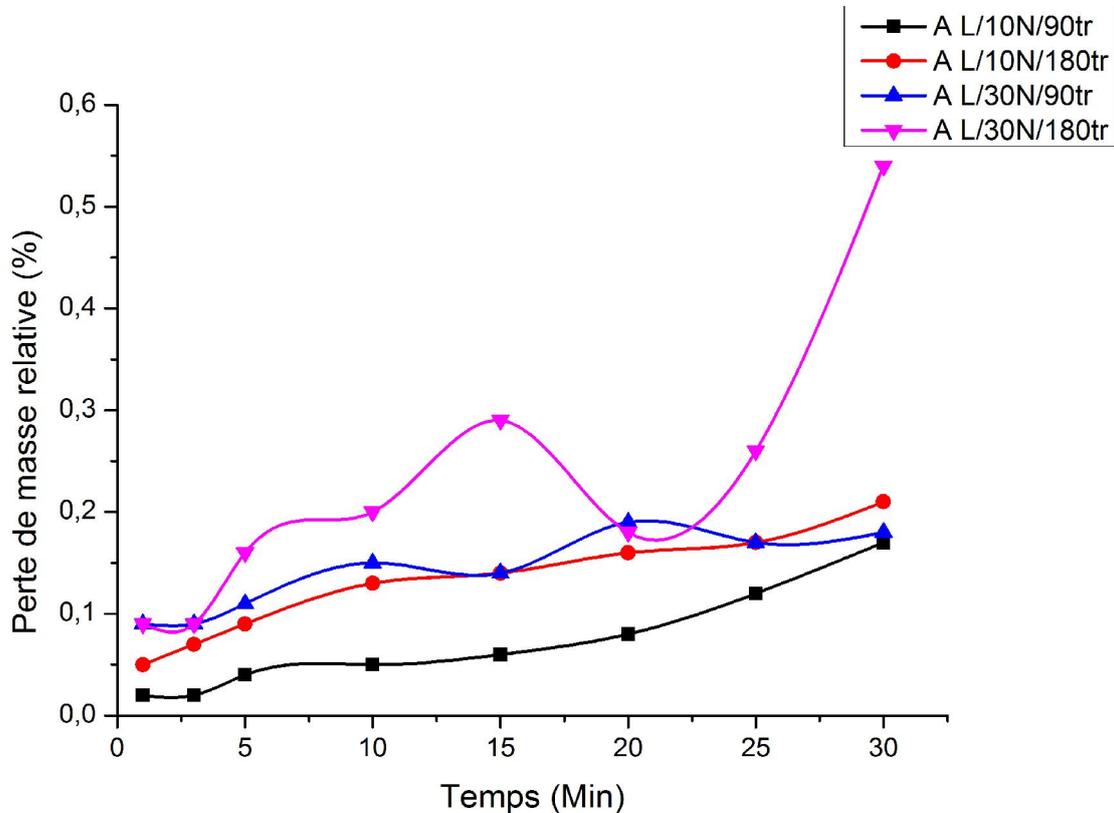


Figure III.12 : Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps régime lubrifié.

L'évaluation de la perte de masse relative en fonction du temps dans le régime lubrifié dépend de la charge appliquée et de la vitesse de glissement on distingue que chaque graphe a la variation suivante :

Graphe (A L/10N/0.5m/s) : la perte de masse relative est pratiquement stable avec 0.0021% à la (3min) jusqu'à 0.0179% à la (30min).

Graphe (A L/10N/1m/s) : la perte de masse relative est stable et varie de 0.0074% à la (3min) jusqu'à 0.0222% à la (30min).

Graphe (A L/30N/0.5m/s) : la perte de masse relative est stable et varie de 0.0095% à la (3min) jusqu'à 0.0190% à la (30min).

Résultats et discussions

Graphe (A L/30N/1m/s) : la perte de masse relative augmente faiblement avec 0.0095% a la (3min) jusqu'à 0.0307% à la (15min) puis légère diminution a la (20min) avec 0.0191%, suivi d'une augmentation de 0.0573% à la 30 (min)

III.2.2 : Perte de masse relative en fonction du temps à des vitesses de glissement 0.5m/s et 1m/s à charge fixe de 10N et 30N pour échantillons en molybdène régime sec ou lubrifié :

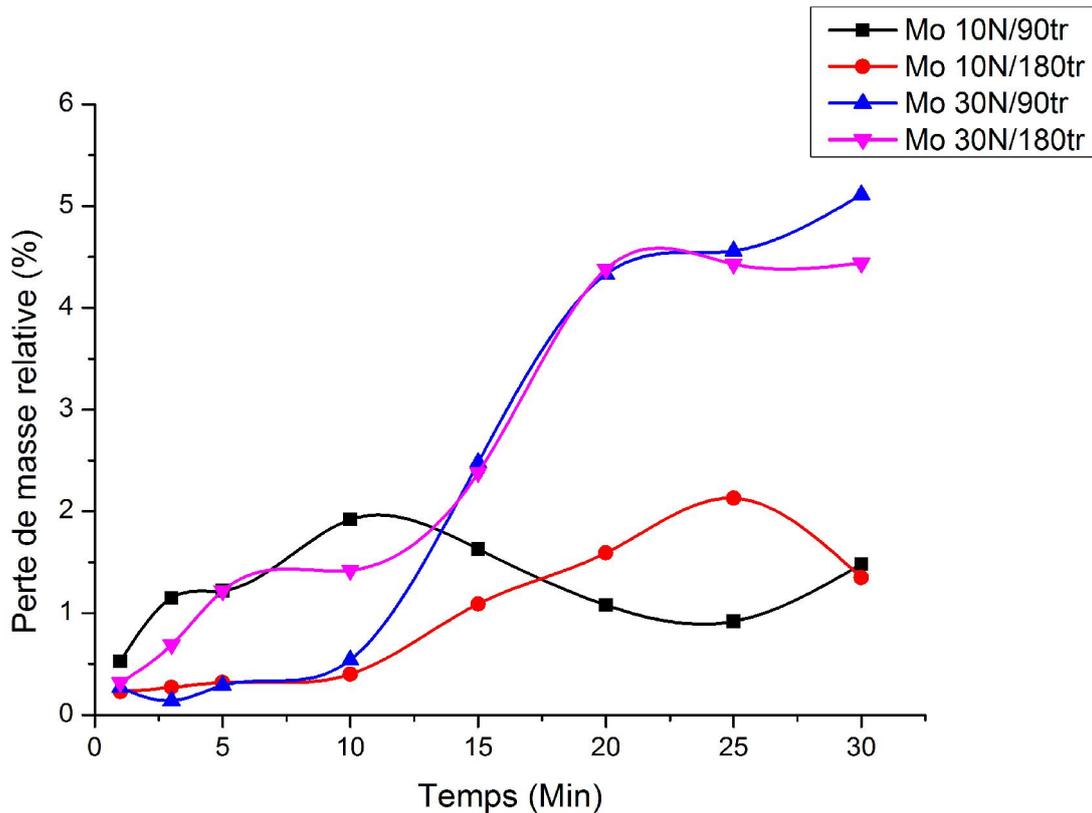


Figure III.13 : Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps régime sec.

L'évaluation de la perte de masse relative en fonction du temps dans le régime sec dépend de la charge appliquée et de la vitesse de glissement on distingue que chaque graphe à la variation suivante :

Graphe (Mo 10N/0.5m/s) : la perte de masse relative augmente de 0.0518% à la (1min) jusqu'à 0.1885 a la (10min) suivi d'une diminution progressive a la (25min) avec 0.0907%, faible augmentation jusqu'à 0.1461% à la (30min).

Résultats et discussions

Graphe (Mo 10N/1m/s) : la perte de masse relative est stable avec 0.0264% à la (3min) jusqu'à 0.0392% à la (10min) puis augmentation progressive jusqu'à la (25min) avec 0.2096% suivi d'une diminution de 0.1331% à la (30min).

Graphe (Mo 30N/0.5m/s) : la perte de masse relative est stable entre la (1min) et (10min) avec 0.0255% jusqu'à 0.0511% suivi d'une forte augmentation de 0.04892% a (30min).

Graphe (Mo 30N/1m/s) : la perte de masse relative augmente considérablement de la (3min) avec 0.0664% jusqu'à 0.4238% à la (20min) suivi d'une stabilité jusqu'à la (30min) avec 0.4333%.

