

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 Mécanique

Présenté par :
GASMI Rami & BELABES Abdelhak

Thème

***ETUDE COMPARATIVE DE L'EFFET DE LA CHARGE
NORMALE APPLIQUEE SUR LE COMPORTEMENT
TRIBOLOGIQUE DES COUPLES METALLIQUES***

Devant le jury composé de :

DEBIH Ali	MCA	Président
ELHADI Abdelmalek	MCB	Encadreur
BOUDILMI Aissa	MCA	Examineur

Année Universitaire 2020/2021

N° d'ordre :

SOMMAIRE	
REMERCIEMENTS	
RESUME	

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE 01

1.1	Introduction.....	2
1.2	Définition des surfaces solides	2
1.3	Structure d'une surface	2
1.3.1	Gaz adsorbés :	3
1.3.2	Couche d'oxyde	3
1.3.3	Couche de Beilby	3
1.3.4	Couche déformée	3
1.4	Profil de la surface	4
1.5	Types de surface	4
1.5.1	Surface géométrique	4
1.5.2	Surface spécifiée.....	4
1.5.3	Surface réelle.....	5
1.5.4	Surface mesurée.....	5
1.6	Quelques propriétés des surfaces	5
1.6.1	Caractérisation topographique des surfaces.....	5
1.6.1.1	Ecart quadratique moyen du profil (R_q).....	5
1.6.1.2	Ecart arithmétique moyen du profil (R_a)	6
1.6.2	Dureté des surfaces	6
1.7	Contact entre surfaces	7
1.7.1	Aires de contact réelle et apparente	7
1.8	Mécanique du contact.....	7
1.8.1	Contact localisé	8
1.8.2	Contact élastique.....	8
1.8.3	Contact extérieur entre deux sphères.....	9
1.8.4	Contact extérieur de deux cylindres parallèles	9
1.8.5	Contact plan	10

CHAPITRE 02

2.1	Introduction.....	11
2.2	Définition du frottement.....	11
2.3	Phénomène de frottement	11
2.4	Force et coefficient de frottement.....	12
2.5	Types de frottement.....	13
2.5.1	Frottement sec	13

2.5.2	Frottement hydrodynamique.....	13
2.5.3	Frottement onctueux	13
2.5.4	Frottement de glissement.....	14
2.5.5	Frottement de roulement	15
2.6	Mécanismes du frottement de glissement sec	16
	Adhérence	16
2.7	Labourage.....	17
CHAPITRE 03		
3.1	Introduction.....	19
3.2	Définition de l'usure	19
3.3	Facteurs de l'usure	19
3.3.1	Mode de contact	19
3.3.2	Charge de contact.....	20
3.3.3	Vitesse relative entre les pièces	20
3.3.4	Etat des surfaces flottantes.....	20
3.3.5	Propriétés mécaniques des matériaux.....	20
3.3.6	Absence ou présence d'un lubrifiant.....	20
3.3.7	Matériaux	21
3.4	Mécanismes d'usure.....	21
3.4.1	Usure adhésive	21
3.4.1.1	Quantification de l'usure adhésive.....	22
3.4.2	Usure abrasive	22
3.4.2.1	Types d'usure abrasive	24
3.4.2.1.1	Usure abrasive a trois corps.....	24
3.4.2.1.1.1	Abrasion à trois corps fermés	24
3.4.2.1.1.2	Abrasion à trois corps ouverts :	25
3.4.2.2	Quantification de l'usure abrasive	26
CHAPITRE 04		
4.1	Introduction.....	27
4.2	Effet de la charge normale sur le coefficient de frottement.....	27
4.3	Effet de la charge normale sur l'usure	29
4.4	Evolution du coefficient de frottement avec la force normale.....	32
4.5	Variation de l'usure en fonction de la force normale	32
4.6	Influence de la charge normale sur l'usure	37
4.7	Influence de la charge normale sur le coefficient de frottement du matériau semi métallique et matériaux des disques de frein	38
4.8	Influence de la charge normale sur l'usure du matériau semi métallique et matériaux des disques de frein	39
4.9	Evolution du coefficient de frottement en fonction de la charge normale	42
4.10	Variation de l'usure en fonction de la charge normale.....	43

