

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : CONSTRUCTION MECANIQUE

Présenté par :

MAHDI Abbes

Etude de la vitesse de glissement sur le frottement et l'usure des matériaux métalliques

Devant le jury composé de :

SLAMANI Mohamed

Professeur

Président

ELHADI Abdelmalek

MCB

Encadreur

ROKBI Mansor

MCA

Examineur

Année Universitaire : 2020/ 2021

N° d'ordre : GM/...../2021

Résumé

Le mémoire réalisé s'agit d'étudier l'influence de la vitesse linéaire de glissement sur le comportement tribologique, particulièrement, le frottement et l'usure des couples de matériaux métalliques. Les résultats obtenus sont un recueil des essais effectués par des travaux de plusieurs chercheurs à l'aide des tribomètres de type pion-disque.

Le paramètre de la vitesse de glissement joue un rôle primordial, d'où les résultats obtenus ont montré une certaine diversité de comportement tribologique d'un couple à un autre.

الملخص:

المذكرة التي تم إنجازها هي دراسة تأثير سرعة الانزلاق الخطية على السلوك التريبولوجي ، على وجه الخصوص ، الاحتكاك وتآكل أزواج المواد المعدنية. النتائج التي تم الحصول عليها هي عبارة عن مجموعة من الاختبارات التي قام بها العديد من الباحثين باستخدام التريبومتر قرص ساق.

يلعب عامل سرعة الانزلاق دورًا أساسيًا ، حيث أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها تنوعًا معينًا في السلوك التريبولوجي من زوج إلى آخر.

Dédicaces

À tous mes amis et collègues

Et particulièrement les plus intimes, en témoignage des moments inoubliables, des sentiments pures, et des liens solides qui nous unissent.

À toutes les personnes qui me reconnaissent et qui m'ont aidé et contribué à la réalisation de ce travail.

Remerciements

Toute ma gratitude, grâce et remerciement vont à dieu le tout puissant qui m'a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

*Mes vifs remerciements à mon promoteur Monsieur « **ELHADI Abdelmalek** » pour sa disponibilité le long de mon travail, toutes mes reconnaissances de la bienveillance dont il a fait preuve à mon égard, de ses encouragements incessants et de la confiance dont il m'a témoigné.*

Mes remerciements vont également à mes enseignants qui ont contribué à notre formation pendant tout le cursus universitaire.

Sommaire

<i>Résumé</i>	1
<i>Remerciements</i>	2
<i>Sommaire</i>	3
<i>Liste des figures</i>	6
<i>Liste des tableaux</i>	8
<i>Introduction générale</i>	9
CHAPITRE 1 : FROTTEMENT DES CORPS SOLIDES	
I. Introduction.....	11
I.1. Genre de contact des corps.....	11
I.2.1. Contact statique.....	11
I.2.2. Contact dynamique.....	12
I.2.3. Contact sur une aspérité.....	13
I.2.4 Déformation élastique de la surface de contact.....	14
I.2.5 Déformation plastique.....	15
I.2.6. Définition du frottement.....	16
I.3. Mécanismes de frottement.....	16
I.4. Force et coefficients de frottement.....	17
I.5. Type de frottement.....	18
I.6. Frottement de glissement.....	18
I.7. Adhérence.....	20
I.8. Labourage.....	21

Sommaire

I.8.1 Valeurs pratiques du coefficient de frottement.....	23
I.9. La quantité de chaleur.....	24
I.9.1 L'énergie de frottement cumulée.....	25
I.9.2 La puissance moyenne de frottement.....	25
I.10. Matériaux utilisables pour le frottement	25

CHAPITRE II : USURE DES COUPLES DE MATERIAUX METALLIQUES

II.1. Introduction.....	27
II.2. Définition de l'usure.....	27
II.3. Facteurs d'usure	28
II.3.1. Mode de contact.....	28
II.3. 2. Etat de surface.....	29
II.3.3 Charge	29
II.3.4 vitesse.....	29
II.3.5 Environnement.....	29
II.3.6. Nature des matériaux.....	29
II.4. Type de l'usure	30
II.4.1. Usure adhésive	30
II. 4.1.1. Modélisation de l'usure adhésive.....	31
II.4.2 Modèle d'Archard.....	31
II.4.3 Usure par abrasion.....	33
II.4.4 Aspects tribologiques de l'usure abrasive	35

Sommaire

II.4.5 Quantification de l'usure abrasive.....	38
--	----

CH APITRE III : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

III.1. Introduction.....	40
--------------------------	----

III.2. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement.....	40
--	----

III.3. Effet de la vitesse de glissement sur l'usure.....	43
---	----

III.3.1. Variation de l'usure en fonction de la vitesse de glissement.....	44
--	----

III.3.2. Cartes de contour des résultats d'usure	45
--	----

III.3.3 Variation de μ en fonction de la vitesse de glissement	57
--	----

<i>CONCLUSION</i>	61
--------------------------------	----

<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	62
---	----

Liste des figures

Figure I.1 : Contact statique de deux corps.....	11
Figure I.2 : Contact dynamique de deux corps.....	12
Figure I.3 : Différentes situations des aspérités :(a) sphère ;(b) cylindres parallèles (c) cylindres croisés	13
Figure I.4 : Contact sur une aspérité	14
Figure I. 5: Déformation élastique de la surface de contact.....	15
Figure I.6: Enchâssement des aspérités et déformations.....	15
Figure I. 7: Endommagement d'un corps frottant.....	17
Figure I. 8 : Aires de contact réelle et apparente.....	19
Figure I.9: Sillon de labourage etbourelet frontal.....	22
Figure I.10: Labourage	22
Figure II.11 : Contact de deux corps solides.....	30
Figure II.12: Transfert métallique adhésif.....	31
Figure II.13: Schémas des mécanismes d'usure abrasive : a : découpe, b : fracture, c : fatigue, d : arrachage.....	34
Figure II.14: Usure abrasive à deux corps.....	36
Figure II.15 : Usure abrasive à trois corps.....	36
Figure II.16: Effet d'une aspérité ; (a) outil de coupe ; (b) sillon d'abrasion.....	37
Figure II.17 : Mécanisme de l'abrasion par; (a) coupe ;(b) déformation plastique ...	38

Sommaire

Figure III.18 : Tribomètre.....	42
Figure III.19 : Evolution du coefficient de frottement en fonction des matériaux frottants contre le disque et de la vitesse de glissement.....	43
Figure III.20 : Evolution du taux d'usure en fonction de la vitesse de glissement des trois couples pour P = 20 N.....	44
Figure III.21 : Variation du taux d'usure en fonction de la vitesse de glissement.....	45
Figure III.22 : Cartes de contour des résultats d'usure.....	47
Figure III.23 : Analyse des pions de frottement : influence de la vitesse de glissement sur les phénomènes d'adhésion (pions non revêtus).....	48
Figure III.24 : Influence de la vitesse de glissement sur le coefficient de frottement dans le cas des pions revêtus TiN.....	49
Figure III.25 : Influence du revêtement sur le coefficient de frottement.....	50
Figure III.26 : Influence de la vitesse de glissement sur μ	52
Figure III.27: Influence de la vitesse de glissement sur le coefficient de frottement matériau de friction organique.....	54
Figure III.28 : Influence de la vitesse de glissement sur le taux d'usure matériau de friction organique.....	54
Figure III.29: Influence de la vitesse de glissement sur le coefficient de frottement (matériau de friction semi métallique).....	56
Figure III.30: Influence de la vitesse de glissement sur le taux d'usure (matériau de friction semi métallique).....	56
Figure III.31: Evolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement (N =5N).	58
Figure III.32: Variation de l'usure en fonction de la vitesse linéaire de glissement...	59
Figure III.33: Aspect microscopique de la surface usée du pion en acier XC48,	

Sommaire

(x100), $V=0,32$ [m/s].....	60
-----------------------------	----

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Valeurs des coefficients de frottement de glissement.....	23
Tableau III.2 : Caractéristiques des matériaux.....	41

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La majorité des aspects de notre vie est affectée par le phénomène de frottement, que ce soit de manières positive ou négative. C'est le cas pour des opérations comme démarrer, arrêter, faire tourner une roue de voiture, fixer des pièces, tenir un objet dans la main...etc. Avec le frottement, il existe l'usure, qui est un vaste domaine couvert par la tribologie.

La présence de frottement et de l'usure est inévitable pour les surfaces des corps qui sont en contact dynamique.

La présence d'usure dans les corps peut être l'origine d'une réduction de l'efficacité du système mécanique voire être responsable de l'invalidité de ce système.

Il faut noter que 11% de la consommation énergétique totale des Etats-Unis est perdue à cause du frottement. Stefan Korcek (Ford) et Masami nakada (Toyota) estiment que choisir des technologies adaptées implique nécessairement la tribologie. On est toujours intéressé à réduire, voire supprimer l'usure afin de prolonger la durée de fonctionnement et la fiabilité des machines et des mécanismes.

Les conséquences du frottement et l'usure sont liés aux plusieurs facteurs, tels que la nature des matériaux en contact dynamique, la charge appliquée, la vitesse de glissement et la dureté des surfaces de couples des matériaux antagonistes. On est toujours intéressé à réduire, voire supprimer l'usure afin de prolonger la durée de fonctionnement et la fiabilité des machines et des mécanismes.

Ce n'est, toutefois, que depuis peu de temps que des études spécifiques et

INTRODUCTION GENERALE

approfondies sur le frottement et l'usure sont entreprises.

Notre but dans ce travail, est l'étude de l'influence de la vitesse linéaire de glissement sur le comportement en frottement et en usure par glissement sec des couples de matériaux.

Dans ce cadre, le mémoire est composé de trois chapitres.

Le premier chapitre s'agit d'une recherche bibliographique sur le phénomène et les types de frottement.

Le deuxième chapitre est consacré à une étude théorique sur l'usure des couples de matériaux métalliques, ses facteurs et ses types.

Le dernier chapitre, est un recueil des résultats obtenus par des essais tribologiques sur des tribomètres de type pion-disque, effectués par plusieurs chercheurs ou le facteur vitesse de glissement joue le rôle primordial dans le comportement tribologique des couples de matériaux.

Le manuscrit se termine par une conclusion générale.

CHAPITRE I**FROTTEMENT DES CORPS SOLIDES****I.1. Introduction**

Le frottement désigne un ensemble de phénomènes et de mécanismes qui intervient au niveau de l'interface de deux corps en contact. Le contact unilatéral avec frottement est un des problèmes les plus compliqués de la mécanique des solides, car de nombreuses difficultés découlent de la nature souvent très complexe des surfaces réelles mais aussi du régime sévère de déformation qui se produit même, à de faibles niveaux de chargement. En outre, des phénomènes thermiques et physico-chimiques tels que des fusions ou des oxydations se développent durant le contact dynamique.

I.2. Genre de contact des corps

On peut distinguer deux genres de contact au point de vue de frottement

I.2.1. Contact statique

Les deux corps sont en contact et ne se déplacent pas entre eux, autrement dit, ils se touchent seulement (figure I.1).

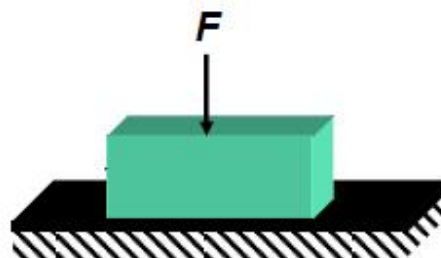


Figure I.1 : Contact statique de deux corps.

I.2.2. Contact dynamique

Les deux corps sont en contact se déplacent l'un par rapport à l'autre par la force P , donc les deux surfaces antagonistes se frottent entre elles (figure I.2).

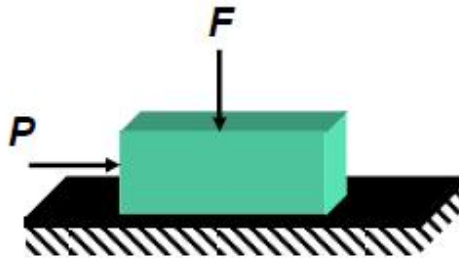


Figure I.2 : Contact dynamique de deux corps.

Les surfaces en contact se touchent par le sommet de leurs aspérités.

Si les aspérités sont représentées idéalement par des sphères ou des cylindres, on aura alors les situations possibles schématisées dans la figure I.3.

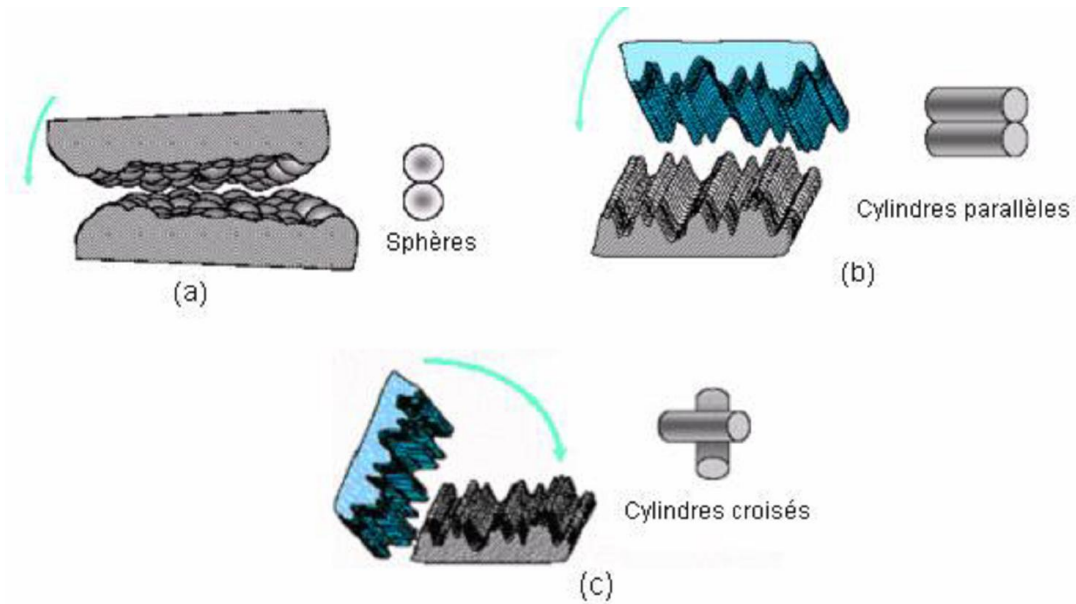


Figure I.3 : Différentes situations des aspérités :(a) sphère ;(b) cylindres parallèles (c) cylindres croises [1].

I.2.3. Contact sur une aspérité

Quand deux solides sont en contact, ils se touchent par le sommet de leurs aspérités.

Ils feront d’abord contact par une aspérité. Au début du contact, $N=0$ et les deux aspérités vont tout simplement s’effleurer et se touchent par un point ou une ligne (figure I.4).