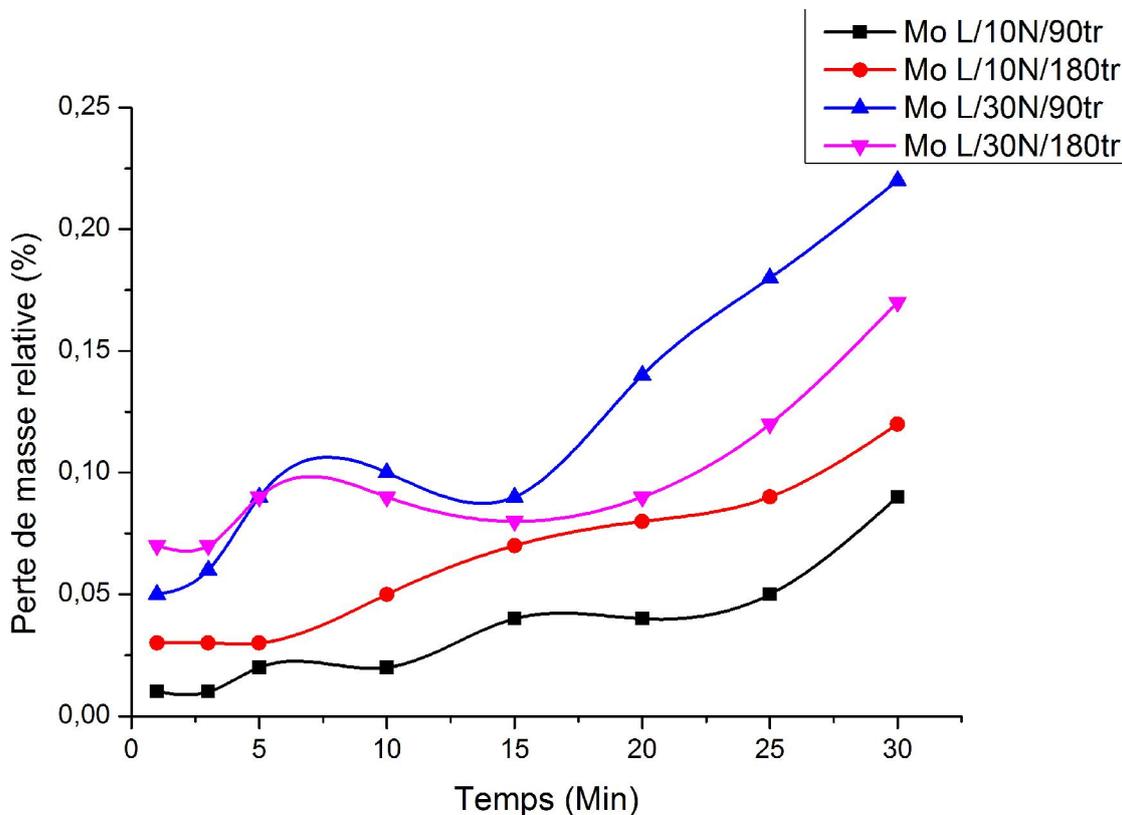


Figure III.14 : Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps régime lubrifié.

L'évaluation de la perte de masse relative en fonction du temps dans le régime lubrifié dépend de la charge appliquée on distingue que chaque graphe a la variation suivante :

Graphe (Mo L/10N/0.5m/s) : la perte de masse relative est presque stable avec 0.001% à la (3min) jusqu'à 0.0088% à la (30min).

Graphe (Mo L/10N/1m/s) : la perte de masse relative stable et varie de 0.0029% à la (1min) jusqu'à 0.118% la (30min).

Résultats et discussions

Graphe (Mo L/30N/0.5m/s) : la perte de masse relative est stable de la (3min) jusqu'à la (15min) de 0.0057% a 0.0086% suivi d'une faible augmentation de 0.0212% à la (30min).

Graphe (Mo L/30N/1m/s) : la perte de masse relative est stable et varie de 0.0067% à la (3min) jusqu'à 0.0086% à la (20min) suivi a la (30min) d'une petite augmentation de 0.0164%.

III.2.3 : Perte de masse relative en fonction du temps à des vitesses de glissement de 0.5m/s et 1m/s à charge fixe de 10N et 30N pour échantillons en acier et molybdène régime sec :

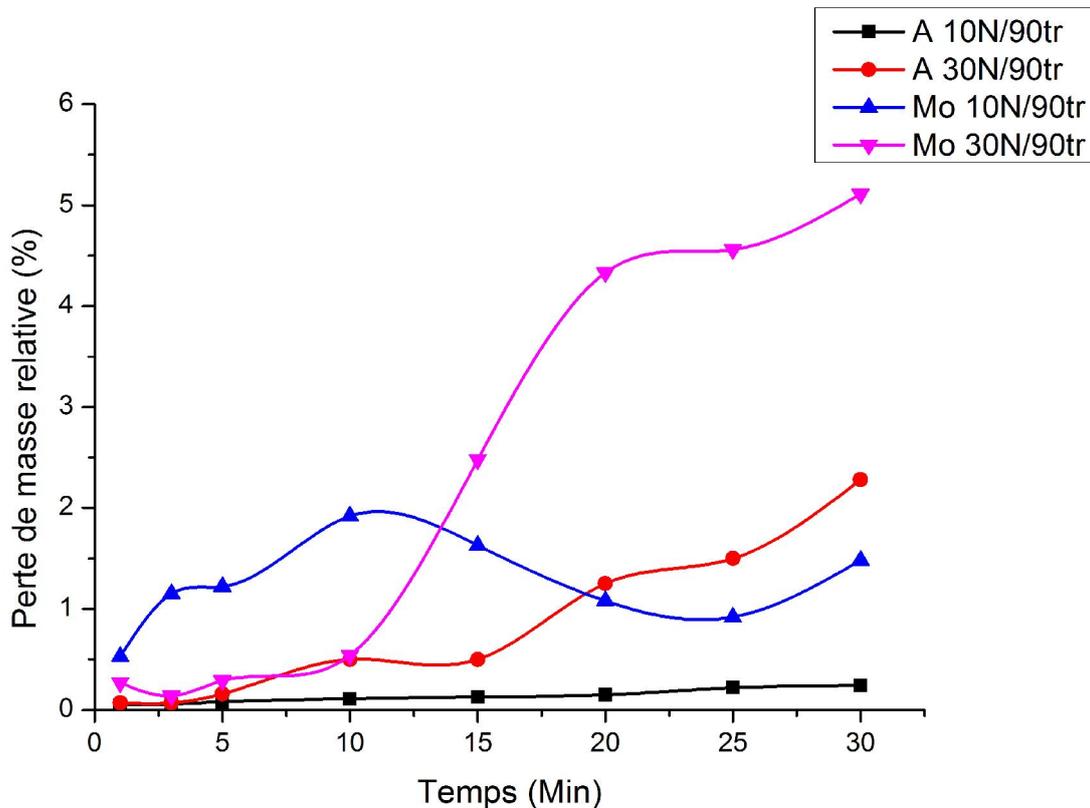


Figure III.15 : Comparaison de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement 0.5m/s (régime sec).

La perte de masse relative en fonction du temps dans le régime sec avec une vitesse de glissement de (0.5m/s) on déduit dans cette figure :

Le premier facteur influençant la perte de masse relative est la charge appliquée, le second facteur et le matériau de l'échantillon.

Résultats et discussions

L'échantillon (Mo 30N/90tr) a subi une perte de masse trop importante ce qui s'explique par la charge appliquée sur ce dernier qui est de (30N) et qui ne indique sa mauvaise résistance à l'usure, ensuite l'échantillon (Mo 10N/90tr) et (A 30N/90tr) avec une perte de masse moins importante, ensuite viens l'échantillon (A 10N/90tr) avec une perte de masse trop faible ce qui ne renseigne sur sa bonne résistance à l'usure lors de la sollicitation aux petites charges.

En constate que dans le régime à sec c l'acier qui a une bonne résistance à l'usure.

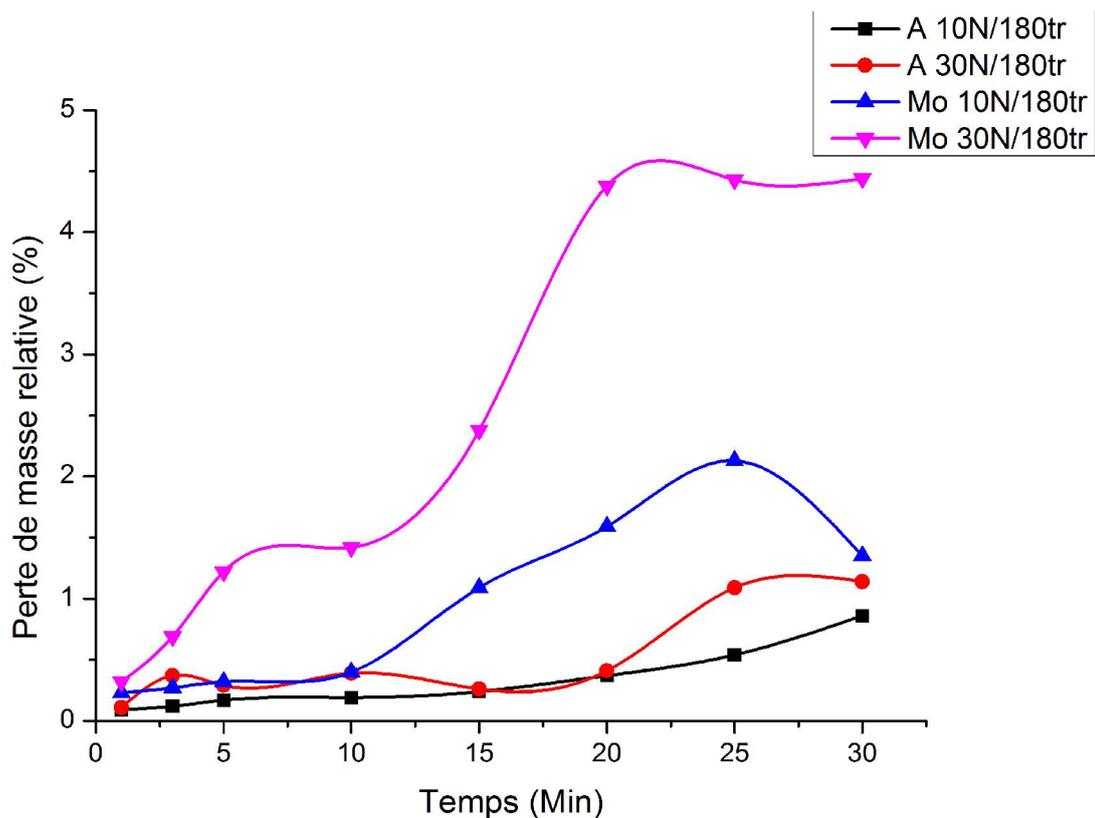


Figure III.16 : Comparaison de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 1m/s (régime sec).