<i>CONCLUSION GÉNÉRALE</i>	46
<i>BIBLIOGRAPHIE</i>	

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Surfaces des solides

Figure 1.2 : Différentes couches en surface d'un solide métallique

Figure 1.3 : Profil d'une surface

Figure 1.4 : Creux et crêtes du profil d'une surface

Figure 1.5: Ecart quadratique moyen

Figure 1.6 : Ecart arithmétique moyen du profil R_a

Figure 1.7 : Aires de contact réelle et apparente

Figure 1.8 : Contacts localisés : a) Roulement à bille ; b) Came poussoir

Figure 1.9 : Contact sphère-plan

Figure 1.10 : Contact extérieur de deux sphères

Figure 1.11 : Contact extérieur de deux cylindres parallèles

Figure 1.12 : Aire de contact

CHAPITRE 02

FROTTEMENT DES COUPLES DE MATERIAUX METALLIQUES

Figure 2.1 : Solide sur un support horizontal

Figure 2.2 : Force de frottement

Figure 2.3. : Frottement hydrodynamique

Figure 2.4. : Frottement onctueux

Figure 2.5. : Aires de contact réelle et apparente

Figure 2.6: Frottement de roulement

Figure 2.7 : Aire de contact

Figure 2.8 : Mécanisme d'adhérence

Figure 2.9. : Labourage d'une surface tendre par une aspérité dure

Figure 2.10 (a) Sillon de labourage par bourrelet frontal ;(b) Labourage par des débris d'usure

CHAPITRE 03

USURE DES COUPLES DE MATERIAUX METALLIQUES

Figure 3.1 : Schéma d'un patin plan glissant sur une glissière plane

Figure 3.2: Tourillon avec diverses traces d'usure

Figure.3.3 : a) Etat de surface présentant une usure par abrasion ; b) Mécanisme d'usure par abrasion

Figure 3.4 : Usure abrasive à deux corps

Figure 3.5 : Abrasion à trois corps fermés

Figure 3.6 : Abrasion à trois corps ouverts

CHAPITRE 04

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

Figure 4.1: Couple pion-disque

Figure 4.2 : Evolution du coefficient de frottement en fonction des matériaux frottant en fonction de la charge appliquée

Figure 4.3 : Image obtenue par microscope optique de la surface usée du pion dans un contact cuivre-graphite ($P = 20 \text{ N}$)

Figure 4.4. Evolution du taux d'usure en fonction de la charge des trois couples pour $V = 1 \text{ m/s}$

Figure 4.5. Image obtenue par microscope optique de la surface usée du pion, (a) contact cuivre-graphite, (b) contact bronze-graphite, (c) contact graphite-graphite

Figure 4.6. : Evolution du coefficient de frottement avec la force Normale ($V = 0,1 \text{ m/s}$)

Figure 4.7 variation du taux d'usure en fonction de la charge

Figure 4.8 : Influence de la charge normale appliquée sur le coefficient de frottement du couple C45/C45

Figure 4.9 : Influence de l'effort normal sur le coefficient de frottement pour une vitesse de glissement 120 m/min

Figure 4.9 : Influence de l'effort normal sur le coefficient de frottement pour une vitesse de glissement 120 m/min

Figure 4.10 : (a) Déformations plastiques générées ; (b) déplacement de la matière vers les cotés

Figure 4.11 : Influence de la charge normale sur le coefficient de frottement avec matériau de friction organique

Figure 4.12: Influence de la charge normale sur le taux d'usure matériau de friction organique

Figure 4.13 : Influence de la charge normale sur le coefficient de frottement Matériau de friction semi métallique

Figure 4.14 : Influence de la charge normale sur le taux d'usure du matériau de friction semi métallique

Figure 4. 15 : Evolution de la surface de contact des disques après les tests de frottement contre pion en matériau organique : Fonte grise FG25 (a et b) ; Acier chromé 100Cr6 (c et d) ; Composite Al MMC(e et f).

Figure 4.16.: Evolution du coefficient de frottement μ en fonction de la charge ($V=0,24$ m/s)

Figure 4.17: Effet de la charge normale sur l'usure du pion ($V=0,08$ m/s).

Figure 4.18 : Vue microscopique (x100) de la face usée du pion : (a) XC48; (b) A60 non traité dans les conditions expérimentales suivantes : $N = 9\text{N}$ et $V=0,32$ m/s

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

*A ma source éternelle d'inspiration, de
motivation et de bénédiction...*

*Mes très **chers parents** Qu'ALLAH les
protèges.*

Et toute la famille, sans oublier mes amis.

Remerciements

Nous remercions Dieu qui nous a donné le pouvoir et nous a aidé à terminer ce modeste travail.

*Pour cette occasion, nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements à tous ceux qui nous ont aidé de loin ou de près à la réalisation et à la mise au point de ce travail et notre formation tout au long du cycle, en particulier Mr. l'encadreur: **Elhadi Abdelmalek** pour ses critiques bienveillantes, ses précieux conseils, sa confiance, sa patience, sa disponibilité et son soutien indéfectible.*

Nos remerciements vont ensuite aux membres du jury d'avoir accepté évaluer ce travail et de contribuer à l'améliorer.

A tous les professeurs et les étudiants du département de Génie Mécanique.

A tous, nous disons merci !

Résumé

Le travail présenté, consiste à étudier l'influence de la charge normale appliquée sur le comportement tribologique en frottement et en usure des couples de matériaux métalliques. En se basant dans notre étude sur l'analyse des résultats des testes tribologiques déjà obtenus par des chercheurs. Les essais de frottement ont été effectués à l'aide des tribomètres de type pion-disque.