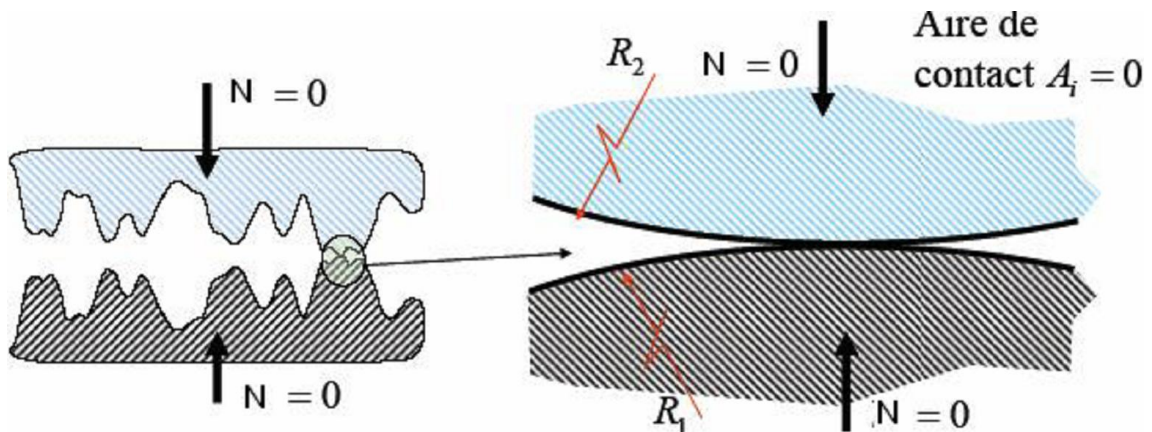


Figure I.4 : Contact sur une aspérité [1].

I.2.4. Déformation élastique de la surface de contact

La déformation élastique repose sur les hypothèses suivantes :

- Les solides sont soumis à de petites déformations sans dépasser leur limite.
- Les surfaces sont continues et non conformables.
- La déformation élastique est calculée en admettant que chaque corps en contact est un demi-espace élastique.
- Les surfaces sont sans frottement, les composantes de la force tangentielle dans le plan du contact sont nulles.

Les dimensions de l'aire de contact, par exemple le rayon a , sont petites par rapport au rayon de courbure des surfaces ($a \ll R$) (figure I.5).

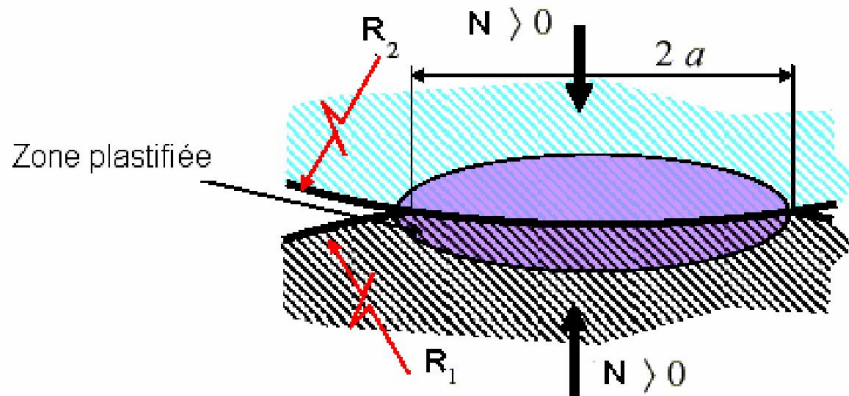


Figure I.5 : Déformation élastique de la surface de contact [2].

I.2.5. Déformation plastique :

Enchâssement des aspérités et déformations postérieures de celles-ci dans le mouvement relatif (figure I.6).

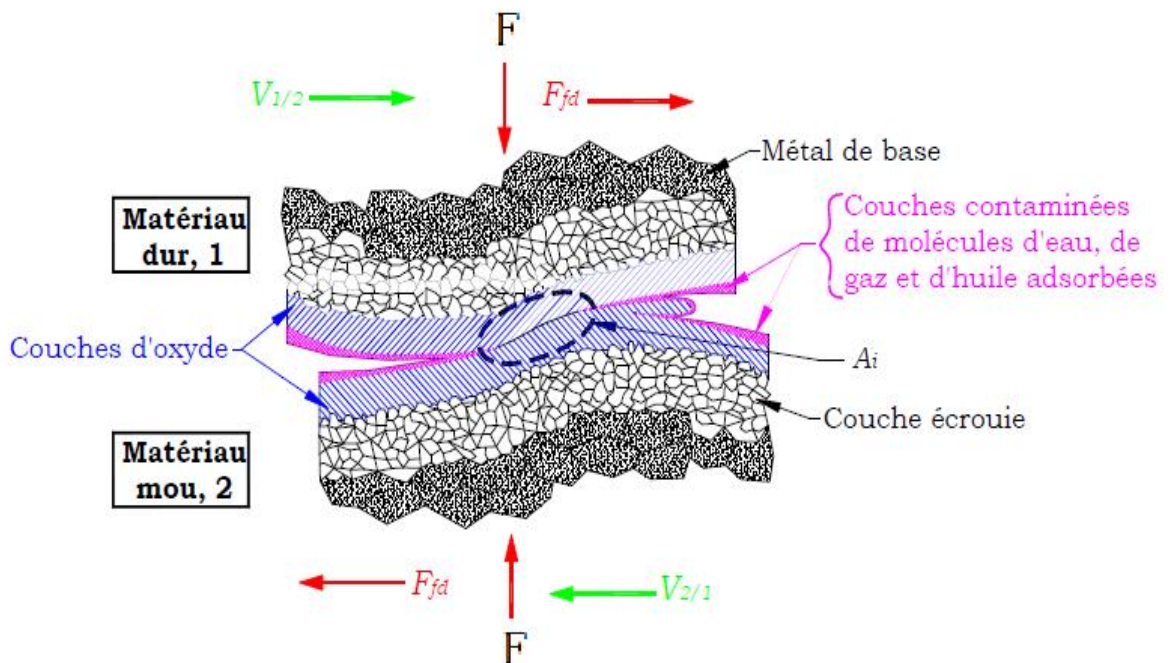


Figure I.6 : Enchâssement des aspérités et déformations.

I.2.6. Définition du Frottement

Le frottement est défini comme la résistance au mouvement 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 [3]

I.3. Mécanismes de Frottement

Sous l'effet des sollicitations tribologiques, une surface subit des modifications et endommagements dont les principales formes sont schématisées figure I.7. Les endommagements peuvent être décrits simplement en faisant appel à un nombre réduit de phénomènes élémentaires mécaniques, physiques ou chimiques.

Lorsque deux surfaces sont absolument pures elles adhèrent l'une contre l'autre dans le vide; il faut une certaine force de traction pour les séparer.

L'adhérence des métaux s'explique par la présence d'électrons libres à leur surface qui forment des filiations cristallines (jonctions cohésives) ou qui maintiennent les surfaces par des forces électrostatiques (jonctions adhésives).

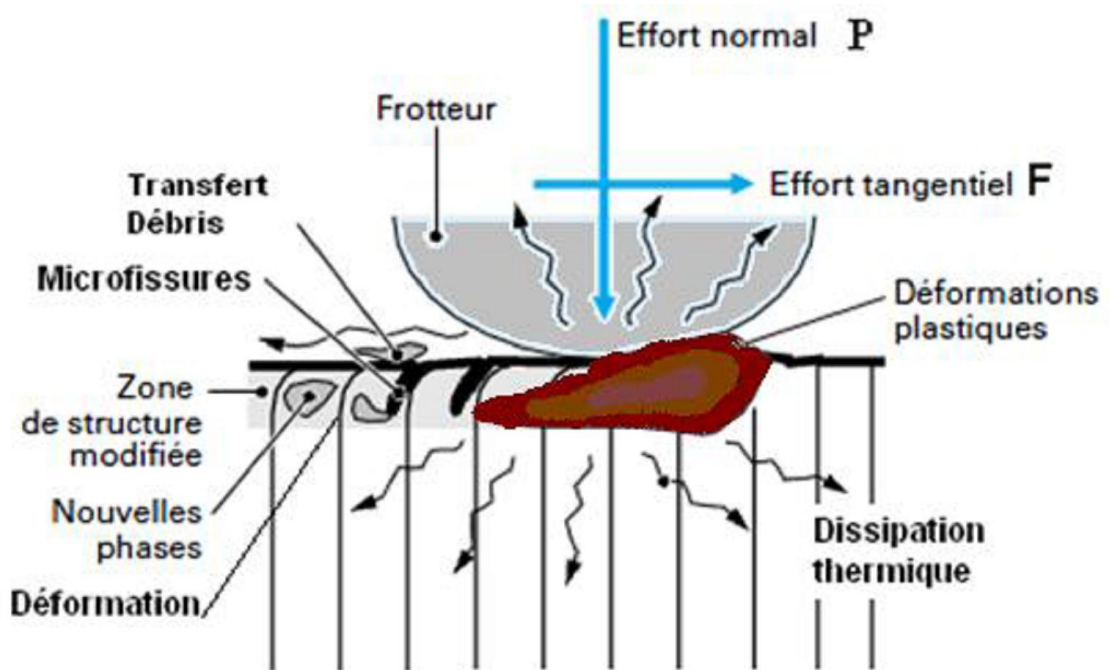


Figure I.7 : Endommagement d'un corps frottant.

I.4. Force et coefficients de frottement :

Les premiers travaux que l'on connaît sur le frottement sont ceux de Léonard de Vinci au début du 16ème siècle [4]. Mais, il faut attendre 200 ans pour que ces travaux aient un statut académique. En effet, Amontons, en 1699, puis Coulomb, en 1780, ont été les premiers à formuler les lois du frottement solide que nous connaissons actuellement.

Les lois d'Amontons se résument en deux postulats:

- La force de frottement F_t est proportionnelle à la charge normale appliquée F_n .
- La force de frottement F_t est indépendante de la surface apparente de contact.

La première loi d'Amontons montre qu'il n'y aura pas de glissement entre deux solides en contact, tant que la force tangentielle F_t , nécessaire pour déplacer le solide, est inférieure à une force minimale F_s .

Lorsque la force tangentielle atteint cette valeur seuil, le solide glisse.

$$F_s = \mu_s F_n \quad (I.1)$$

μ_s est appelé coefficient de frottement statique.

Une fois le solide mis en mouvement, une force F_d est nécessaire pour maintenir le glissement à vitesse constante. L'expérience montre que cette force est également proportionnelle à la charge normale appliquée:

$$F_d = \mu_d F_n \quad (I.2)$$

μ_d définit le coefficient de frottement dynamique. μ_d est généralement plus petit que μ_s .

I.5. Type de frottement

Il existe deux types de frottement, frottement de glissement et frottement de roulement. Pour notre étude, on vise seulement le frottement de glissement.

I.6. Frottement de glissement

Le frottement de glissement est le frottement qui se produit lorsqu'on déplace, sans la faire rouler, la surface d'un corps solide sur la surface d'un autre corps solide. C'est le type de frottement le plus fréquent : un piston glissant dans un cylindre, un arbre tournant à sec dans un palier et un traîneau glissant sur le sol produisent un frottement de glissement.

Lors de son étude, Léonard de Vinci a pu vérifier que la force de frottement de glissement F_{fg} est indépendante de l'aire de contact. Dans le contact surfacique c'est la rugosité des deux surfaces qui est considérée en premier lieu.

Lorsque deux corps sont mis en contact, les surfaces se touchent d'abord aux sommets des rugosités situées sur la crête des ondulations. Ceci établit un certain nombre de points de contact, ce qui définit l'aire apparente de contact (A_a) et l'aire réelle de contact (A_r). Dans la pratique $A_r \ll A_a$. Tel qu'illustré à la figure I.8.

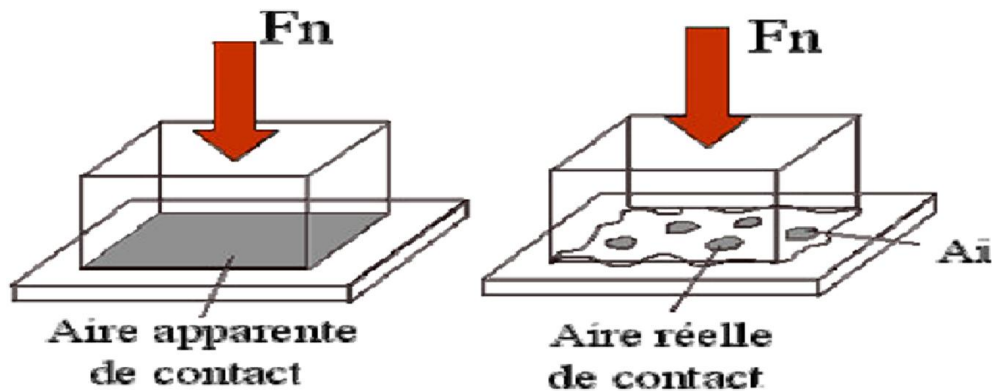


Figure I.8 : Aires de contact réelle et apparente.

Soit la surface réelle de contact A_r , en présence d'une force tangentielle, on a la charge normale transmise par l'aspérité :

$$N = P_r A_r \tag{I.3}$$

P_r : Pression de contact.

La force de cisaillement du film :

$$T = \tau_f . A_r \tag{I.4}$$

τ_f : Contrainte de cisaillement du matériau le moins résistant.

La force normale peut être liée à la résistance à la pénétration

$$N = A_r \cdot H \quad (I.5)$$

H : La dureté du matériau le plus mou.

Le coefficient de frottement

$$\mu = \frac{T}{N} = \frac{\tau_f \cdot A_r}{A_r \cdot H} = \frac{\tau_f}{H} \quad (I.6)$$

Ce résultat a été démontré par BOWDEN et TABOR (1950).

➤ si l'on veut avoir une force de frottement minimale, il est nécessaire de minimiser l'aire de contact réelle et la contrainte de cisaillement

➤ Pour minimiser l'aire de contact, on utilise les métaux durs, comme les aciers trempés.

Pour minimiser le cisaillement, on recouvre le contact d'un film mince réalisé avec un métal tendre comme le plomb ou l'argent.

I.7. Adhérence :

Nous savons que lorsque deux surfaces sont absolument pures elles adhèrent l'une contre l'autre dans le vide; il faut une certaine force de traction pour les séparer. L'adhérence des métaux s'explique par la présence d'électrons libres à leur surface qui forment des filiations cristallines (jonctions cohésives) ou qui maintiennent les surfaces par des forces électrostatiques (jonctions adhésives). L'interaction physique regroupe les ions électrostatiques, les liaisons métalliques et les liaisons Van Der Waals. L'interaction chimique résulte des filiations cristallines. Les forces électrostatiques sont produites par un des électrons de valences transférés d'un atome à un autre qui maintiennent les surfaces par des forces électrostatiques [5].