La perte de masse relative en fonction du temps dans le régime sec avec une vitesse de glissement de (1m/s) on déduit de la figure que :

Le premier facteur influençant la perte de masse relative est la charge appliquée, le second facteur et le matériau de l'échantillon.

Résultats et discussions

L'échantillon (Mo 30N/180tr) a subi une perte de masse trop importante suivi de l'échantillon (Mo 10N/180tr) et (A 30N/180tr) avec une perte de masse moins importante, ensuite l'échantillon (A 10N/180tr) avec une perte de masse faible.

Pratiquement c'est le même constat qu'à une vitesse de glissement de 0.5m

III.2.4. Perte de masse relative en fonction du temps à des vitesses de glissement de 0.5m/s et 1m/s à charge fixe de 10N et 30N pour échantillons en acier et molybdène régime lubrifié :

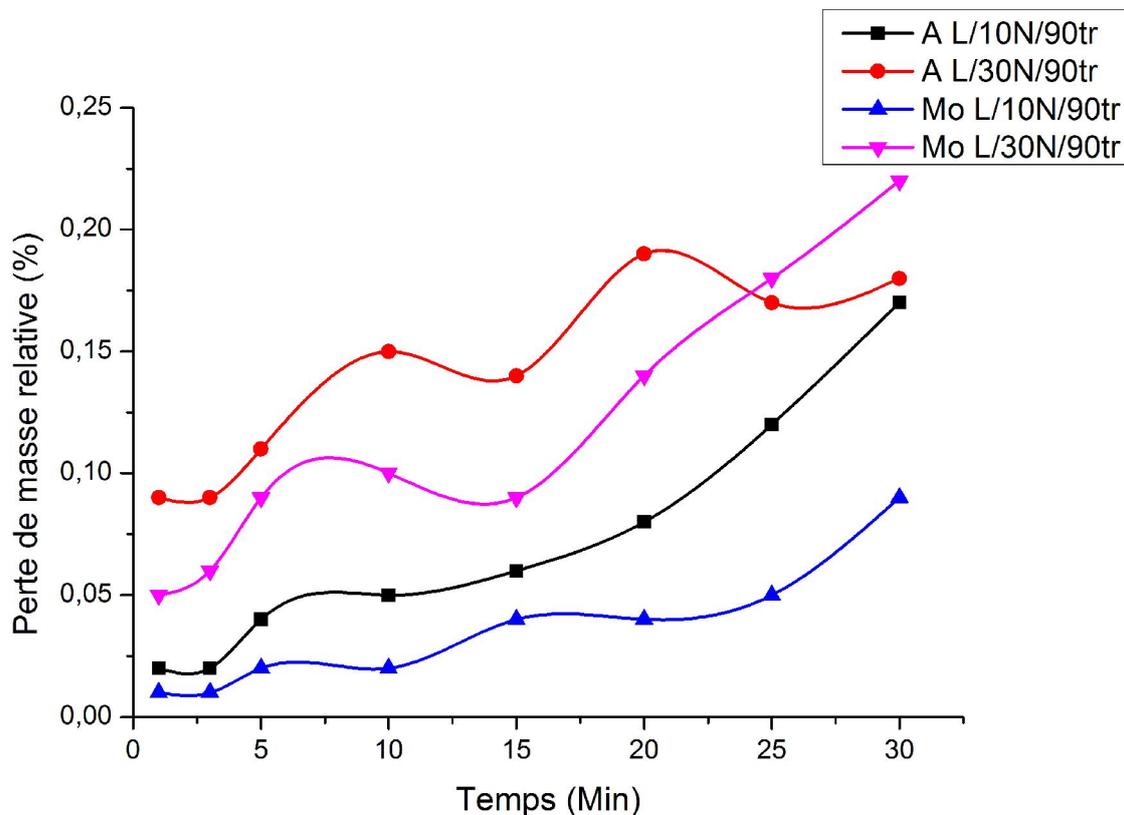


Figure III.17 : Comparaison de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 0.5m/s régime lubrifié.

La perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 0.5m/s dans un régime lubrifié, on déduit de la figure :

Le premier facteur influençant la perte de masse relative est la charge appliquée, le second facteur et le matériau de l'échantillon.

Les quatre échantillons ont subi de faible perte de masse est ceci est dû à l'ajout d'un lubrifiant

Résultats et discussions

L'échantillon (A L/30N) a subi des pertes de masse les plus élevées ce qui s'explique par la charge appliquée de (30N) ensuite l'échantillon (Mo L/30N) avec la même charge que le premier suivi de l'échantillon (A L/10N) et (Mo L/10N).

On remarque que le molybdène a devancé l'acier par sa bonne résistance à l'usure ce qui s'explique par l'ajout de la lubrification.

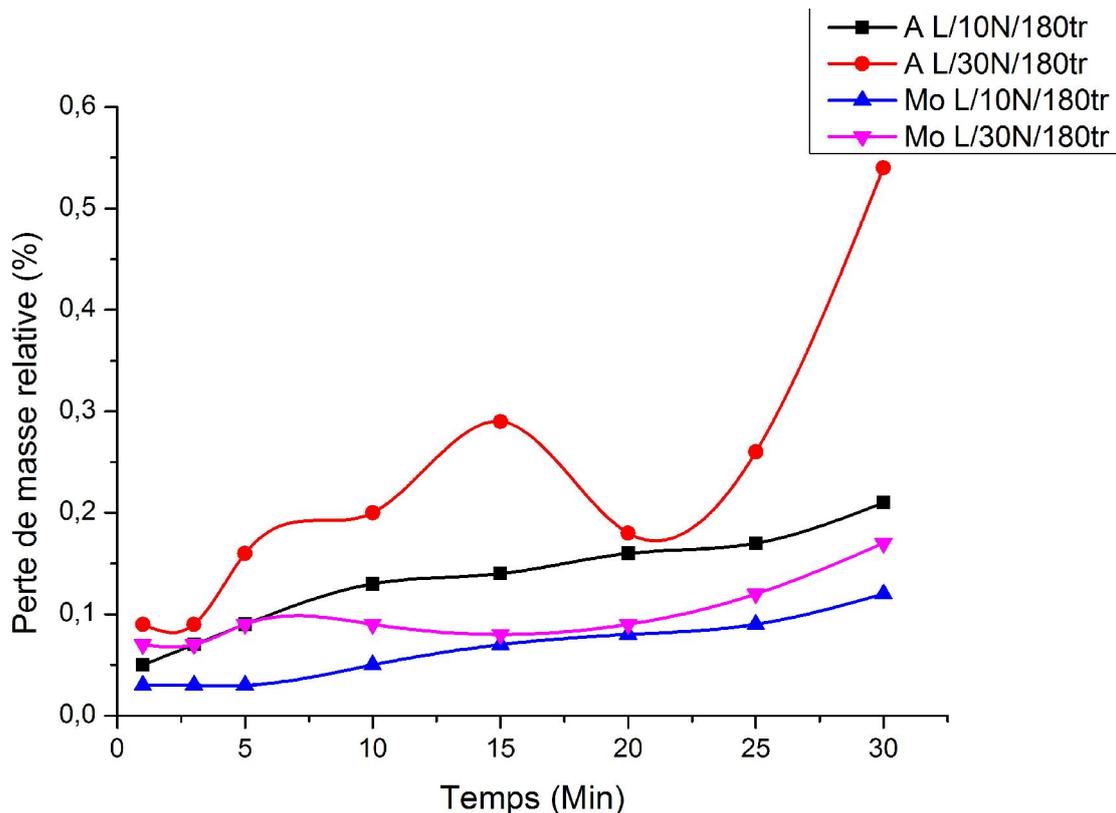


Figure III.18 : Comparaison de la perte de masse relative en fonction du temps 180tr régime Lubrifié.

La perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 1m/s dans un régime lubrifié, on déduit de la figure :

Le premier facteur influençant la perte de masse relative est la charge appliquée plus la vitesse de glissement, le second facteur est le matériau de l'échantillon.

L'échantillon (A L/30N) a subi une perte de masse considérable ce qui s'explique par la charge appliquée. Les trois autres échantillons ont subi de faibles pertes de masse relative que le premier et ceci est dû à l'effet de la lubrification.

Résultats et discussions

Les trois échantillons sont classés dans un ordre décroissant comme suit :

2eme (A L/10N)-3eme (Mo L/30N)-4eme (Mo L/10N).

Les trois dernier échantillon on subit pratiquement les mêmes pertes de masse qu'a une vitesse de glissement de 0.5m/s, excepte le premier qui a apparemment subi plus de perte de masse causé par la vitesse de glissement de 1m/s et bien sûr de la charge appliquée.