L'adhérence ne se manifeste habituellement pas, il n'est pas nécessaire d'exercer une traction pour séparer deux solides qui ont été pressés modérément l'un contre l'autre, car:

- Johnson [6] a démontré que les jonctions en état de déformation élastique se séparent spontanément lorsque la charge normale diminue; seules les jonctions plastiques peuvent rester liées ; - les surfaces sont toujours polluées par des oxydes, de la vapeur d'eau adsorbée, par des résidus d'outil et d'huile de coupe. Cette contamination empêche l'adhérence de sorte que ce phénomène ne se produit pas dans l'atmosphère; en revanche, nous l'observons dans le vide, lorsque le métal est tendre et plastifié. Lorsque les deux surfaces sont en mouvement relatif, les jonctions des aspérités se font et se défont de façon continue et ont une résistance au cisaillement τ . [7]. La valeur de τ correspond alors au moins dur des deux matériaux et H représente sa dureté.

I.8. Labourage

Une aspérité dure chargée par une force normale s'enfonce dans une surface tendre (Fig. I.9a). L'application d'une force tangentielle repousse la matière tendre, de sorte que l'aspérité ne porte que sur le flanc opposé à la force (Fig. I.9b). L'équilibre statique vertical n'est alors possible que si l'aspérité s'enfonce un peu plus profondément. Au début du glissement, la matière de la base est repoussée et forme devant l'aspérité le bourrelet frontal (Fig. I.9 c), l'aspérité remonte au-dessus de sa position initiale. Le volume de matière déformée est plus petit qu'au second stade, de sorte que la force nécessaire pour entretenir le mouvement diminue.

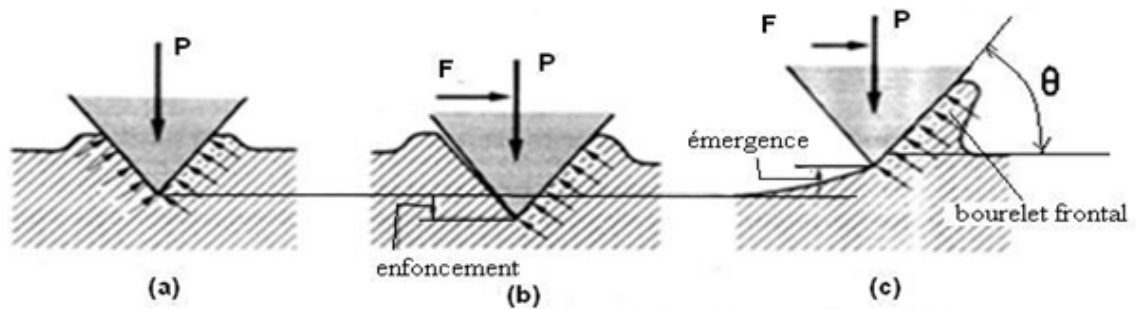


Figure I.9. Début du labourage d'une surface tendre par une aspérité dure: (a) enfoncement statique; (b) premier mouvement par une force tangentielle; (c) émergence au début du glissement [7].

Le corps portant l'aspérité s'éloigne de l'autre au début du glissement et le nombre d'aspérités en contact diminue. Le contact s'opère par les aspérités les plus grosses qui labourent la surface tendre en creusant de larges sillons (Fig. I.10), des petits morceaux sont arrachés à la surface.

Figure I.10. Sillon de labourage et bourellet frontal [7].

I.8.1. Valeurs pratiques du coefficient de frottement

L'étude théorique des mécanismes du frottement sec et mixte ne permet pas de prédire avec exactitude la valeur réelle du coefficient de frottement dans les couples cinématiques et dans les assemblages. Mais la compréhension du phénomène est précieuse pour choisir correctement les matériaux et savoir comment agir pour obtenir les caractéristiques de frottement souhaitées.

Le tableau I.1 donne des valeurs des coefficients de frottement de glissement pour quelques combinaisons de matériaux [8].

Matériau 1	Matériau 2	Statique	Dynamique
Acier doux	Acier doux	0.75	0.57
Acier doux	Fonte	0.75	0.23
Acier doux	Aluminium	0.60	0.47
Acier doux	Bronze	0.50	0.45
Acier durci	Acier durci	0.78	0.42
Acier durci	Régule	0.70	0.35
Fonte	Fonte	1.1	0.15
Aluminium	Aluminium	1.4	1.1
Téflon	Téflon	0.10	0.05
Téflon	Acier	0.05	0.05

Tableau I.1 : Valeurs des coefficients de frottement de glissement.

Bien que les caractéristiques de frottement ne soient pas une propriété intrinsèque des matériaux, ceux-ci peuvent intervenir d'une manière décisive dans le comportement général du système tant par leurs propriétés mécaniques que physicochimiques [9]

I.9. La quantité de chaleur

Considérons un frottement en mouvement sur une surface plane. La quantité de chaleur générée par le frottement, par unité de surface et de temps s'exprime sous la forme :

$$q = \frac{\mu \cdot N \cdot V}{Aa} \left[\frac{\text{joule}}{\text{m}^2} \right] \text{ ou } \left[\frac{\text{watt}}{\text{m}^2} \right] \quad (\text{I.7})$$

Avec μ le coefficient de frottement, N la charge normale appliquée sur le frotteur, V la vitesse de glissement et Aa l'aire apparente du contact.

L'équation peut aussi s'écrire de la façon suivante :

$$q = \mu \cdot pV \quad (\text{I.8})$$

I.9.1. Energie de frottement cumulée :

Diverses méthodes de calcul de l'énergie dissipée dans différents contacts tribologiques sont proposées dans la littérature [10]. Les influences de divers paramètres des essais de frottement, par exemple mode de glissement, charge normale et combinaison de matériaux ont été examinées. En fait, l'augmentation de la température locale résulte d'une dissipation de l'énergie de frottement dans la zone de contact. Mohbacher [11] a introduit le concept d'énergie dissipée cumulée, E_d l'appliquant à des conditions de contact glissant. E_d étant proportionnelle à la force tangentielle, à la longueur du déplacement d'un cycle et au nombre de cycles accomplis, en fonction des cycles de déplacement :

$$E_d = \sum F_T d \quad (\text{I.9})$$

I.9.2. Puissance moyenne de frottement P_f

Est le rapport entre l'énergie de frottement E_d et la durée t de l'essai :

$$P_f = \frac{E_d}{t} \quad (\text{I.10})$$

I.10. Matériaux utilisables pour le frottement

Le choix d'un matériau de frottement est un problème d'optimisation entre des qualités souvent contradictoires.

- **Propriétés mécaniques:** dureté, limite d'élasticité, résistance à la compression, au fluage, à la fatigue, résilience, aptitude au vieillissement et amortissement des vibrations et des chocs.
- **Propriétés physico-chimiques:** masse volumique, température limite d'utilisation, coefficient de dilatation, conductivité thermique, conductivité électrique, résistance à l'oxydation et à la corrosion et aptitude aux traitements.
- Facilité du rodage, résistance à l'abrasion, à l'adhésion et aux propriétés anti-usure grippage, à la corrosion de contact, à l'érosion, à la cavitation et à la corrosion par les lubrifiants.
- **Propriétés techniques:** facilité de mise en œuvre, conformabilité, absorption de particules abrasives, auto-réparation par comblement des rayures, dureté minimale de l'antagoniste, comportement en cas de lubrification déficiente ou d'incident ;
- Comportement face à l'augmentation du jeu, facilité de réparation ou d'échange, aptitude au soudage sur un support,

- **Propriétés d'environnement:** caractéristiques du milieu, moyens et possibilités lubrification, problèmes de pollution ou contamination ;

- **Propriétés socio-économiques :** coût de revient, disponibilité sous des formes diverses, facilité d'approvisionnement, dépendance des fournisseurs, évolution prévisible des techniques.

CHAPITRE II

USURE DES COUPLES DE MATERIAUX METALLIQUES

II.1. Introduction

L'usure est un ensemble complexe des phénomènes difficiles à interpréter, amenant une

émission des débris avec perte de masse, de côtes, de forme, et s'accompagnant des transformations physiques et chimiques des surfaces. Elle est souvent définie par la perte de matière ou de fonction d'un mécanisme suite à une détérioration due au frottement.

II.2. Définition de l'usure

L'usure est une conséquence du phénomène de frottement entraînant une émission de débris avec perte de masse, de côtes, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces [12].

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.

L'évolution de la perte de matière d'un organe mécanique en fonction du temps présente généralement trois phases distinctes.

- rodage : est une phase d'adaptation des surfaces souvent caractérisée par une usure rapide avec une vitesse d'usure régulièrement décroissante ;

CHAPITRE II USURE DES COUPLE DES MATERIAUX METALLIQUES

- marche normale : correspond à l'utilisation normale de l'organe mécanique. La perte de matière est faible, régulière et fonction sensiblement linéaire du temps ;
- vieillissement : traduit la mise hors service du composant due à une usure exagérée qui tend à modifier les conditions nominales de fonctionnement (jeux exagérés, lubrification inefficace, efforts élevés et endommagement des surfaces).

L'usure est généralement combattue à cause de ses effets négatifs mais elle présente aussi des aspects favorables tels que l'affûtage des outils, la finition d'une surface par rectification. L'écriture de la craie sur le tableau ou du crayon sur le papier sont des exemples d'usures abrasives utiles.

II.3. Facteurs d'usure :

II.3.1. Mode de contact : Le mode de contact géométrique influe sur le rôle que les différentes pièces jouent tout au long de la durée d'utilisation du mécanisme.

On distingue trois principaux modes de contact :

- Contact ponctuel, par exemple : sphère sur plan.
- Contact linéaire (par exemple : cylindre sur un plan.
- Contact surfacique (par exemple : plan sur plan.

II.3.2. Etat de surface

Les pièces usinées présentent par rapport à leur forme idéale, des défauts géométriques. L'une des conséquences de l'existence de ces défauts géométriques est que l'aire réelle de contact n'est souvent qu'une faible fraction de l'aire apparente de contact.

II.3.3. Charge :

L'application d'une charge normale sur un solide en mouvement avec un autre conduit à une perte de masse.

II.3.4. Vitesse :

Il s'agit, suivant le cas des vitesses de glissement, de roulement ou de pivotement. On prend par exemple le cas du glissement à sec elle influe surtout sur la température superficielle des pièces en contact.

II.3.5. Environnement :

Par ce terme nous entendons la nature du milieu, ainsi que les conditions de pression et de température qui entourent les pièces dans la région du contact, y compris la lubrification [8].

II.3.6. Nature des matériaux :

Il s'agit de la composition chimique, de structure métallurgique et des propriétés mécaniques des métaux et z

II.4. Type de l'usure :

II.4.1. Usure adhésive :

L'usure adhésive se caractérise par des jonctions interraciales qui s'établissent entre les aspérités des surfaces en contact. Ces aspérités sont soumises à des contraintes locales élevées et subissent des déformations élastiques et plastiques qui provoquent un rapprochement des atomes et la création de liaisons interraciales (Fig. II.1).

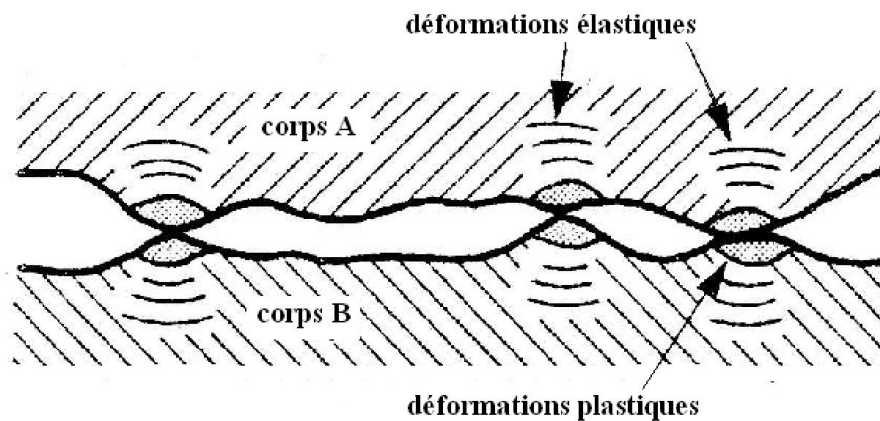


Figure II.1: Contact de deux corps solides [7]

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

La figure II.2 est un exemple de transfert métallique adhésif : une coupe métallographique, pratiquée dans la première gorge d'un segment de moteur Diesel, représente un fragment d'alliage léger de piston (métal le plus tendre) transféré, après cisaillement d'une jonction adhésive, sur la surface dure du flan intérieur du segment en fonte à graphite lamellaire

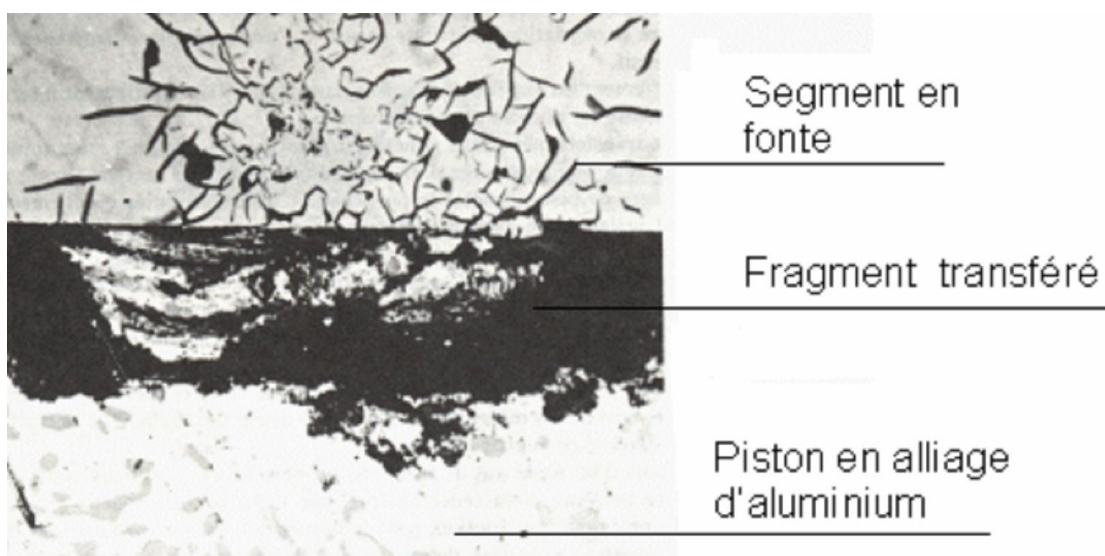


Figure II.2 : Transfert métallique adhésif ($\times 1000$) [13].

II. 4.1.1. Modélisation de l'usure adhésive

II. 4.2. Modèle d'Archard

Le contact avec frottement entre deux corps entraîne une usure des surfaces en contact. Le modèle le plus souvent utilisé pour modéliser l'usure est la loi d'Archard [14]. Ce modèle permet de calculer l'évolution de l'usure dans le temps et ainsi modifier le déplacement des surfaces de contact en fonction de cette usure. En effet, Archard a proposé une modélisation empirique de la phase linéaire de l'usure. Cette modélisation s'appuie d'une part sur le fait que le contact des surfaces

CHAPITRE II USURE DES COUPLE DES MATERIAUX METALLIQUES

ne se fait que par un nombre réduit d'aspérités réparties aléatoirement sur la surface et d'autre part que ces aspérités doivent supporter la charge et maintenir les déformations dans le domaine d'élasticité. Ils supposent donc que le volume usé est proportionnel à la charge appliquée à la distance parcourue et inversement proportionnel à la résistance mécanique des matériaux exprimée par la limite de fluage en compression assimilée à la dureté. Dans ce modèle, le volume d'usure U s'écrit sous la forme :

$$V = \alpha \frac{K}{3} \cdot \frac{NL}{H} \quad (\text{II.1})$$

V : Taux d'usure adhésive ou le volume arraché [mm^3].

α : Coefficient caractérisant le type de frottement. $\alpha = 1$ pour le frottement sec ou à très faible vitesse et $1 < \alpha$ Pour le frottement lubrifié.

3 : Facteur de forme pour une particule d'usure de forme hémisphérique, ce facteur est différent de 3 pour les autres formes de particule.

N : Charge normale appliquée [N].

L : Distance de glissement [m].

H : Dureté du matériau le plus tendre dans le contact.

K : Considéré comme le coefficient d'usure, varie de 0.1 à 0.01 pour l'usure sévère (frottement sec, contact métal-métal), il est de l'ordre de 10^{-5} en régime d'usure modérée (frottement lubrifié, surfaces oxydées) et peut atteindre 10^{-6} à 10^{-7} pour un frottement bien lubrifié.

Le coefficient d'usure varie lui-même avec les autres paramètres tribologiques comme l'environnement, la nature des corps frottement, la vitesse de glissement, la charge normale.

D'après la loi d'Archard précédente on peut tirer le suivant :

- Le taux d'usure est généralement proportionnel à la charge normale N ;
- Le taux d'usure est généralement proportionnel à la distance de glissement L ;
- Le taux d'usure est généralement inversement proportionnel à la dureté de la surface H .

II.4.3. Usure par abrasion

L'usure abrasive est due au contact par pénétration des aspérités du matériau dur dans le matériau le plus tendre provenant des débris d'usure, ou plus généralement un troisième corps introduit dans le contact.

L'endommagement subi par la surface se présente sous la forme de stries parallèles à la direction de glissement. En fonction de la sévérité du contact, plusieurs transformations de la surface abrasée se produisent. Elles dépendent des propriétés mécaniques et de la géométrie des matériaux en contact. Si la surface du solide sollicité est considérée comme parfaitement plane, les endommagements suivants peuvent être observés (Figure II.3) :

- coupe, si l'abrasif est suffisamment aiguisé (Figure II.3a) ;
- repoussage de la matière en surface (Figure II.3b) ;
- fracturation, si le solide est fragile (Figure II.3c) ;

CHAPITRE II USURE DES COUPLE DES MATERIAUX METALLIQUES

➤ enlèvement de grains, si le matériau est insuffisamment homogène (Figure II.3d).

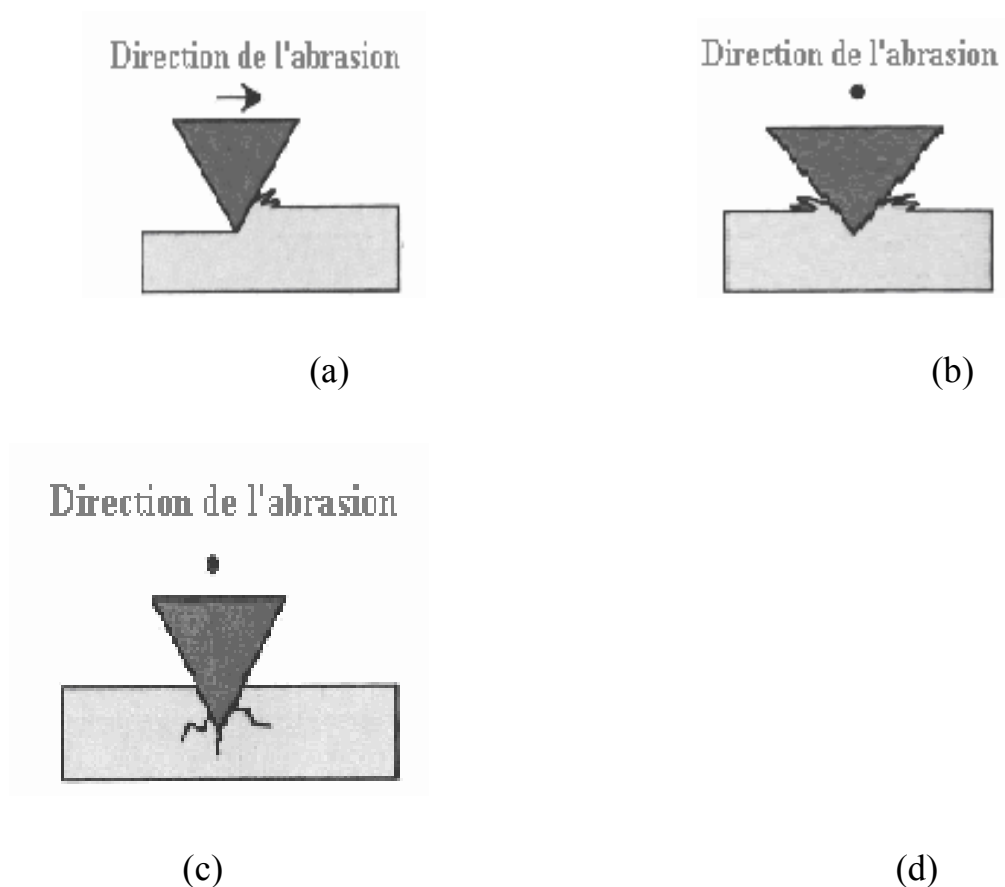


Figure II.3: Schémas des mécanismes d'usure abrasive : a : découpe, b : fracture, c : fatigue, d : arrachage [15].

Lors de l'abrasion d'une surface, l'abrasif provoque soit la formation d'un copeau qui enlève directement de la matière, il se produit alors de l'abrasion par découpe, soit la formation d'un bourrelet plastique sur les bords de la rayure et le passage répété d'aspérités enlève celui-ci : c'est l'abrasion par fatigue.

CHAPITRE II USURE DES COUPLE DES MATERIAUX METALLIQUES

La fatigue de la surface d'un matériau abrasé est analogue à ce qui est observé pour les matériaux soumis à des sollicitations volumiques. Le passage répété de l'abrasif provoque la propagation des fissures dans le matériau à partir de défauts initialement présents dans celui-ci.

L'étude de l'écoulement de la matière en fonction des conditions de sollicitations permet de mieux comprendre l'usure abrasive. Elle dépend des propriétés mécaniques du matériau et de la géométrie de l'indenteur utilisé (celui-ci imposant une déformation et une vitesse de déformation). La mesure du coefficient de frottement permet aussi d'estimer la dissipation d'énergie dans le système lors du test de rayage, c'est pourquoi, pour modéliser le rayage, ont introduit des grandeurs telles que l'énergie d'abrasion ou la dureté à la rayure.

II.4.4. Aspects tribologiques de l'usure abrasive

Il convient de distinguer deux processus d'abrasion des surfaces de frottement:

- Usure abrasive se fait par les aspérités ou protubérances dures d'une des surfaces sur l'autre plus tendre, appelée "abrasion à deux corps" (figure II.4) Les sillons sont formés parallèlement à la direction de déplacement des aspérités abrasives.

En général, un matériau mou et malléable conduit à une usure uniforme tandis que pour un matériau plus dur, l'usure est plus localisée dans la région interlamellaire ou les couches d'oxydes forment des points faibles et entraînent le décollement des lamelles.

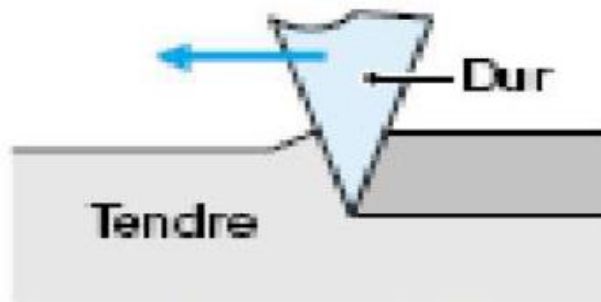


Figure II.4: Usure abrasive à deux corps.

Usure abrasive dite "à trois corps" provoquée par des particules dures (figure II.5) soit véhiculées entre les deux surfaces en contact, soit enchâssées dans l'un d'elles, généralement la plus tendre. L'accumulation de débris d'usure entre les corps finit par constituer une couche intermédiaire, le troisième corps. Selon Johnson, le cisaillement de la couche intermédiaire est la principale source de frottement. Le rodage, le polissage à la pâte ou à la poudre sont des genres d'usure abrasive à trois corps.

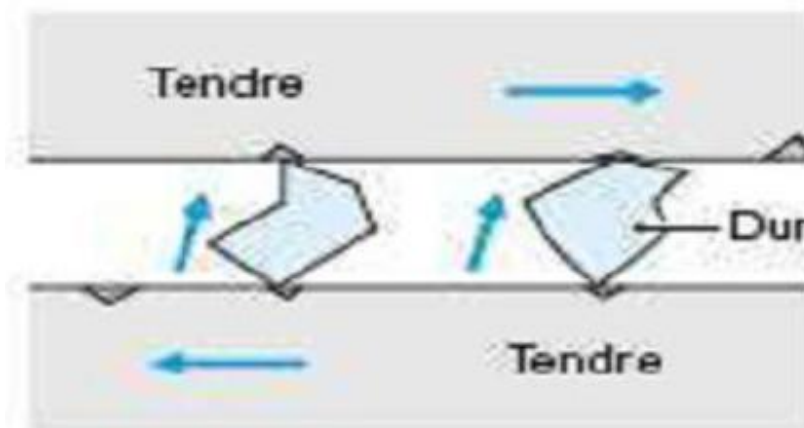


Figure II.5 : Usure abrasive à trois corps.

La figure II.6.a montre l'effet produit par une aspérité dure ou le grain abrasif peut être assimilé à un outil de coupe élémentaire, il provoque sur la surface sur lequel il frotte une rayure (sillon d'abrasion) comme l'indique la (figure II.6b).

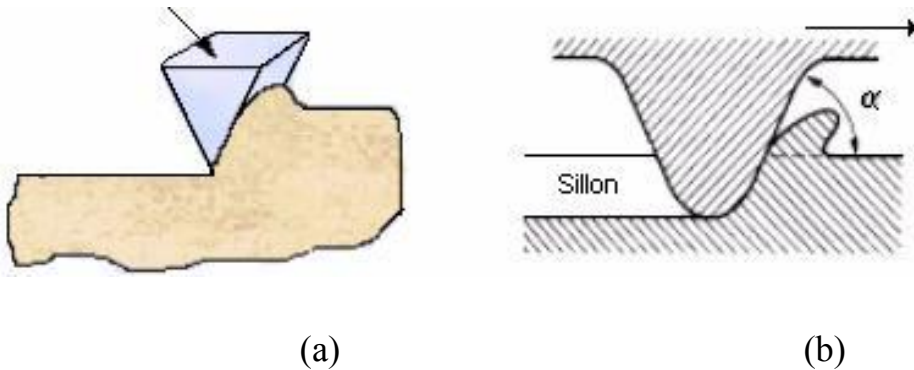


Figure II.16: Effet d'une aspérité ; (a) outil de coupe ; (b) sillon d'abrasion [7].

La quantité du métal du sillon abrasif éliminé de la surface sous forme de particules d'usure par rapport à celle affectée par la déformation plastique est relativement faible, environ 10% à 20% en moyenne. Cette quantité enlevée dépend de nombreux paramètres et plus particulièrement par :

- La dureté relative de la surface abrasée et de l'abrasif. Lorsque la dureté de la surface rayée approche celle de l'abrasif, celui-ci s'émousse, diminuant son aptitude à la coupe.

- La forme de la partie active de l'abrasif, si elle présente des angles vifs, convenablement orientés par rapport au sens de glissement (figure II.7a), l'abrasion sera analogue à un processus de coupe et la trace laissée sera désignée comme une rayure de microscope, contrairement, si elle est arrondie est polie, il y'aura un très peu de matériaux enlevé (figure II.7 b).



Figure II.7 : Mécanisme de l'abrasion par; (a) coupe ;(b) déformation plastique [7].

II.4.5. Quantification de l'usure abrasive

Une loi généralisée d'usure par abrasion a été proposée sous la forme [23] :

$$V = \frac{kfl}{3H} \quad (\text{II.2})$$

Avec

$$K = K' \lambda \left[1 - \exp(-\ln 2 \cdot \left(\frac{H_a}{mH}\right)^{1+2m}) \right] \quad (\text{II.3})$$

V : le volume enlevé du matériau par abrasion [m^3].

H_a : La dureté de l'abrasif [N/mm^2].

H : la dureté du matériau soumis à l'abrasion [N/mm^2].

m : Le coefficient létal d'abrasion constant.

L : la longueur du contact [m].

F : La force appliquée [N].

A : est le facteur de l'angularité de l'abrasif constant.

CHAPITRE II USURE DES COUPLE DES MATERIAUX METALLIQUES

K' : est un coefficient caractéristique de l'écoulement du matériau soumis à l'abrasion.

Actuellement la plupart des spécialistes s'accordent pour considérer que le taux d'usure abrasive d'une surface métallique peut s'exprimer par la relation suivante:

$$\frac{dv}{dl} = K_{abr} \frac{N}{H} \quad (\text{II.4})$$

$\frac{dv}{dl}$: Le taux d'usure en volume par unité de longueur de glissement.

N : Charge appliquée.

H : Dureté de la surface la plus tendre.

K_{abr} : Coefficient d'abrasion.

L'équation (II.4) est identique à l'équation d'Archard, mais ici K_{abr} est une constante indépendante du matériau et ne dépendant que de la géométrie des aspérités ou des grains abrasifs.