III.2.5 : Perte de masse relative en fonction de la charge appliquée à des vitesses de glissement de 0.5m/s et 1m/s pour échantillons en acier régime sec ou lubrifié :

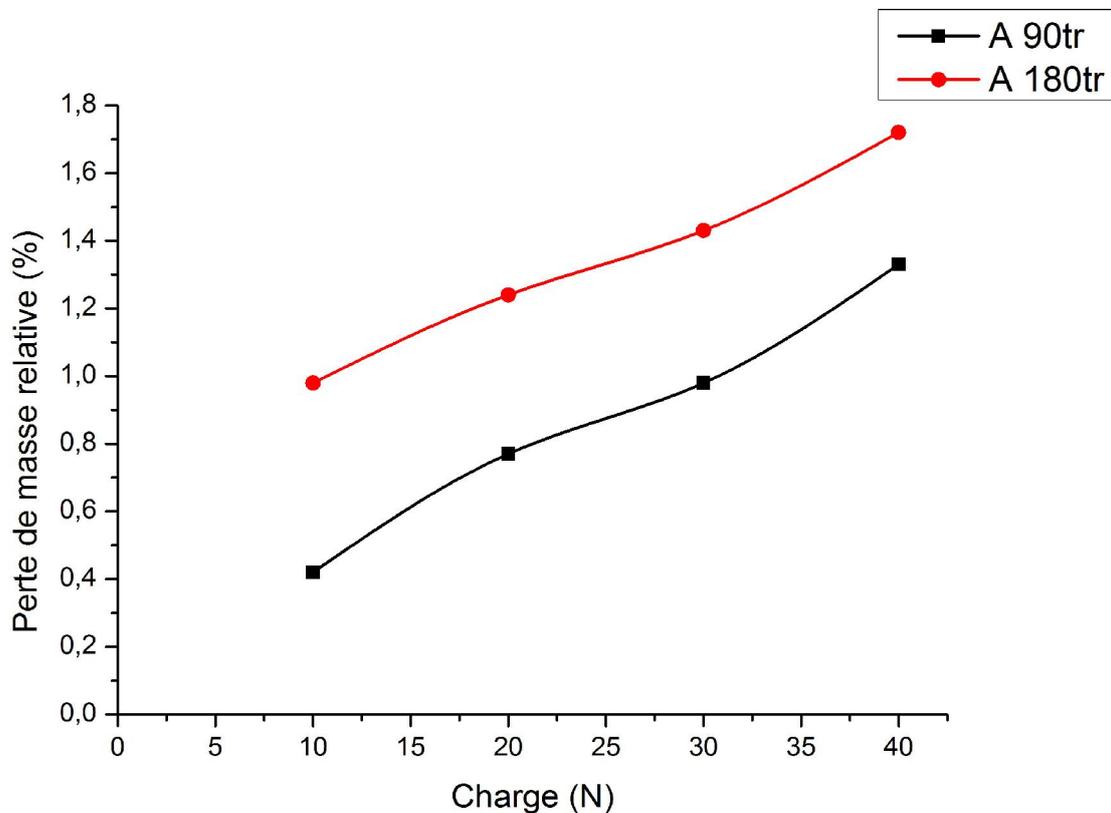


Figure III.19 : Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée régime sec pendant 1h.

L'évaluation de la perte de masse en fonction de la charge appliquée dans un régime sec dépend de la vitesse de glissement et de la charge appliquée elle-même ce qui explique l'augmentation significative à la charge.

Résultats et discussions

Graphe (A 90tr) : la perte de masse relative augmente de 0.0488% a(10N) jusqu'à 0.1549% a (40N).

Graphe (A 180tr) : la perte de masse relative augmente de 0.1133% a(10N) jusqu'à 0.1998% a(40N).

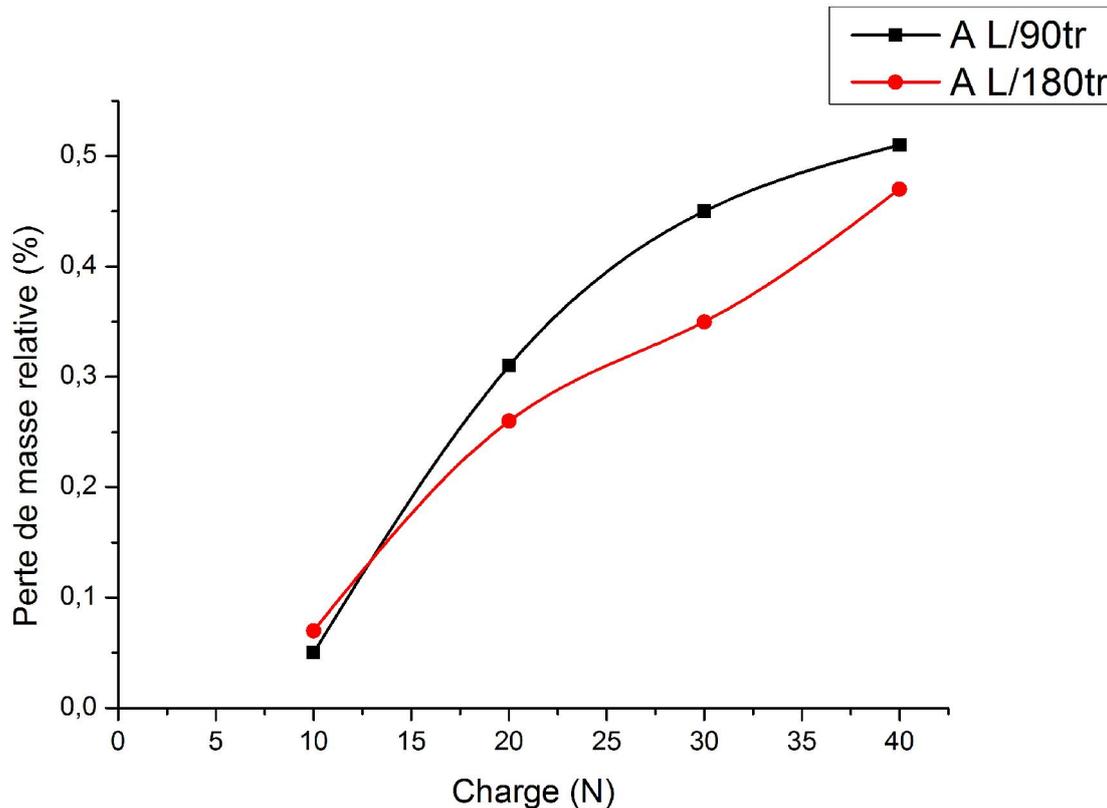


Figure III.20 : Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée régime lubrifié pendant 1h.

L'évaluation de la perte de masse en fonction de la charge appliquée dans un régime lubrifié dépend de la charge appliquée elle-même ce qui explique son augmentation.

Graphe (A L/90tr) : la perte de masse relative augmente de 0.0095% a(10N) jusqu'à 0.0573% a(40N).

Graphe (A L/180tr) : la perte de masse relative augmente de 0.0052% a(10N) jusqu'à 0.0539% a (40N).

Résultats et discussions

III.2.6 : Perte de masse relative en fonction de la charge appliquée à des vitesses de glissement de 0.5m/s et 1m/s pour échantillons en molybdène régime sec ou lubrifié :

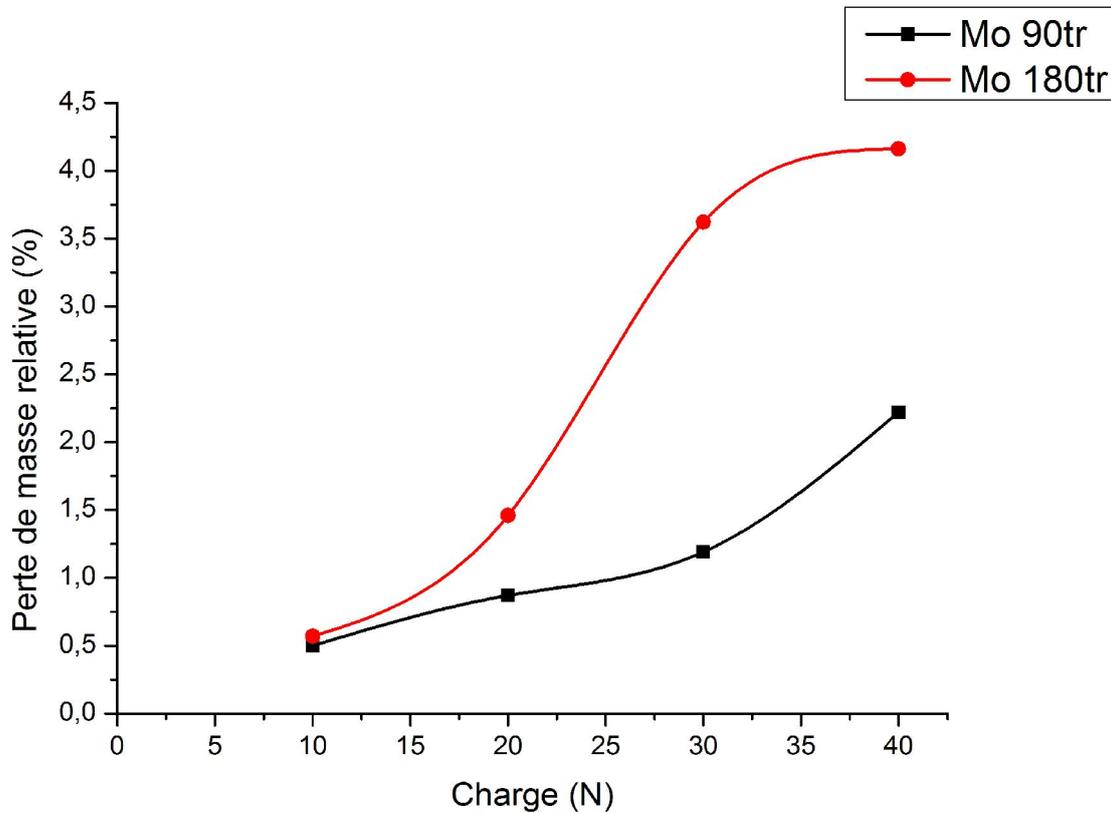


Figure III.21 : Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée régime sec.