CHAPITRE III
RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

III.1. Introduction

Le but de ce chapitre est d'étudier l'influence de la vitesse de glissement sur le Comportement tribologique en frottement et en usure des couples métalliques. Les essais tribologiques examinés ont été effectués sans lubrification et à l'air ambiant sur un tribomètre de type pion-disque.

Les résultats que nous présenterons, sont des travaux de recherches exécutés par des chercheurs. Nous allons faire une comparaison entre les résultats obtenus, pour aboutir enfin à des conclusions qui synthétisent notre étude.

III.2. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement

Mouadji [17] a réalisé ses tests tribologiques à l'aide d'un tribomètre de type pion-disque (figure III.1). Le disque a un diamètre de 100 mm et une épaisseur égale à 15 mm, en graphite correspond à une garniture mécanique. Le pion est de forme cylindrique de longueur 20 mm et de diamètre 8 mm, en bronze au plomb, en cuivre et en graphite. Donc, les trois couples des matériaux métalliques sont : bronze-graphite, cuivre-graphite et graphite-graphite.

CHAPITRE III RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

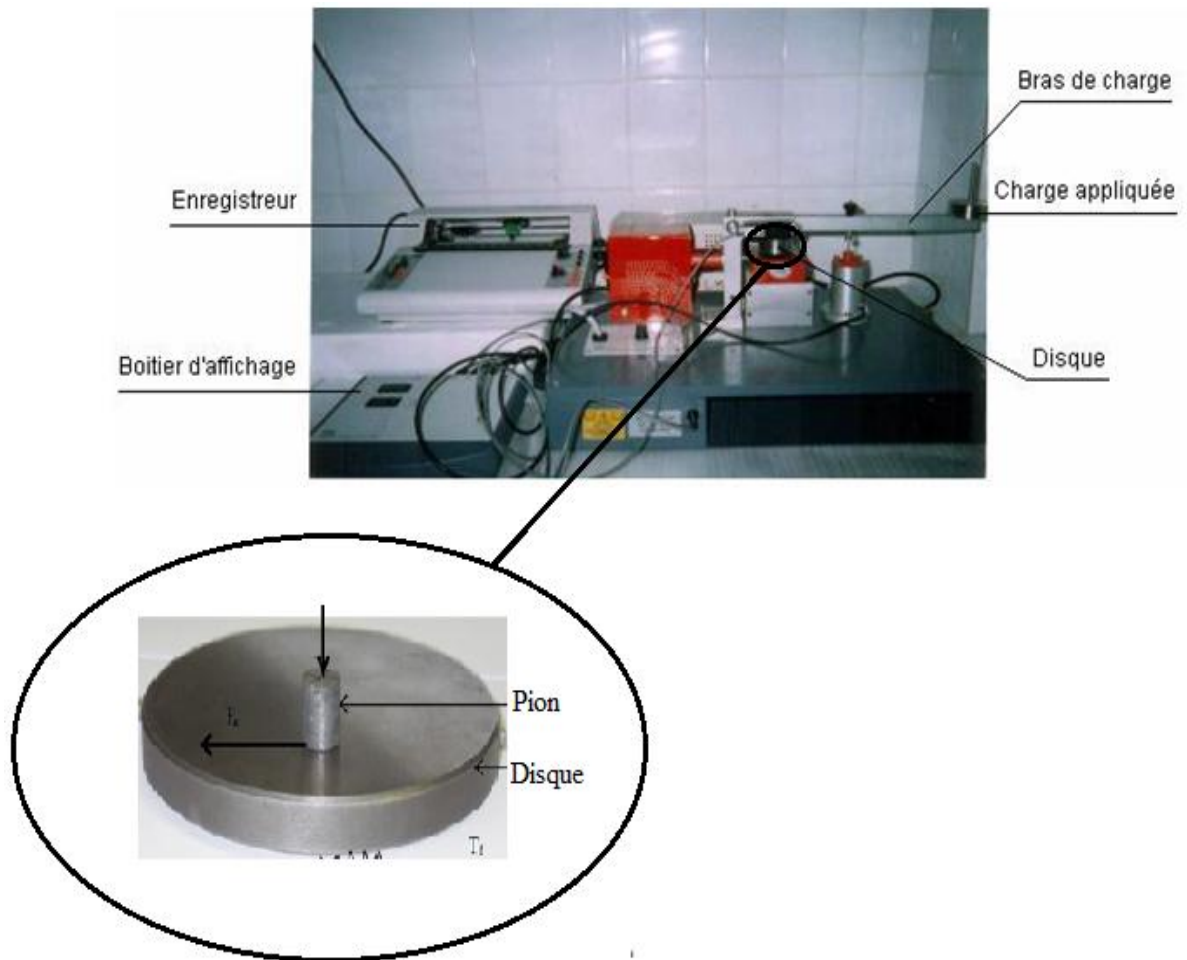


Figure III.1 : Tribomètre de type TE91.

Les caractéristiques mécaniques de ces trois matériaux sont citées dans le tableau III.1

Tableau III. 1: Caractéristiques des matériaux.

Matériaux Propriétés	Graphite (MY3D)	Cuivre (pure)	Bronze
E [N/m ²]	31.10 ⁹	124.10 ⁹	1.10 ⁸
ρ [kg/m ³]	2800	8900	8800
Dureté	75 Shore	56 HV	90 HV

CHAPITRE III RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

Les coefficients de frottement des différents couples ont été enregistrés avec les conditions suivantes : Chaque test a duré trente minutes et une charge normale appliquée constantes et des valeurs de vitesses de glissements variables (entre 0.2m/s et 1m/s).

Les courbes de la figure III.2 révèle que la vitesse n'a pas d'influence significative sur le coefficient de frottement. Nous expliquons cela, que pour des faibles vitesses, des particules arrondies se forment et favorisent le mouvement entre les deux corps [18] et par conséquent la variation du coefficient de frottement reste faible. En effet, pour les couples graphite-graphite et bronze-graphite, le coefficient de frottement diminue légèrement de 0,30 à 0,25, pour le couple graphite-graphite et de 0,23 à 0,18 pour le couple bronze-graphite. Le couple cuivre-graphite reste presque inchangé est varie de 0,19 à 0,20. Ces résultats montrent que le coefficient de frottement est peu sensible à la variation de la vitesse de glissement.

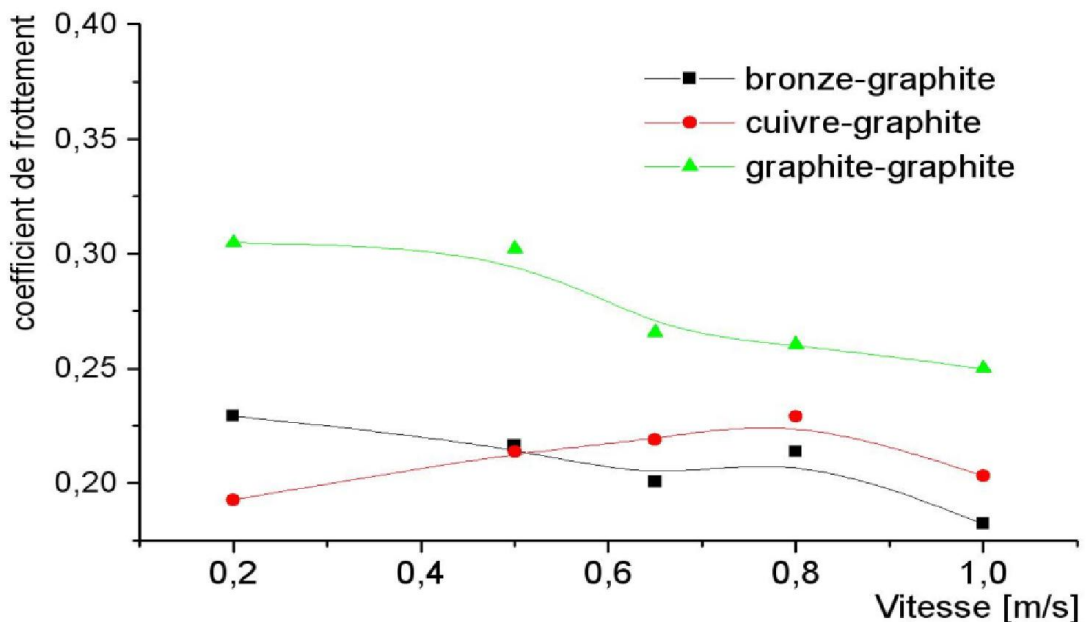


Figure III18 : Evolution du coefficient de frottement en fonction des matériaux frottement contre le disque et de la vitesse de glissement.

III.3. Effet de la vitesse de glissement sur l'usure

La figure III.3 montre que l'usure des couples étudiés diminue légèrement avec l'augmentation de la vitesse de glissement, le couple cuivre-graphite où l'usure est assez importante par rapport aux autres couples pour les deux premières vitesses 0.2m/s et 0.5m/s. Les courbes des couples bronze-graphite et graphite-graphite ont la même allure.

Le principal effet de la diminution de l'usure en fonction de la vitesse est d'agir sur la température de contact, l'élévation de la vitesse augmente la température de contact, cette dernière, favorise la formation des oxydes à l'interface qui jouent un rôle de couche protectrice contre l'usure.

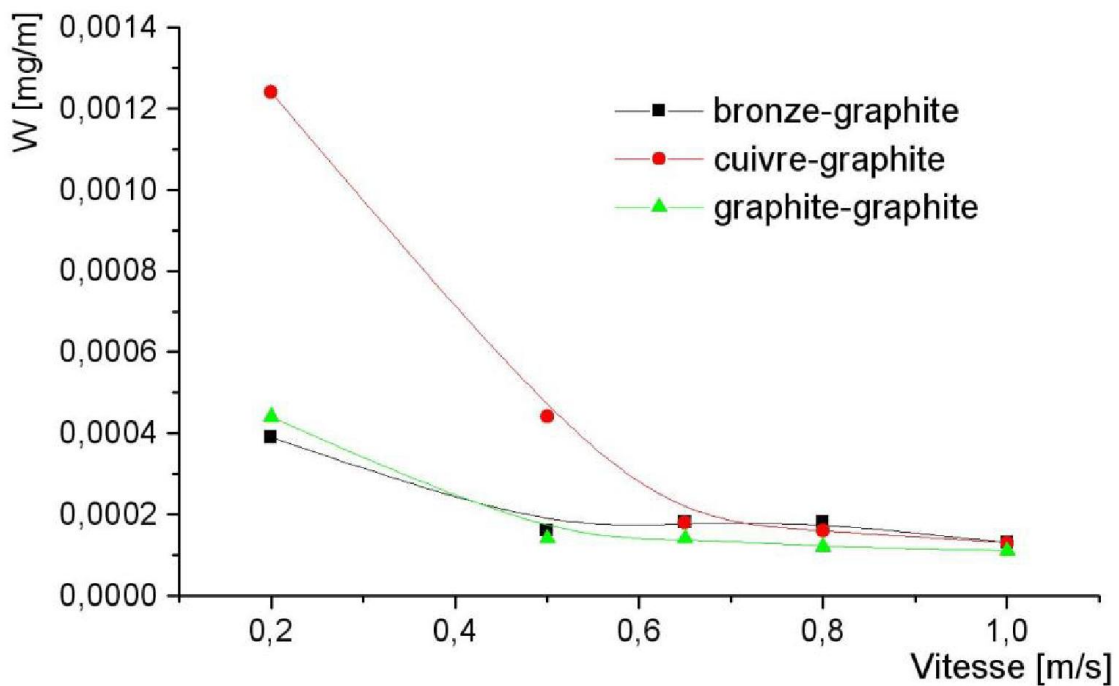


Figure III.3 : Evolution du taux d'usure en fonction de la vitesse de glissement des trois couples pour P = 20 N.

Taltavull et al [19] ont fait leur étude tribologique sur l'alliage de magnésium AM60B en raison de ses propriétés mécaniques qui le rendent adapté à de nombreuses applications, tel que le secteur automobile.

Des tests d'usure ont été effectués dans des conditions de glissement à sec sur un tribomètre(Wazau) de type pion (l'alliage de magnésium AM60B) sur disque (en acier au carbone), sous des charges de 10, 20, 40,80, 150 et 250 N ; et vitesses de glissement de 0,1, 0,3, 0,5 et 1 m/s.

III.3.1. Variation de l'usure en fonction de la vitesse de glissement :

La figure III.4 montre la perte de masse à distance de glissement en fonction de la vitesse pour les différentes charges testées. En général, le taux d'usure maximal a été obtenu pour la vitesse de glissement la plus basse, c'est-à-dire 0,1 ms⁻¹, et ce taux de perte de masse est réduit en augmentant la vitesse de glissement.

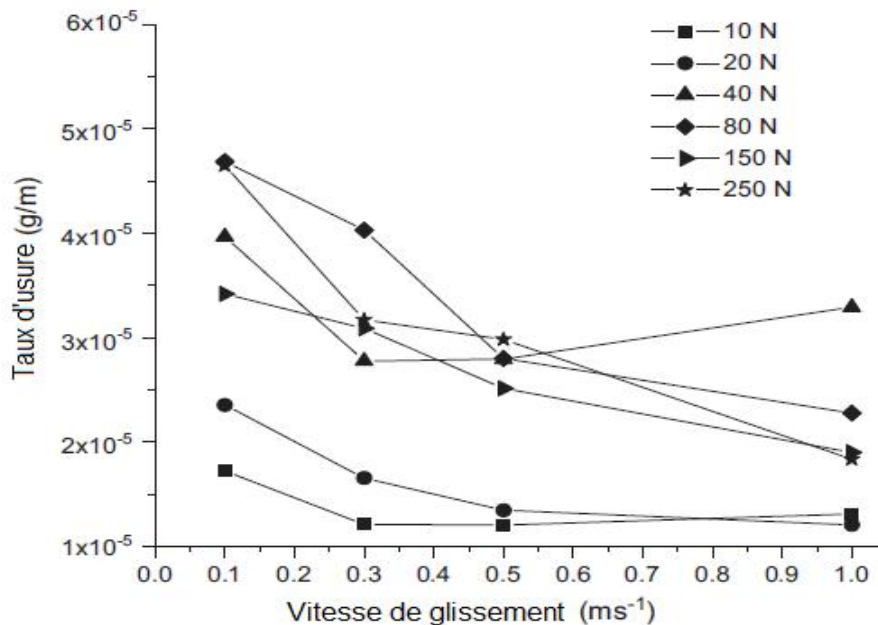


Figure III.4 : Variation du taux d'usure en fonction de la vitesse de glissement.

III.3.2 Cartes de contour des résultats d'usure :

La figure III.5 est une carte de contour dans laquelle le coefficient de frottement est représenté pour les différentes conditions de charge appliquée et de vitesse de glissement. Deux zones différentes peuvent être distinguées ; une pour les charges inférieures à 40 et l'autre pour les charges supérieures.

Au dessous de la charge de 40N et petit avec vitesse de glissement, il y a une haute sensibilité du coefficient de frottement. Cependant, pour les charges appliquées au-dessus de 40N, il y a presque une indépendance de frottement sur la charge appliquée et la vitesse de glissement. Le système a atteint son état stable en termes de coefficient de frottement.

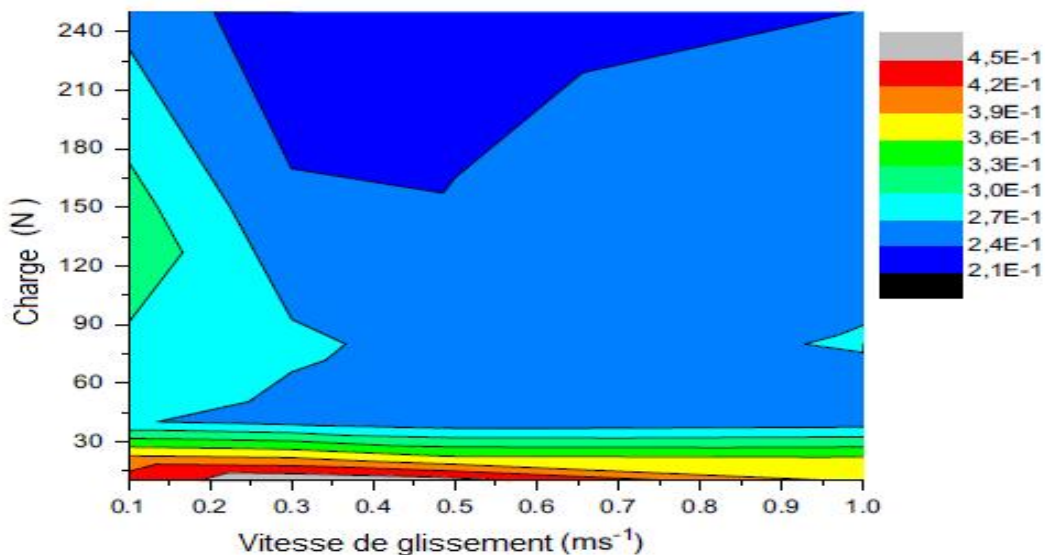


Figure III.5 : Cartes de contour des résultats d'usure.

Le travail de Zemzemi [20] a visé l'étude tribologique des couples de matériaux sur un tribomètre Pion-disque. Ces couples sont :

Les pions utilisés dans ce travail sont obtenus à partir de tiges à bout sphérique de diamètre égal à 9 mm en carbure de tungstène de grade H10F (Sandvik). Ce matériau contient 10 % de cobalt (Co) et 90 % de carbure de tungstène (WC) et a

CHAPITRE III RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

une dureté 1600 HV. Le revêtement TiN (couche de 4 μm déposée par PVD) a été déposé sur les têtes sphériques des pions afin de comparer leurs comportements tribologiques par rapport au carbure non revêtu lors du frottement sur l'acier 27MnCr5 (recuit à 180 HB) dédié au marché de l'automobile et plus précisément à la réalisation de pignons.

La Figure III.6 indique l'effet de la vitesse de glissement sur la variation du coefficient de frottement pour des vitesses de glissement varient entre 60 m/min et 190 m/min et un effort normal égale à 1000 N. Le coefficient de frottement diminue avec l'augmentation des valeurs des vitesses de glissement.

La présence du revêtement de TiN conduit à une réduction du coefficient de frottement macroscopique par rapport au cas du carbure non revêtu, en raison de la diminution du frottement interfacial.

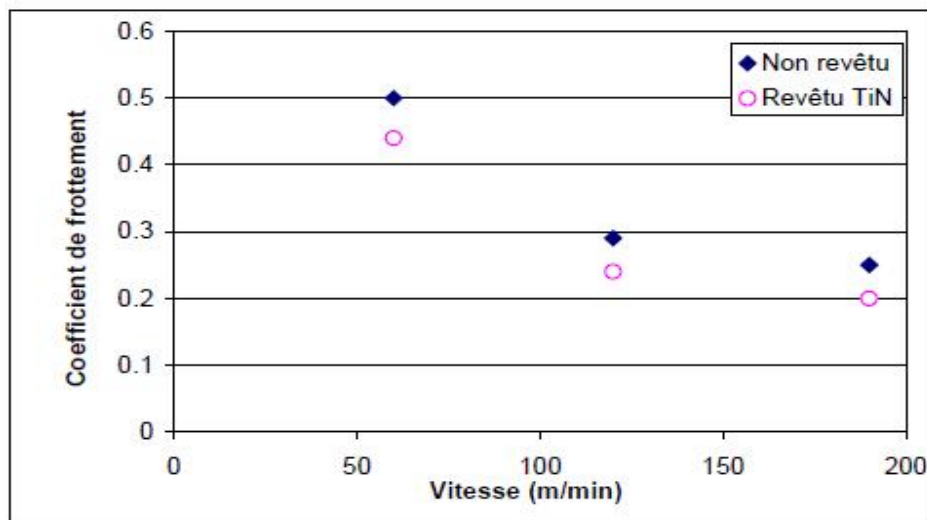


Figure III.6 : Influence de la vitesse de glissement sur le coefficient de frottement pour un effort normal de 1000 N.

CHAPITRE III RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

L'analyse des pions non revêtus après frottement (figure III.7) montre qu'à 60 m/min la matière adhère à la surface du pion et s'accumule devant. Une couche de matière se forme entre le pion et la pièce pour former un troisième corps. Par voie de conséquence, le coefficient macroscopique de frottement est plus important que dans les deux autres cas où ces phénomènes sont moins accentués voire absent pour la vitesse la plus élevée.

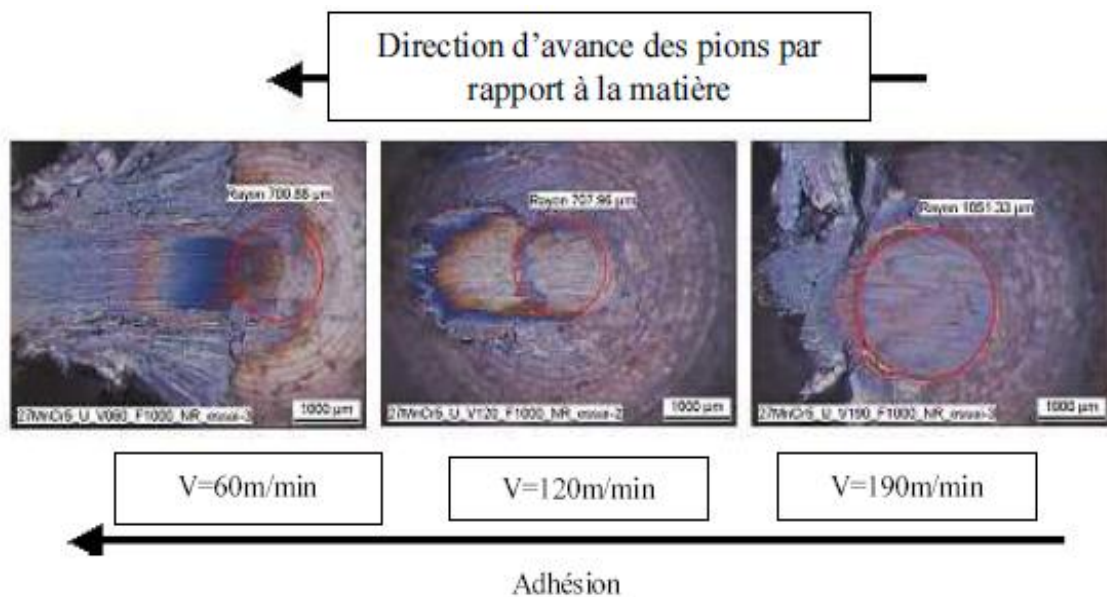


Figure III.7 : Analyse des pions de frottement : influence de la vitesse de glissement sur les phénomènes d'adhésion (pions non revêtus).

Zemzemi a utilisé aussi les essais tribologiques sur l'acier 42CrMo4 (290HB), Cet alliage ferreux est parmi les matériaux les plus utilisés et les plus étudiés à raison de son comportement tribologique important sous des conditions sévères face au carbure de tungstène.

Les essais faits sur des pions revêtus TiN ont montré que l'augmentation de la vitesse de glissement provoque une chute du coefficient de frottement apparent. La

CHAPITRE III RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

figure III.8, présente l'évolution de ce dernier en fonction de la vitesse de glissement pour les 6 niveaux de pression.

Nous remarquons que le coefficient de frottement converge vers une valeur constante (0.2), quand la vitesse de glissement augmente. Nous pouvons distinguer deux zones différentes caractérisant le comportement tribologique de ce contact.

– $V \leq 235$ m/min : Le coefficient de frottement est très sensible à la variation de la vitesse de glissement.

– $V \geq 235$ m/min le coefficient de frottement converge vers 0.2.

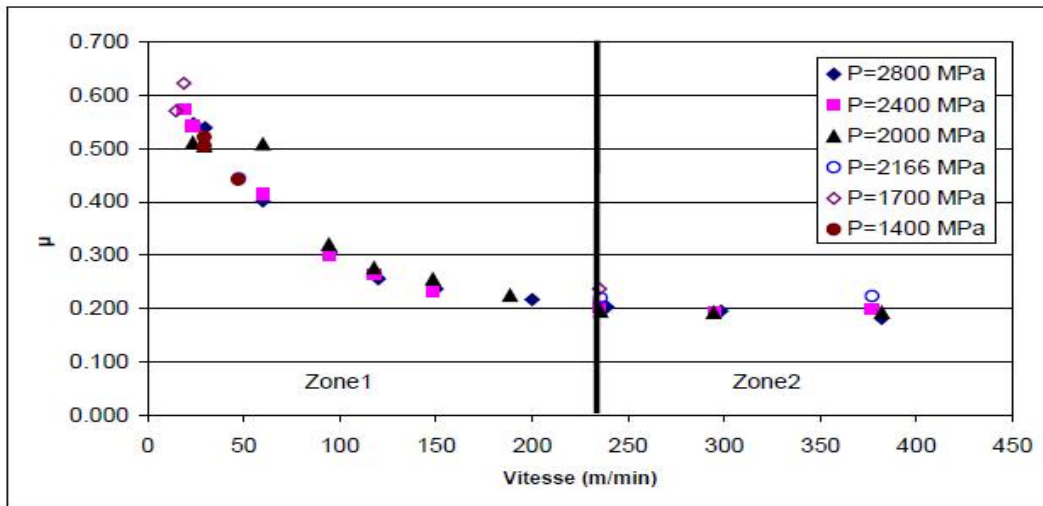


Figure III.8 : Influence de la vitesse de glissement sur le coefficient de frottement dans le cas des pions revêtus TiN.

En effet une augmentation de la vitesse de frottement engendre potentiellement une variation de l'énergie liée au frottement inter facial et à la déformation plastique du matériau.

Il s'en suit une augmentation locale de la température inter faciale ayant pour conséquence une baisse de la composante tangentielle de rayage. Par contre, la valeur du coefficient de frottement inter facial est également affectée par cette modification de la température mais dans une direction d'évolution inconnue a

CHAPITRE III RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

priori.

Dans le but de tester l'influence du revêtement TiN, des essais de comparaison ont été réalisés sur des pions non revêtus. Les investigations réalisées dans la gamme de vitesse comprise entre 60 et 200 m/min ont montré la performance des revêtements TiN. Ces derniers ont permis une réduction du coefficient de frottement de 20% par rapport à celui obtenu par des pions non revêtus. La figure III.9 présente l'évolution du coefficient de frottement apparent en fonction de la vitesse pour les deux types de pions.

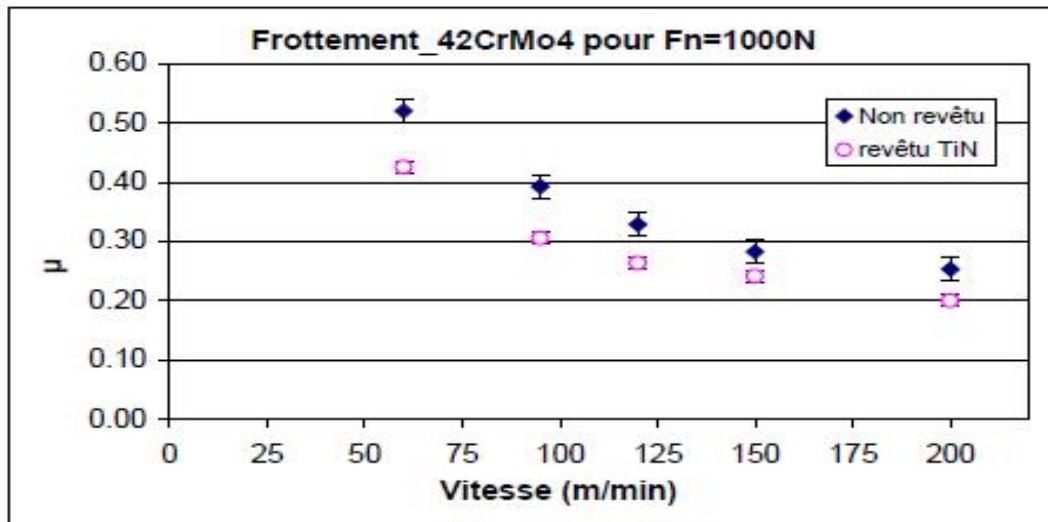
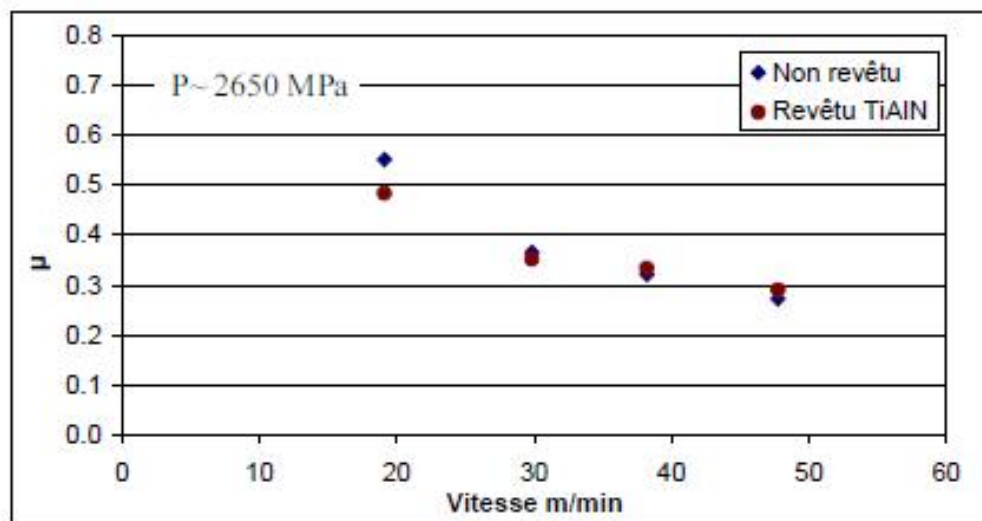
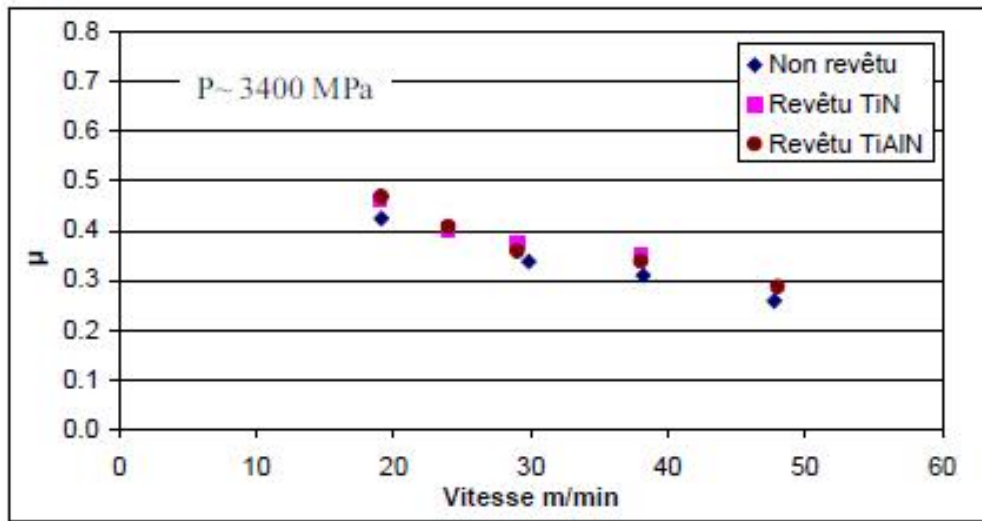


Figure III.9 : Influence du revêtement sur le coefficient de frottement.