L'évaluation de la perte de masse en fonction de la charge appliquée dans un régime sec dépend de la vitesse de glissement et de la charge appliquée on elle-même ce qui explique sa forte augmentation.

Graphes (Mo 90tr) : la perte de masse relative augmente de 0.0497% à 10N jusqu'à 0.2212% à (40N).

Résultats et discussions

Graphe (Mo 180tr) : la perte de masse relative augmente de 0.0569 % à (10N) jusqu'à 0.1459% a(20N) suivi d'une augmentation considérable de 0.4179% a (40N).

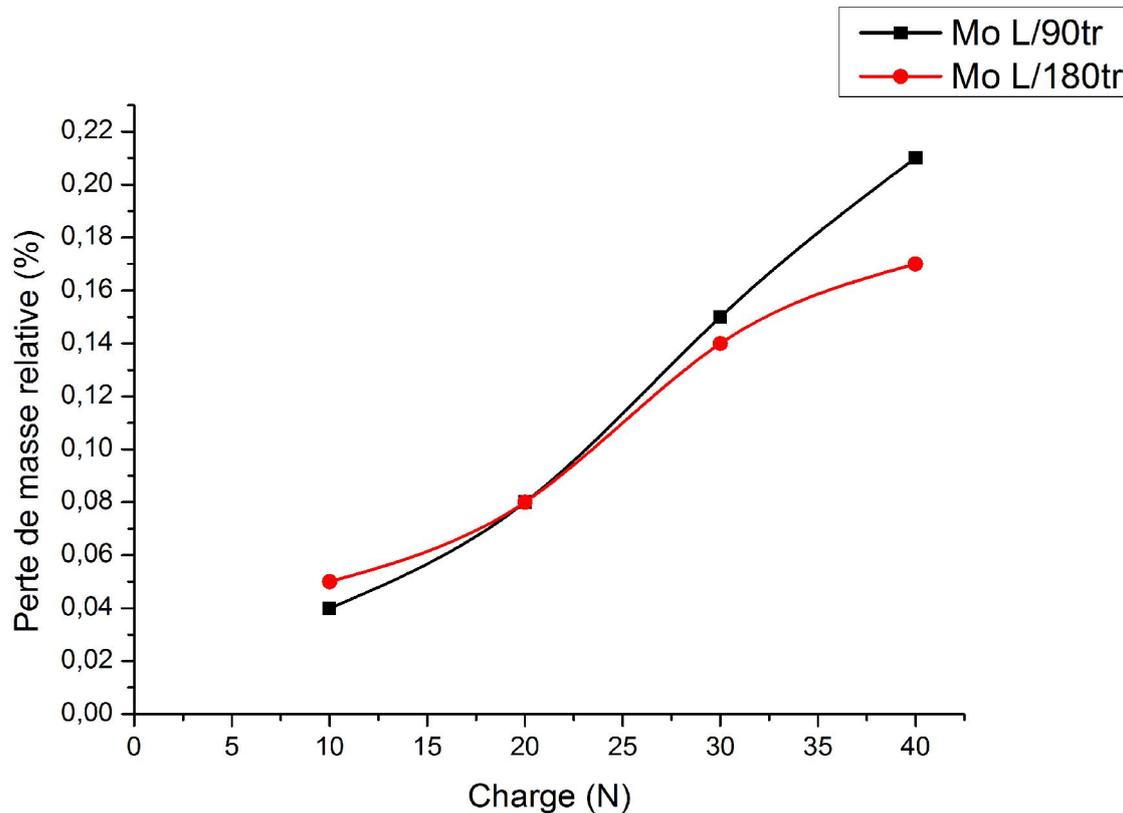


Figure III.22 : Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée régime lubrifié.

L'évaluation de la perte de masse en fonction de la charge appliquée dans un régime lubrifié dépend de la charge appliqué on elle-même ce qui explique son augmentation.

Graphe (Mo L/90tr) : la perte de masse relative augmente faiblement de 0.0038% a (10N) jusqu'à 0.0202% a (40N).

Graphe (Mo L/180tr) : la perte de masse relative augmente très faiblement de 0.0048% a (10N) jusqu'à 0.0164% a (40N).

Résultats et discussions

III.2.7 : Perte de masse relative en fonction de la charge appliquée à des vitesses de glissement de 0.5m/s et 1m/s pour échantillons en acier et molybdène régime lubrifié :

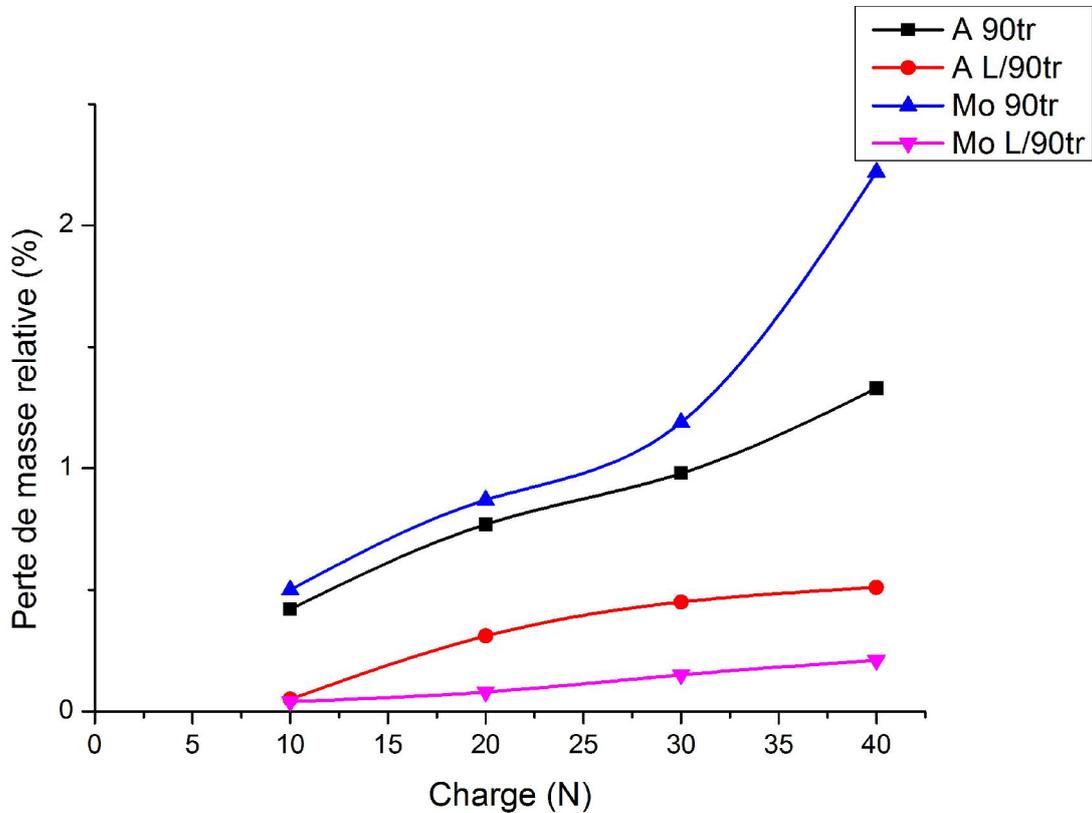


Figure III.23 : Comparaison de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée à une vitesse de glissement de 0.5m/s.

La perte de masse relative en fonction de la charge appliquée à une vitesse de glissement de 0.5m/s dépend de la charge appliquée et du régime

L'échantillon (Mo 90tr) a subi une forte augmentation de la perte de masse causée par sa mauvaise résistance à l'usure dans un régime sec, ensuite vient l'échantillon (A 90tr) avec une perte de masse moins importante que le premier, ensuite vient respectivement l'échantillon (A L/90tr) puis l'échantillon (Mo L/90tr) avec une perte de masse qui se maintient à un taux bas ce qui s'explique par l'ajout de la lubrification.

Résultats et discussions

On remarque que les échantillons soumis au test d'usure dans un régime lubrifié sont les mieux résistants à l'usure.

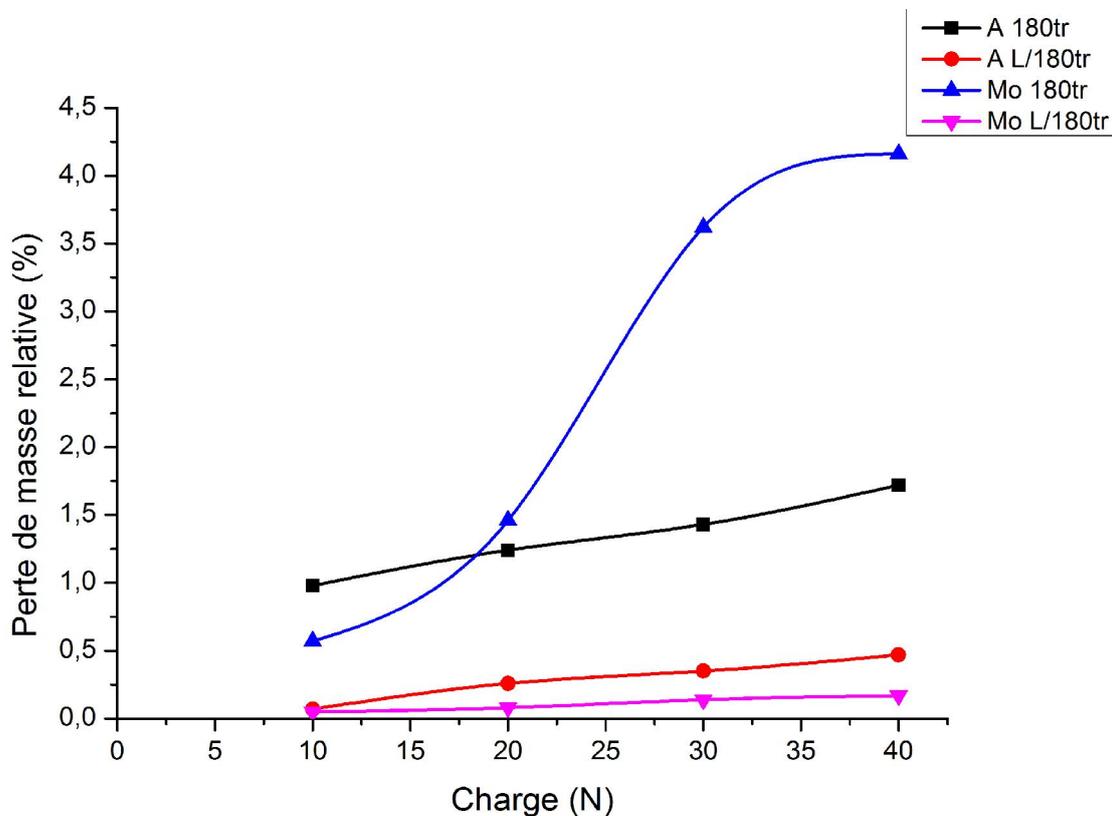


Figure III.24 : Comparaison de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée à une vitesse de glissement de 1m/s.

La perte de masse relative en fonction de la charge appliquée à une vitesse de glissement de 1m/s dépend de la charge appliquée et du régime

L'échantillon (Mo 180tr) a subi une très forte augmentation de la perte de masse causée par le régime sec à partir de 20N, suivi de l'échantillon (A 180tr) avec une perte de masse moins importante que le premier, ensuite vient respectivement l'échantillon (A L/180tr) puis l'échantillon (Mo L/180tr) avec une perte de masse faible.

On constate que le régime sec a fortement influencé l'échantillon (Mo 180tr) ajouté à cela une vitesse de glissement de 1m/s c'est ce qui ci traduit par une forte perte de masse.

***CONCLUSION
GÉNÉRALE***

Conclusion générale

Conclusion générale

Par notre démarche adoptée dans la réalisation de ce travail, on a exposé l'importance primordiale de la projection thermique, dans la réalisation des revêtements, pour la récupération et la rénovation des pièces usées. L'avantage de ce procédé est sa résolution aux problèmes inséparables aux matériaux si les paramètres de projection sont bien maîtrisés, ainsi que le choix des matériaux, qui doit être adopté au milieu d'usage. Cette étude a montré que le revêtement par projection thermique est une bonne solution dans la résistance des surfaces à l'usure.

L'objectif de notre travail était de mettre en évidence, l'influence de la lubrification sur les échantillons avec ou sans dépôt, les revêtements sont réalisés par le procédé arc électrique entre deux fils sur un acier de construction mécanique, afin d'évaluer la résistance à l'usure et de déterminer les quantités des pertes de masse ainsi que les différentes observations métallographiques d'usures réalisées par le microscope optique (M.O).

Les résultats obtenues ont montré que :

- le frottement sec des échantillons avec ou sans dépôt, dans un régime sans lubrification provoque l'apparition d'usure abrasive, qui conduit à de grandes pertes de masse sous forme de rayure, sillons et détachement de matière.
- Le frottement onctueux des échantillons dans un régime lubrifié, provoque une usure érosive et fatigue, mais avec une très bonne résistance à l'usure, appuyée par les faibles quantités de perte de masse, formation de porosité et de cavités et présences de rayures.

Les essais tribologiques ont montré que :

La lubrification influence positivement la résistance à l'usure, tandis que la charge appliquée est le premier facteur influençant la perte de masse, suivi de la vitesse de glissement.

Conclusion générale

- Les échantillons avec dépôt de molybdène présentent une meilleure résistance à l'usure, que les échantillons d'acier sans revêtements dans un régime lubrifiant à différentes charges appliquée, et à des vitesses de glissement de 0.5m/s et 1m/s.
- Dans le régime sec les échantillons avec dépôt de molybdène, ont perdu leur capacité de bonne résistance à l'usure qui s'est traduite à de grande perte de masse à différentes charges appliquées et à des vitesses de glissement de 0.5m/s et 1m/s.

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

- La réalisation de traitement thermique pour les différents échantillons afin d'optimiser les performances des revêtements.
- La réalisation de test de micro dureté des dépôts.
- L'étude des mécanismes d'usure par l'observation microstructurale des faciès d'usure avec un microscope électronique à balayage (M.E.B).
- L'étude du coefficient de frottement.

RÉFÉRENCE
BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] SOKOLOV.D.E, *Contribution au développement de la projection thermique à très faible pression*, Thèse, Université de Franche-Comté, Belfort, 2009.
- [2] A. PRONER, *Revêtements par Projection Thermique*, (éd.) Techniques de l'Ingénieur, M 1645,1999
- [3] Langmuir I. "The vapor pressure of metallic tungsten.",*Physical review*, vol. 2, No 5, 1913, pp329-342
- [4] Wear Management, *Projection thermique*, Switzerland, 7 Septembre 2015.
- [5] SPCTS, *Procédés de projection thermique au chalumeau à flamme oxyacétylénique*, Limoges.
- [6] Lech Pawlowski, *Dépôts Physiques: Techniques, microstructures et propriétés*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 2003.
- [7] TCPP, *Projection flamme fil*, France.
- [8] Lech Pawlowski, *Dépôts Physiques: Techniques, microstructures et propriétés*, PressesPolytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 2003.
- [9] *Advanced Coating*, *Projection thermique*, Belgique.
- [10] Lech Pawlowski, *Dépôts Physiques: Techniques, microstructures et propriétés*, PressesPolytechniqueset Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 2003.
- [11] A. Karimi and C. Verdon, Hydroabrasive Wear Behaviour of High VelocityOxyfuel Thermally Sprayed WC-M Coatings, *Surf. Coat. Technol.*, Vol 62,1993,p 493–498
- [12] L. Jacobs, M.M. Hyland, and M.D. Bonte, Comparative Study of WC-CermetCoatings Sprayed Via the HVOF and HVOF Processes. *J. Thermal SprayTechnol.*, Vol 7 (No. 2), 1998, p 213–218
- [13] Estimating the behavior of particales sprayed by single-cathode plasma torch based on a nonlinear autoregressive exogenous model Liu, T;deng,S,;planche,M-P;montavon G. *Surface and coatings Technology*, 2015,Vol.268,pp284-292
- [14] Liu,T;Deng,S;Planche,M-P;Montavon,G.*surface and coatings Technology*,2015,Vol.268,pp 284-29
- [15] Verdy C., "Structures multicouches mises en forme par projection thermique: élaboration, caractérisation et applications", Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Sévenans, 1998.
- [16] Moreau C., Cielo P., Lamontagne M., "Flattening and solidification of thermally sprayed particles", *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 1, No. 4, 1992, pp. 317-323.
- [17] . Kudinov V., Pekshev P., Belaschenko B., Solonenko O., Safiulin V., "Obtention des revêtements par plasma", en russe, Moscou, "Nauka", 1990, p 401

- [18] A.A. Opalowski, V.E. Fedorov *Izv. Akad.Nauk.SSSR Neorg.Mater.*, 2–3 (1966), p. 443
- [19] T. Ya. Velikanova, B. V. Khaenko, V. Z. Kublii, and S. I. Makhovitskaya, in: “*Transformations in the Carbide W₂C at Low Temperatures*,” Inst. Probl. Materials Sci., National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev (1991), pp. 127–132.
- [20] T. Ya. Velikanova, V. Z. Kublii, and B. V. Khaenko, “Transformations in the solid state and phase equilibria in the molybdenum — carbon system,” *Poroshk. Metall.*, No. 11, 61–67 (1988)
- [21] Christian.C, *La lubrification*, TPM Attitude, 01 Aout 2011.
- [22] Power Tribology, Laboratory international research and developement in molecular tribology, Belgique, 2012.
- [23] Paul.E.V, Les principaux dispositifs de lubrification à l’huile, Doc, OBERNAI 067210.
- [24] Nader.B, Lubrification et graissage, ISET.
- [25] Y. BERTHIER, Experimental evidence for friction and wear modelling, *Wear*139, p. 77-92,1990
- [26] S. DESCARTES, Y. BERTHIER, Rheology and flows of solid third bodies:background and application to a MoS 1.6 coating,*Wear* 252, p. 546-556, 2002
- [27] M. DELQUÉ, Influence de la microstructure sur le comportement tribologique de dépôts composites projetés plasma,Ecole des Mines de Paris, 2007
- [28] J. HANS MATHIEU, E. BERGMANN, R. GRAS, *Traité des Matériaux:Analyse et technologie des surfaces, couches minces et tribologie*, presses polytechnique et universitaires Romandes.Vol 4,2003, p. 357-360
- [29] M.CARTIER, P.KAPSA, *Usure des contacts mécaniques*, Techniques de l’Ingénieur,BM5065 à BM5061(2001).
- [30] M. DELQUÉ, Influence de la microstructure sur le comportement tribologique de dépôts composites projetés plasma,Ecole des Mines de Paris, 2007
- [31] RABINOWICZ.E, *friction and wear of materials*, John Wiley and sons Inc.,)New York - London– Sydney (1965)
- [32] R. NOUAILLETAS, *Modélisation hybride, identification, commande et estimation d’états de système soumis à des frottements secs– Application à un embrayage robotisé*, thèse de doctorat, Grenoble INP, 2009
- [33] ASTM: Norme G40-90A(1990)
- [34] H. B. ABDELOUNIS, *dynamique et vibro acoustique du contact rugueux: expérimentation et modélisation*, thèse de doctorat, École Centrale de Lyon,2010
- [35] F. P. BOWDEN, D. TABOR, *The Friction and Lubrication of Solids I*, Clarendon Press,Oxford 1950

ANNEXE

Annexes

I. Acier régime sec

Temps (min)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf(g)	Température (°C)	AM	AM/M0(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
1	8.9345	8.9340	27	0.0005	0.0055	90tr
3	8.9340	8.9334	30	0.0006	0.0067	90tr
5	8.9334	8.9326	32	0.0008	0.0089	90tr
10	8.9326	8.9315	35	0.0011	0.0123	90tr
15	8.9315	8.9302	36	0.0013	0.0145	90tr
20	8.9302	8.9287	38	0.0015	0.0167	90tr
25	8.9287	8.9265	41	0.0022	0.0246	90tr
30	8.9265	8.9241	44	0.0024	0.0268	90tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 0.5m/s pour une charge de 10 N.