Le troisième travail de Zemzemi a été effectué sur l'Inconel 718 à l'état trempé-vieilli. Dans un premier temps nous avons réalisé une comparaison d'essai entre le frottement avec des pions non revêtus et des pions revêtus TiAlN pour 4 niveaux de vitesse et 3 niveaux de pression. L'augmentation de la vitesse de glissement entraîne une diminution du coefficient de frottement.

La figure III.10 illustre l'influence de la vitesse pour les deux types de pion (non revêtu et revêtu TiAlN) et sous différents niveaux de pression de contact.

CHAPITRE III RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION



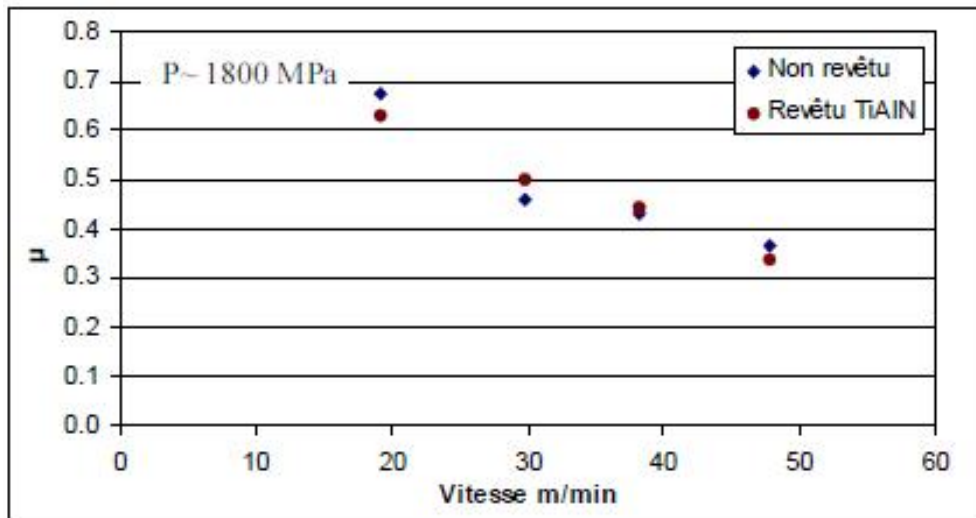


Figure III.10 : Influence de la vitesse de glissement sur le coefficient de frottement.

Les résultats d'essais nous ont permis de conclure que l'influence de la vitesse de glissement est plus significative sur le coefficient de frottement pour des valeurs de pression de contact relativement faibles. En effet, en faisant varier la vitesse de glissement de 10 à 48 m/min le coefficient de frottement diminue. En revanche, l'effet de la vitesse diminue. La diminution du coefficient de frottement pourra être expliquée par l'augmentation de la température de contact qui permet en premier temps l'adoucissement thermique de la pièce, à partir d'un certain seuil, causant ainsi la diminution de l'effet de la déformation plastique et par conséquent la diminution de la force tangentielle.

Les essais de Djafri [21] ont pour objet d'étudier le comportement tribologique (frottement et usure) de trois matériaux destinés aux disques de freins (représentent les disques dans les tests réalisés, le diamètre de la piste sur le disque est entre 20mm et 30mm avec une épaisseur de 10mm.) : Fonte grise FG25 (largement utilisé pour les disques de frein des véhicules, se distingue par ses bonnes propriétés mécaniques, thermiques et tribologiques. Acier chromé 100Cr6,

CHAPITRE III RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

plus dure que la fonte FG25, il se caractérise par une malléabilité et flexibilité acceptables, il résiste bien l'usure.

Le composite d'aluminium Al-MMC (A359/SiCp), est un composite dur à matrice d'aluminium renforcée par des particules du carbure de silicium (Al-SiCp), il est utilisé dans l'industrie d'automobile, aérospatial, et d'autres secteurs civil et militaire.

Les matériaux de friction ou de garniture sont organique de plaquettes de frein de la voiture Fabia (Skoda) et un matériau semi-métalliques des garnitures de freinage pour un avion de transport, qui représentent les pions (de diamètre 9mm et une longueur 10mm). Les tests ont été effectués a une force normale constant $F_n = 200\text{N}$ et une humidité relative constante $H = 25\%$, une température 25°C , une durée de 140 sec. Dans l'évolution du coefficient de frottement (figure III.11), on observe deux zones distinctes. Dans la première zone, où la vitesse de glissement est inférieure à 3.14 m/s, le coefficient de frottement augmente rapidement avec la vitesse de glissement. Dans la deuxième zone, on constate que le coefficient de frottement de la fonte grise et de l'acier chromé diminue lentement avec la vitesse de glissement, alors que celui du composite Al-MMC croit.

Le taux d'usure du pion augmente avec la vitesse de glissement (figure III.12).

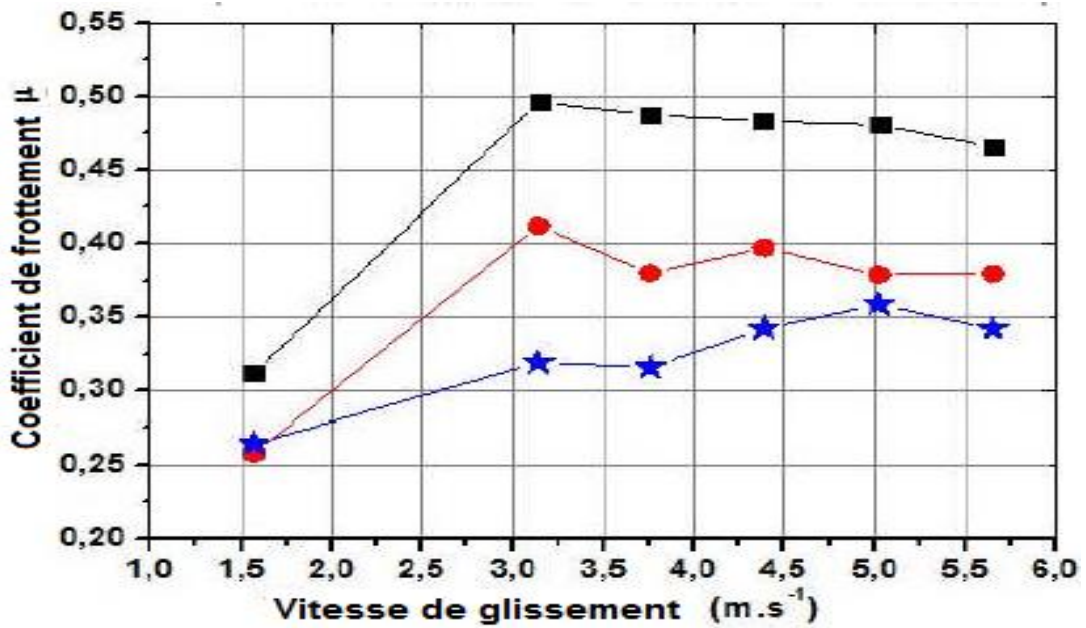


Figure III.11: Influence de la vitesse de glissement sur le coefficient de frottement matériau de friction organique.

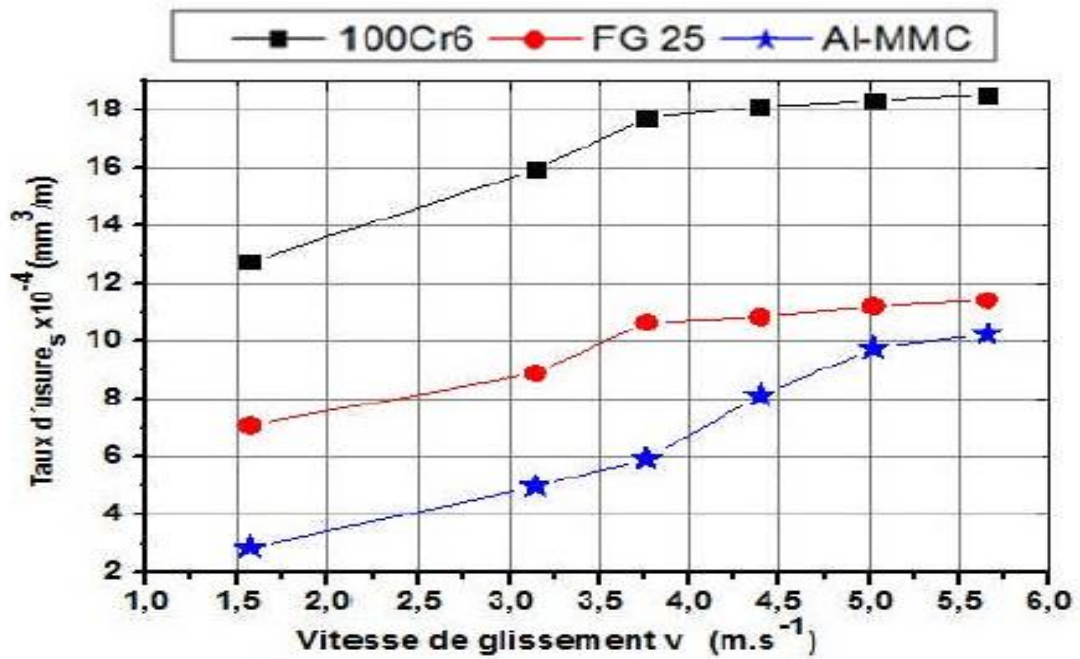


Figure III.12 : Influence de la vitesse de glissement sur le taux d'usure matériau de friction organique.

CHAPITRE III RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

La figure III.13 montre l'influence de la vitesse de glissement sur le coefficient de frottement des matériaux de disques de frein en contact avec un pion semi métallique. La variation du coefficient de frottement pour les deux matériaux, la fonte FG25 et le composite Al-MMC est relativement petite ; il varie de 0,4 à 0,5 (soit 2%) pour la fonte et de 0,5 à 0,62 (soit 19%) pour le composite. Par contre avec l'augmentation de la vitesse de glissement, le coefficient de frottement de l'acier chromé 100Cr6 diminue rapidement. D'après la figure III.14, le taux d'usure du pion frottant contre la fonte grise diminue rapidement avec l'augmentation de la vitesse ; il est très élevé à la vitesse de glissement 1,57m.s⁻¹. Concernant les autres couples de matériaux, on remarque que leurs taux d'usures restent presque invariable comparés à celui du couple fonte-pion semi métallique. L'accroissement de la vitesse de glissement a permis de constater que le composite Al-MMC possède un meilleur comportement tribologique que les deux autres matériaux testés. Durant les essais d'usure, le crissement dû au frottement diminue avec l'augmentation de la vitesse. La fonte grise est caractérisée par un mauvais comportement tribologique aux faibles vitesses de glissement. L'acier chromé 100Cr6 possède par contre un bon comportement tribologique aux faibles vitesses et un mauvais aux grandes vitesses de glissement.

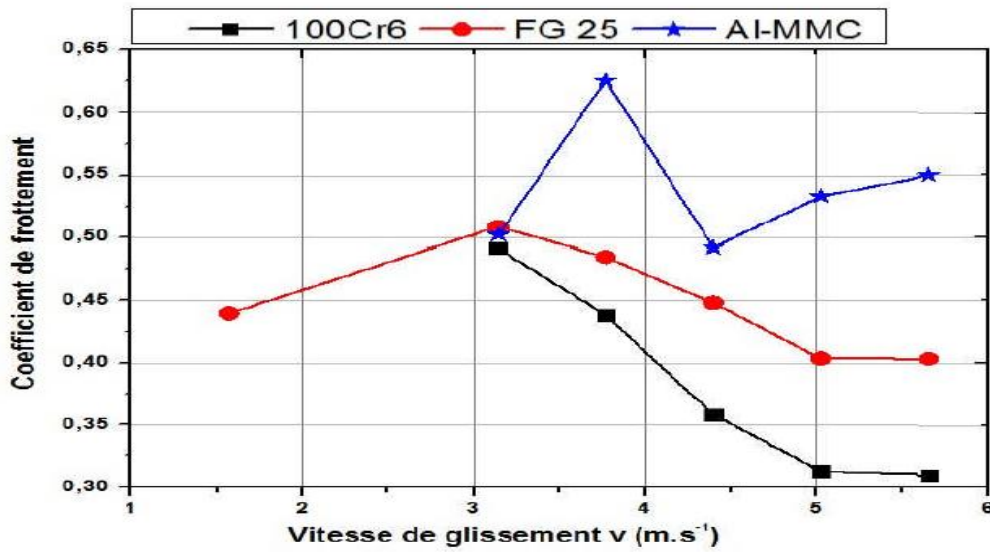


Figure III.13: Influence de la vitesse de glissement sur le coefficient de frottement (matériau de friction semi métallique).