Temps (min)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf (g)	Température (°C)	AM	AM/M0(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
1	8.9659	8.9650	32	0.0009	0.0103	180tr
3	8.9650	8.9638	54	0.0012	0.0133	180tr
5	8.9638	8.9621	67	0.0017	0.0196	180tr
10	8.9621	8.9602	80.2	0.0019	0.0212	180tr
15	8.9602	8.9578	81.6	0.0024	0.0267	180tr
20	8.9578	8.9541	82.3	0.0037	0.0413	180tr
25	8.9541	8.9487	83.1	0.0054	0.0603	180tr
30	8.9487	8.9401	85.2	0.0086	0.0961	180tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 1m/s pour une charge de 10N.

Annexes

Temps (min)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf (g)	Température (°C)	AM	AM/M0(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
1	9.0280	9.0273	27	0.0007	0.0077	90tr
3	9.0273	9.0266	31.4	0.0007	0.0077	90tr
5	9.0266	9.0240	42	0.0016	0.0177	90tr
10	9.0240	9.0190	46	0.0050	0.0554	90tr
15	9.0190	9.0140	53.3	0.0050	0.0554	90tr
20	9.0140	9.0015	54.1	0.0125	0.1386	90tr
25	9.0015	8.9865	55.4	0.0150	0.1666	90tr
30	8.9865	8.9637	57.2	0.0228	0.2537	90tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 0.5m/s pour une charge de 30N.

Temps (min)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf (g)	Température (°C)	AM	AM/M0(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
1	8.9400	8.9389	38	0.0011	0.0123	180tr
3	8.9389	8.9352	56	0.0037	0.0413	180tr
5	8.9352	8.9323	69	0.0029	0.0324	180tr
10	8.9323	8.9284	87.2	0.0039	0.0436	180tr
15	8.9284	8.9252	89.7	0.0032	0.0358	180tr
20	8.9252	8.9211	91.4	0.0041	0.0459	180tr
25	8.9211	8.9102	94.2	0.0109	0.1221	180tr
30	8.9102	8.8988	96.7	0.0114	0.1279	180tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 1m/s pour une charge de 30N.

Annexes

Charge (N)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf(g)	Température (°C)	AM	AM/M0(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
10	8.6065	8.6023	33	0.0042	0.0488	90tr
20	8.6023	8.5946	38	0.0077	0.0895	90tr
30	8.5946	8.5848	46	0.0098	0.114	90tr
40	8.5848	8.5715	48	0.0133	0.1549	90tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée à une vitesse de glissement de 0.5m/s pour une durée 1h.

Charge (N)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf(g)	Température (°C)	AM	AM/MO(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
10	8.6438	8.6340	48.5	0.0098	0.1133	180tr
20	8.6340	8.6216	64.6	0.0124	0.1436	180tr
30	8.6216	8.6073	76	0.0143	0.1658	180tr
40	8.6073	8.5901	83.7	0.0172	0.1998	180tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée à une vitesse de glissement de 1m/s pour une durée 1h.

Annexes

II. Molybdène régime sec

Temps (min)	Masse initial M0(g)	Masse final Mf(g)	Température (°C)	AM	AM/M0(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
1	10.2123	10.2070	27	0.0053	0.0518	90tr
3	10.2070	10.1955	28	0.0115	0.1126	90tr
5	10.1955	10.1833	30	0.0122	0.1196	90tr
10	10.1833	10.1641	33	0.0192	0.1885	90tr
15	10.1641	10.1478	36	0.0163	0.1603	90tr
20	10.1478	10.1372	41	0.0108	0.1064	90tr
25	10.1372	10.1280	45	0.0092	0.0907	90tr
30	10.1280	10.1132	50	0.0148	0.1461	90tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 0.5m/s pour une charge de 10N.

Temps (min)	Masse initiale M0(g)	Masse final M0(g)	Température (°C)	AM	AM/M0(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
1	10.2014	10.1991	27	0.0023	0.0225	180tr
3	10.1991	10.1964	30	0.0027	0.0264	180tr
5	10.1964	10.1932	32	0.0032	0.0313	180tr
10	10.1932	10.1892	38	0.0040	0.0392	180tr
15	10.1892	10.1783	44	0.0109	0.1069	180tr
20	10.1783	10.1624	49	0.0159	0.1562	180tr
25	10.1624	10.1411	56	0.0213	0.2096	180tr
30	10.1411	10.1276	62	0.0135	0.1331	180tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 1m/s pour une charge de 10N.

Annexes

Temps (min)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf(g)	Température (°C)	AM	AM/M0(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
1	10.5707	10.5680	30	0.0027	0.0255	90tr
3	10.5680	10.5666	37	0.0014	0.0132	90tr
5	10.5666	10.5637	43	0.0029	0.0274	90tr
10	10.5637	10.5583	49	0.0054	0.0511	90tr
15	10.5583	10.5335	54	0.0248	0.2348	90tr
20	10.5335	10.4902	58	0.0433	0.411	90tr
25	10.4902	10.4446	61	0.0456	0.4346	90tr
30	10.4446	10.3935	63	0.0511	0.4892	90tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 0.5m/s pour une charge de 30N.

Temps (min)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf(g)	Température (°C)	AM	AM/M0(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
1	10.3935	10.3903	29	0.0032	0.0307	180tr
3	10.3903	10.3834	33	0.0069	0.0664	180tr
5	10.3834	10.3712	39	0.0122	0.1174	180tr
10	10.3712	10.3570	46	0.0142	0.1369	180tr
15	10.3570	10.3332	57	0.0238	0.2297	180tr
20	10.3332	10.2894	68	0.0438	0.4238	180tr
25	10.2894	10.2451	81	0.0443	0.4305	180tr
30	10.2451	10.2007	97	0.0444	0.4333	180tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 1m/s pour une charge de 30N.

Annexes

Charge (N)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf(g)	Température (°C)	AM	AM/MO(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
10	10.0600	10.0550	34	0.0050	0.0497	90tr
20	10.0550	10.0463	39.8	0.0087	0.0865	90tr
30	10.0463	10.0344	44	0.0119	0.1184	90tr
40	10.0344	10.0122	49	0.0222	0.2212	90tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée à une vitesse de glissement de 0.5m/s pour une durée 1h.

Charge (N)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf(g)	Température (°C)	AM	AM/MO(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
10	10.0093	10.0036	42	0.0057	0.0569	180tr
20	10.0036	9.9890	53	0.0146	0.1459	180tr
30	9.9890	9.9528	58	0.0362	0.3623	180tr
40	9.9528	9.9112	63.2	0.0416	0.4179	180tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée à une vitesse de 1m/s glissement de pour une durée 1h.

III. Acier régime lubrifié

Temps (min)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf (g)	Température (°C)	AM	AM/M0(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
1	9.4550	9.4548	23	0.0002	0.0021	90tr
3	9.4548	9.4546	23.3	0.0002	0.0021	90tr
5	9.4546	9.4542	24	0.0004	0.0042	90tr
10	9.4542	9.4537	24.6	0.0005	0.0052	90tr
15	9.4537	9.4531	24.6	0.0006	0.0062	90tr
20	9.4531	9.4523	25	0.0008	0.0084	90tr
25	9.4523	9.4511	25.4	0.0012	0.0126	90tr
30	9.4511	9.4494	26	0.0017	0.0179	90tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 0.5m/s pour une charge de 10N.

Temps (min)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf (g)	Température (°C)	AM	AM/M0(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
1	9.4502	9.4497	23	0.0005	0.0052	180tr
3	9.4497	9.4490	23.7	0.0007	0.0074	180tr
5	9.4490	9.4481	24.2	0.0009	0.0095	180tr
10	9.4481	9.4468	24.8	0.0013	0.0137	180tr
15	9.4468	9.4454	25.3	0.0014	0.0148	180tr
20	9.4458	9.4442	25.4	0.0016	0.0169	180tr
25	9.4442	9.4425	25.6	0.0017	0.0180	180tr
30	9.4425	9.4404	26.3	0.0021	0.0222	180tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 1m/s pour une charge de 10N.

Annexes

Temps (min)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf (g)	Température (°C)	AM	AM/M0(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
1	9.4383	9.4374	24	0.0009	0.0095	90tr
3	9.4374	9.4365	24.6	0.0009	0.0095	90tr
5	9.4365	9.4354	25.5	0.0011	0.0116	90tr
10	9.4354	9.4339	26.3	0.0015	0.0158	90tr
15	9.4339	9.4325	26.8	0.0014	0.0148	90tr
20	9.4325	9.4306	27	0.0019	0.0201	90tr
25	9.4306	9.4289	27.2	0.0017	0.0180	90tr
30	9.4289	9.4271	27.5	0.0018	0.0190	90tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 0.5m/s pour une charge de 30N.

Temps (min)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf (g)	Température (°C)	AM	AM/M0(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
1	9.4304	9.4295	24.5	0.0009	0.0095	180tr
3	9.4295	9.4286	24.8	0.0009	0.0095	180tr
5	9.4286	9.4270	25.5	0.0016	0.0169	180tr
10	9.4270	9.4250	26.5	0.0020	0.0212	180tr
15	9.4250	9.4221	27	0.0029	0.0307	180tr
20	9.4221	9.4203	27.4	0.0018	0.0191	180tr
25	9.4203	9.4177	27.6	0.0026	0.0275	180tr
30	9.4177	9.4123	28	0.0054	0.0573	180tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 1m/s pour une charge de 30N.

Annexes

Charge (N)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf(g)	Température (°C)	AM	AM/MO(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
10	9.4578	9.4573	25.5	0.0005	0.0052	90tr
20	9.4573	9.4542	26.2	0.0031	0.0327	90tr
30	9.4542	9.4497	27	0.0045	0.0475	90tr
40	9.4497	9.4446	28.4	0.0051	0.0539	90tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée à une vitesse de glissement de 0.5m/s pour une durée 1h.

Charge (N)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf(g)	Température (°C)	AM	AM/MO(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
10	9.4407	9.4400	26	0.0007	0.0074	180tr
20	9.4400	9.374	27	0.0026	0.0275	180tr
30	9.4373	9.4338	28	0.0035	0.037	180tr
40	9.4338	9.4291	28.5	0.0047	0.0498	180tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée à une vitesse de glissement de 1m/s pour une durée 1h.

IV. Molybdène régime lubrifié

Temps (min)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf (g)	Température (°C)	AM	AM/M0(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
1	10.1560	10.1559	23	0.0001	0.0009	90tr
3	10.1559	10.1558	23.5	0.0001	0.0010	90tr
5	10.1558	10.1556	24.5	0.0002	0.0019	90tr
10	10.1556	10.1554	24.5	0.0002	0.0019	90tr
15	10.1554	10.1550	24	0.0004	0.0039	90tr
20	10.1550	10.1546	23.7	0.0004	0.0039	90tr
25	10.1546	10.1541	24.2	0.0005	0.0049	90tr
30	10.1541	10.1532	25.5	0.0009	0.0088	90tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 0.5m/s pour une charge de 10N.

Temps (min)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf (g)	Température (°C)	AM	AM/M0(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
1	10.1498	10.1495	23.5	0.0003	0.0029	180tr
3	10.1495	10.1492	23.5	0.0003	0.0029	180tr
5	10.1492	10.1489	23.7	0.0003	0.0029	180tr
10	10.1489	10.1484	23.7	0.0005	0.0049	180tr
15	10.1484	10.1477	24.1	0.0007	0.0069	180tr
20	10.1477	10.1469	24.5	0.0008	0.0078	180tr
25	10.1468	10.1459	24.5	0.0009	0.0088	180tr
30	10.1459	10.1447	26	0.0012	0.0118	180tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 1m/s pour une charge de 10N.

Annexes

Temps (min)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf (g)	Température (°C)	AM	AM/M0(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
1	10.3792	10.3787	23	0.0005	0.0048	90tr
3	10.3787	10.3781	24	0.0006	0.0057	90tr
5	10.3781	10.3772	24.7	0.0009	0.0086	90tr
10	10.3772	10.3762	24.8	0.0010	0.0096	90tr
15	10.3762	10.3753	24.8	0.0009	0.0086	90tr
20	10.3753	10.3739	25	0.0014	0.0134	90tr
25	10.3739	10.3721	25.4	0.0018	0.0173	90tr
30	10.3721	10.3699	26	0.0022	0.0212	90tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 0.5m/s pour une charge de 30N.

Temps (min)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf (g)	Température (°C)	AM	AM/M0(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
1	10.3650	10.3643	24	0.0007	0.0067	180tr
3	10.3643	10.3636	24.2	0.0007	0.0067	180tr
5	10.3636	10.3627	24.5	0.0009	0.0086	180tr
10	10.3627	10.3618	24.9	0.0009	0.0086	180tr
15	10.3618	10.3610	25.1	0.0008	0.0077	180tr
20	10.3610	10.3601	25.4	0.0009	0.0086	180tr
25	10.3601	10.3589	25.7	0.0012	0.0115	180tr
30	10.3589	10.3572	26.3	0.0017	0.0164	180tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction du temps à une vitesse de glissement de 1m/s pour une charge de 30N.

Annexes

Charge (N)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf(g)	Température (°C)	AM	AM/MO(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
10	10.3693	10.36889	24.1	0.0004	0.0038	90tr
20	10.3689	10.3681	24.2	0.0008	0.0077	90tr
30	10.3681	10.3666	24.3	0.0015	0.0144	90tr
40	10.3666	10.3645	24.5	0.0021	0.0202	90tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée à une vitesse de glissement de 0.5m/s pour une durée 1h.

Charge (N)	Masse initiale M0(g)	Masse final Mf(g)	Température (°C)	AM	AM/MO(%)	Vitesse de rotation (tr/min)
10	10.3618	10.3613	24.5	0.0005	0.0048	180tr
20	10.3613	10.3605	24.8	0.0008	0.0077	180tr
30	10.3605	10.3591	25	0.0014	0.0135	180tr
40	10.3591	10.374	25.6	0.0017	0.0164	180tr

Evaluation de la perte de masse relative en fonction de la charge appliquée à une vitesse de glissement de 1m/s pour une durée 1h.

résumé

Le procédé de revêtement par projection thermique se distingue par sa capacité à réaliser des revêtements métalliques diversifiés, sur des pièces mécaniques, dans le but de les protéger contre les différents types d'usures et l'optimisation des pertes d'énergies. Pour évaluer leur résistance à l'usure, plusieurs configurations ont été effectuées pendant les tests afin d'analyser leur influence sur les pertes de masse.

Dans ce travail, on a utilisées des substrats d'acier de nuance E24 sans dépôt et avec dépôt, les revêtements issus de fil de molybdène ont été réalisés par projection thermique moyennant le procédé arc électrique entre deux fils. L'évaluation de la perte de masse relative en fonction du temps à (10 et 30N) ou de la charge pendant (01) heure, a été effectuée sur les substrats dans une configuration pion stationnaire/ disque rotatif à deux vitesses de glissement (0,5 et 1m/s) dans deux régimes sec et lubrifié.

On parachève ce travail par l'observation métallographique de surfaces usées à l'aide d'un microscope optique (M.O), les résultats obtenus ont été exprimé par des graphes, révélant que l'optimisation des pertes de masse d'un substrat dépend d'une lubrification optimale combinée à un dépôt obtenu par projection thermique.

abstract

The thermal spray coating process is distinguished by its ability to produce diversified metal coatings on mechanical parts in order to protect them against different types of wear and optimize energy losses. In order to evaluate their resistance to wear, several summer configurations were carried out during the tests in order to analyze their influence on the mass losses.

In this work, substrates of E24 grade steel were used without deposit and with deposition, the coatings resulting from molybdenum wire were produced by thermal spraying by means of the arc-electric process between two wires. The evaluation of the relative mass loss as a function of time at (10 and 30N) or of the load during (01) hours, was performed on the substrates in a stationary / rotating disk configuration at two sliding speeds , (0.5 and 1m / s) in two dry and lubricated regimes.

This work is completed by the metallographic observation of worn surfaces using an optical microscope, the results obtained have been expressed by graphs, revealing that the optimization of the mass losses of a substrate An optimum lubrication combined with a deposit obtained by thermal spraying.

ملخص

تتميز عملية الطلاء بالرش الحراري بقدرتها على إنتاج الطلاء المعدني المتنوع على الأجزاء الميكانيكية من أجل حمايتها من أنواع مختلفة من التآكل وتحسين فاقد الطاقة. من أجل تقييم مقاومتهم للارتداء، تم إجراء العديد من التشكيلات الصيفية خلال الاختبارات من أجل تحليل تأثيرها على الخسائر الجماعية.

في هذا العمل، تم استخدام ركائز من الصلب E24 الصف دون إيداع ومع ترسب، والطلاء الناتجة عن سلك الموليبدنيوم التي تنتجها الرش الحراري عن طريق عملية القوس الكهربائي بين سلكين. تم إجراء تقييم خسارة الكتلة النسبية كدالة للوقت عند (10 و30ن) أو من الحمل خلال (01) ساعة على ركائز في تكوين قرص ثابت / دوران بسرعتين انزلاقتين (0.5 و 1 م / ث) في نظامين جاف ومزلق.

تم الانتهاء من هذا العمل من خلال مراقبة المعادن من الأسطح البالية باستخدام المجهر الضوئي ، وقد تم التعبير عن النتائج التي تم الحصول عليها من خلال الرسوم البيانية، وكشف عن أن الاستفادة المثلى من الخسائر الجماعية من الركيزة التشحيم الأمثل جنباً إلى جنب مع إيداع الحصول عليها عن طريق الرش الحراري