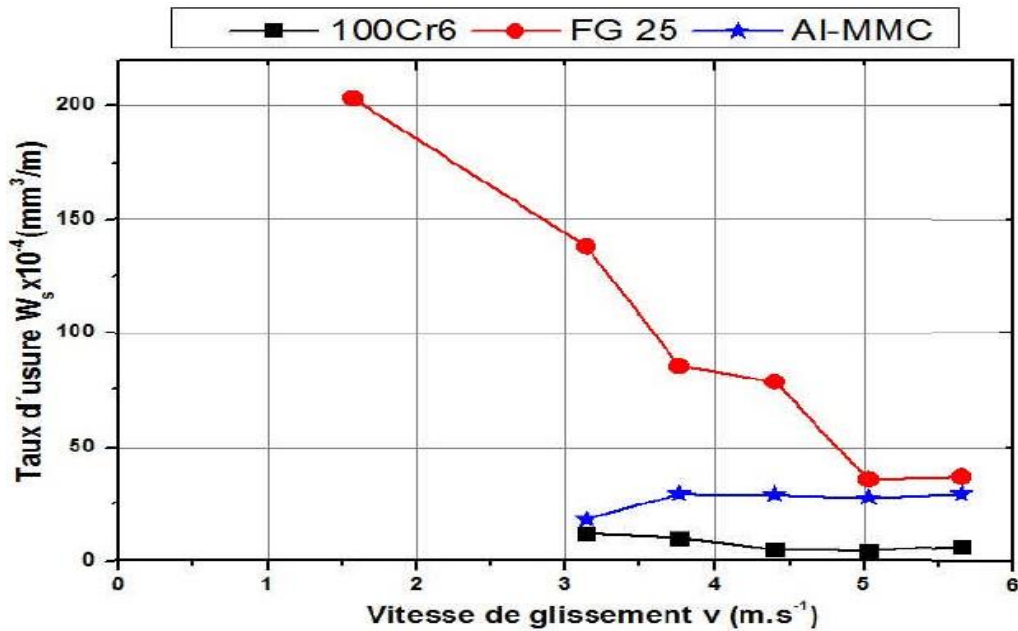


Figure III.14: Influence de la vitesse de glissement sur le taux d'usure (matériau de friction semi métallique).

Les essais de El hadi [22] ont montré l'évolution du coefficient de frottement et la variation de l'usure des couples de matériaux métalliques XC48/XC55 et A60/XC55 en fonction de la charge normale appliquée. Les disques dans les tests réalisés en C55 (XC55), de diamètre 50mm et 12mm d'épaisseur. La vitesse de glissement varie entre 0.08m/s et 0.4m/s avec une charge 5N. Les pions sont des tiges de longueur de 20 mm et de diamètre égale 4 mm, en C45 (XC48) de dureté 224HV et E355 (A60) de dureté 118HV. Le matériau du disque ayant pour dureté 45HRC après trempe et revenu. Chaque essai a duré 40 mn.

III.3.3 Variation de μ en fonction de la vitesse de glissement :

Sur les courbes (figure III.15) on peut remarquer deux branches (zones) différentes :

- Dans la première ($0,08 \leq V \leq 0,32$ m/s) μ est assez élevé, il va diminuer quand la vitesse augmente pour atteindre une valeur limite de l'ordre de 0,55 pour le couple A60/XC55 et 0,60 pour XC48/XC55.

- La deuxième branche ($0,32 < V \leq 0,40$ m/s) est caractérisée par une stabilité de μ à la valeur limite.

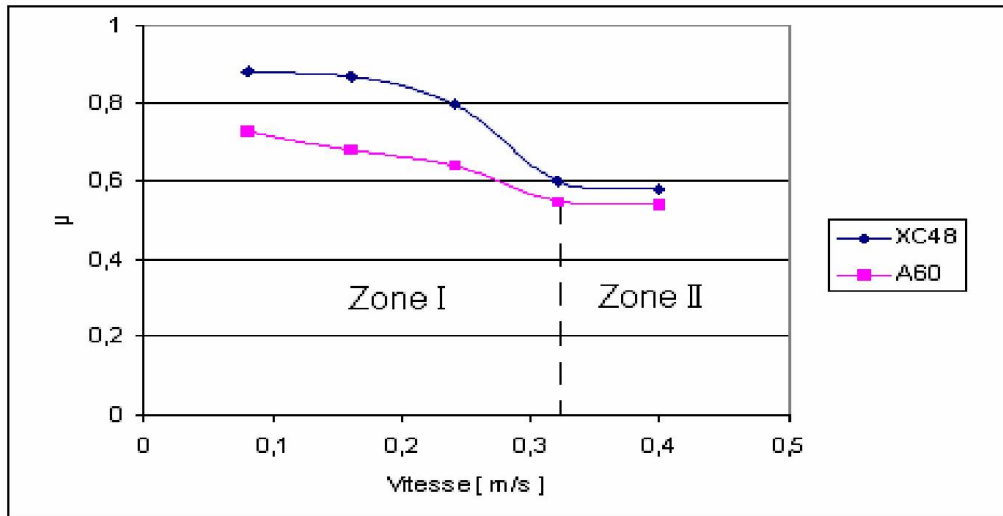


Figure III.15: Evolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement ($N = 5N$).

- **Influence de la vitesse de glissement sur l'usure**

La vitesse est un paramètre essentiel qui a un effet remarquable sur l'usure des couples tribologiques étudiés.

Dans la figure III.16, nous avons constaté qu'il existe deux zones différentes, une zone I où la perte en masse du pion varie d'une manière décroissante avec la vitesse linéaire de glissement appartenant à l'intervalle $[0,08 \text{ m/s}, 0,16 \text{ m/s}]$ et une autre zone II caractérisée par l'augmentation légère de l'usure lorsque cette vitesse augmente de $0,16 \text{ m/s}$ à $0,40 \text{ m/s}$. De plus, le couple A60 / XC55 montre généralement une perte élevée comparée au couple XC48 / XC55.

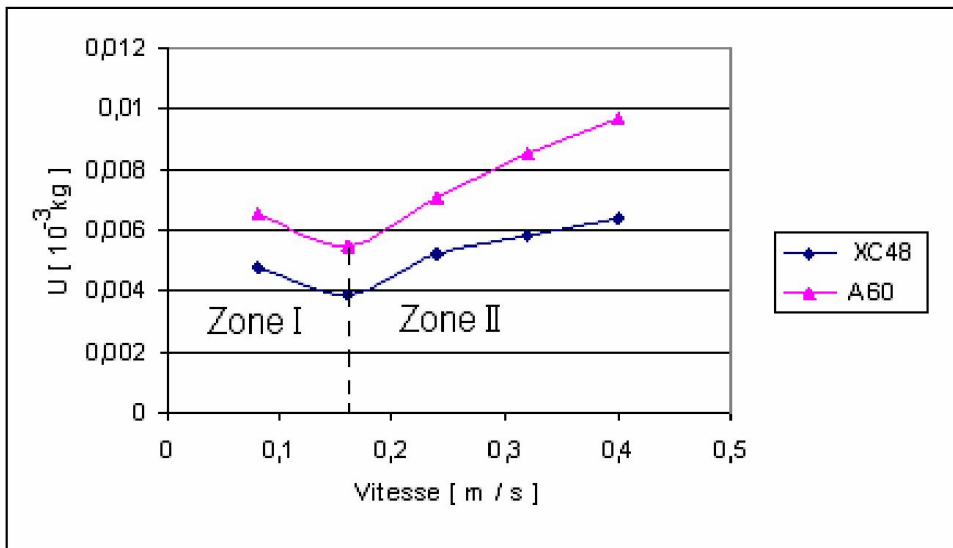


Figure III.16: Variation de l'usure en fonction de la vitesse linéaire de glissement.

Dans l'intervalle de faibles vitesses, entre 0,08 m/s et 0,16 m/s, le coefficient de frottement μ et l'usure U sont élevés au début parce que les jonctions métalliques ont le temps nécessaire pour accroître leurs sections par fluage et la surface réelle de contact s'élargit radialement et dans le sens du mouvement. La décroissance du coefficient de frottement et l'usure est attribué au diminution du temps de croissance des jonctions et par conséquent, le nombre de contacts métalliques est réduit par la formation d'une couche d'oxyde sur la face frottante du pion qui diminue le frottement et protège la surface contre l'endommagement en assurant une bonne résistance à l'usure.

Dans la zone où la vitesse est supérieure à 0,16 m/s, la température à l'interface est élevée, ce qui accroît la vitesse d'oxydation donc la vitesse de la couche d'oxyde. Le film d'oxyde se décompose, on observe un coefficient de frottement constant et une usure plus élevée. La face usée du pion présente des zones colorées, matérialisant la région affectée thermiquement. La piste de frottement présente des déformations avec des sillons labourés dans le sens du

CHAPITRE III RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

mouvement, caractéristique d'une usure abrasive (figure III.17).

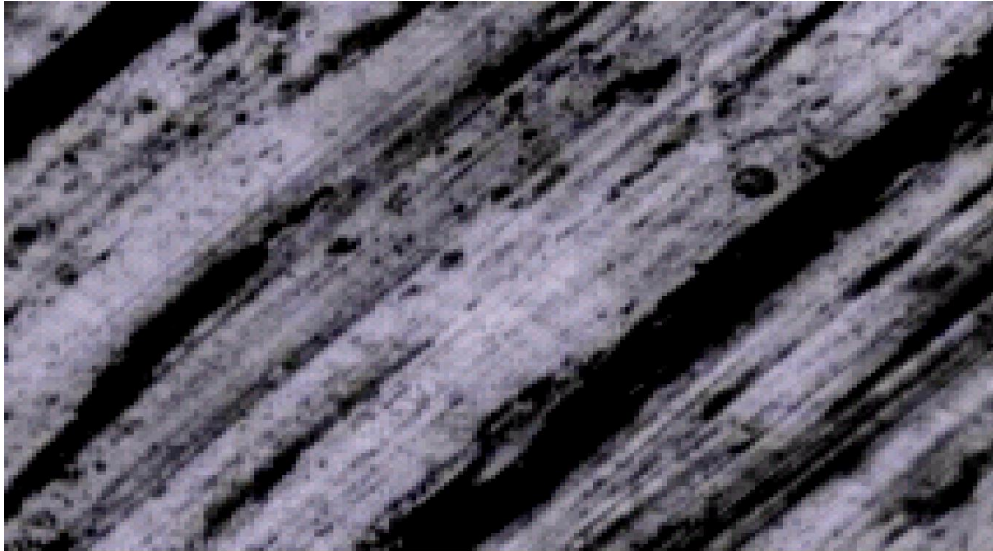


Figure III.17: Aspect microscopique de la surface usée du pion en acier XC48,
(x100), $V=0,32$ [m/s].

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le travail traité dans ce mémoire est de nature expérimentale, il a permis de donner des réponses à certaines questions relatives au frottement et à l'usure.

Il a été montré que le frottement est dû à l'adhérence des surfaces et au labourage d'une surface molle par des aspérités enchevêtrées de la surface dure opposée. L'usure est la conséquence du frottement, engendré par l'enlèvement progressive à la surface des pièces frottements l'une sur l'autre.

Il ressort de ce travail que :

- Il s'agit généralement, d'une diminution du coefficient de frottement avec l'augmentation de la charge.
- Quelques cas, la vitesse n'a pas d'influence significative sur le coefficient de frottement, tels que couples cuivre-graphite, graphite-graphite et bronze-graphite .
- la vitesse de glissement a une influence significative sur l'usure et joue un rôle important dans la durée de vie du couple.
- L'augmentation de la vitesse de glissement provoque l'élévation de la température à l'interface des corps en contact dynamique.
- Le film d'oxydes réduit la résistance au cisaillement à l'interface et facilite ainsi le glissement et joue un rôle de protecteur et transforme le mode d'usure sévère en usure douce.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. DROUIN et al."Manuel éléments de machines "Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal, 1986.
- [2]. K. L. JOHNSON "Contact Mecanics". Cambridge, 1996.
- [3]. Gérald Zambelli, Léo Vincent, Matériaux et contacts (Une approche tribologique).
- [4]. D. DOWSON, History of Tribology, Longman, New York , 1979
- [5]. J. -L. LIGIER "Lubrification des paliers moteurs". Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs. 1997.
- [6]. K. L. JOHNSON "Contact Mecanics". Cambridge, 1996.
- [7]. GEORGES SPINLER "Conception des machines". Principe et application, 1 Statique 1997.
- [8]. Site Internet Elément de tribologie (<http://www.cours.polymtl.ca>).
- [9]. 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
- [10]. M. Z. HUQ, J. P. CELIS "Wear". 212, 1997.
- [11]. H. MOHRBACHER, J. P. CELIS, J. R. ROOS. Tribo , Int, 28, 1995.
- [12] P. Kapsa, M. Cartier, Usure des contacts mécaniques-Manifestation de l'usure, Techniques de l'ingénieur, 2001, BM 5067.JEAN BLOUET "Usure et frottement" T. ing. A 3139.
- [13] J. AYEL "Les lubrifiants, moteur et pertes par frottement et usure". Institut Français du Pétrole, 1979.
- [14] J. F. Archard, "Contact and rubbing of flat surfaces", Appl. Phys., vol. 34, pp. 981-988, 1953.
- [15] J.M.Georges, Frottement, usure et lubrification, Eyrolles.2000.
- [16] P. DUMON, "Revêtements par soudage et projection thermique" Tome1 Usure – Produit et procédés, Institut de Soudage, 1991.
- [17] Mouadji Youcef. Effets du courant électrique sur le mécanisme de croissance de la couche d'oxyde a l'interface des contacts électrodynamiques cuivre-graphite

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- et graphite-graphite. Thèse de Doctorat en Sciences. Université de Constantine 1. 2013.
- [18] E. Rabinowicz, Friction and Wear of Materials, 2 Edition, Wiley, New-York, pp. 3 15, 1995.
- [19] C. Taltavull, B.Torres,A.J.Lo´pez, J.Rams, Dry sliding wear behavior of AM60B magnesium alloy, Wear 301, 615–625, 2013.
- [20]Zemzemi Farhat. Caractérisation de modèles de frottement aux interfaces pièce-outil-copeau en usinage : application au cas de l’usinage des aciers et de l’inconel 718 Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon. 2007.
- [21]DJAFRI Mohammed. Etude numérique et expérimentale du comportement tribologique des contacts glissant - Application aux freins à disques, Thèse de Doctorat, Université des sciences et de la technologie d’Oran ,Mohamed Boudiaf, 2015.
- [22] ELHADI Abdelmalek. Influence des paramètres mécaniques lors de l’endommagement par les phénomènes tribologiques des couples des matériaux XC48/xc55 ET A60/XC55. Mémoire de Magister. Université Med Boudiaf de M’sila. 2006.