ملخص

العمل المقدم هو دراسة تأثير القوة العمودية المطبقة على السلوك التريبولوجي في الاحتكاك و التآكل لأزواج من المواد المعدنية. تم الأخذ في عين الاعتبار أثناء دراستنا تحليل النتائج التي تم الحصول عليها من طرف الباحثين فيما يتعلق بالتجارب التريبولوجية المنجزة على جهاز الترييومتر من نوع ساق-قرص.

INTRODUCTION GENERALE

Les phénomènes de frottement et l'usure des matériaux sont des processus complexes et multidisciplinaires.

Il existe plusieurs applications dans le secteur industriel où le frottement et l'usure des surfaces antagonistes des éléments de la machine en contact dynamique jouent un rôle très important dans le comportement tribologique et la durée de vie du système mécanique. Le frottement et l'usure entraînent à la détérioration des surfaces opposées et peuvent être l'origine de l'invalidité de ce système. Les conséquences du frottement et l'usure sont liés à des facteurs physico-chimiques et mécaniques, tels que le type de contact entre les surfaces des corps, la nature des matériaux en contact dynamique, la charge appliquée durant le fonctionnement du système mécanique étudié, la vitesse de glissement et la dureté des surfaces de matériaux antagonistes. Il est bien indiqué que plusieurs recherches ont étudié l'effet de la dureté sur les mécanismes d'usure par glissement non lubrifié des aciers.

L'objectif de ce travail est l'étude de l'influence des paramètres mécaniques tels que la charge normale et la nuance des matériaux sur le comportement en frottement et en usure par glissement sec des couples de matériaux.

Pour ce faire, le mémoire est structuré en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les surfaces de contact des matériaux métalliques.

Dans le deuxième chapitre, on présente une recherche sur le frottement des couples de corps métalliques.

Le troisième chapitre s'agit de l'usure des surfaces des couples des matériaux métalliques.

Le quatrième chapitre est un recueil des résultats concernant des tests tribologiques de quelques chercheurs, en tenant compte exclusivement, l'influence de la charge normale appliquée sur un ensemble des couples de matériaux de différentes natures.

En fin, le mémoire se termine par une conclusion générale.

1.1 Introduction

Le mot tribologie a été proposé par Peter Jost [1] en 1966 et est basé sur le mot grec "trios" qui signifie frotter [1]. s'agit donc de la science du frottement. Son but est de regrouper sous une seule terminologie l'ensemble des sciences du frottement : Contact des surfaces ; Frottement ; Usure et lubrification.

Une définition plus précise de la tribologie est l'étude des interactions entre surfaces solides en mouvement relatif.

Si deux solides sont mis en contact sous l'action d'une force normale F , un contact des corps est une surface d'aire non-nulle.

1.2 Définition des surfaces solides

Une surface solide est l'interface entre un solide et un deuxième milieu qui peut être un autre solide, un gaz (l'atmosphère par exemple) ou un liquide (un lubrifiant par exemple). La figure 1.1 présente quelques exemples de surfaces.

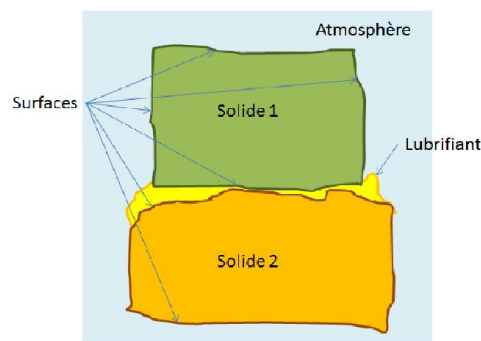


Figure 1.1: Surfaces des solides.

1.3 Structure d'une surface

Une surface tribologique n'est pas une séparation sans épaisseur entre un corps solide et le milieu ambiant. Elle possède également une épaisseur, qui s'étend de l'extérieur jusqu'à l'intérieur du solide [2]. En examinant les surfaces de matériaux métalliques, il est possible d'identifier différentes couches localisées plus ou moins profondément dans la matière [3]. La figure 1.2 présente une description des couches usuellement observées en surface :

1.3.1 Gaz adsorbés (0.3 à 3nm) :

Cette couche de contient des molécules de gaz, vapeur d'eau, oxygène qui ont été adsorbées par le solide. Les molécules sont maintenues en surface par les interactions de Van der Walis.

1.3.2 Couche d'oxyde (10 à 100 nm):

La plupart des métaux réagissent avec l'oxygène pour former une couche d'oxyde.

1.3.3 Couche de Beilby (1 à 100 nm) :

Dans cette couche, la structure cristalline est différente de celle présente au cœur matériau.

1.3.4 Couche déformée (1 à 100 μ m) :

La couche est soumise à des contraintes résiduelles résultant du procédé de fabrication.

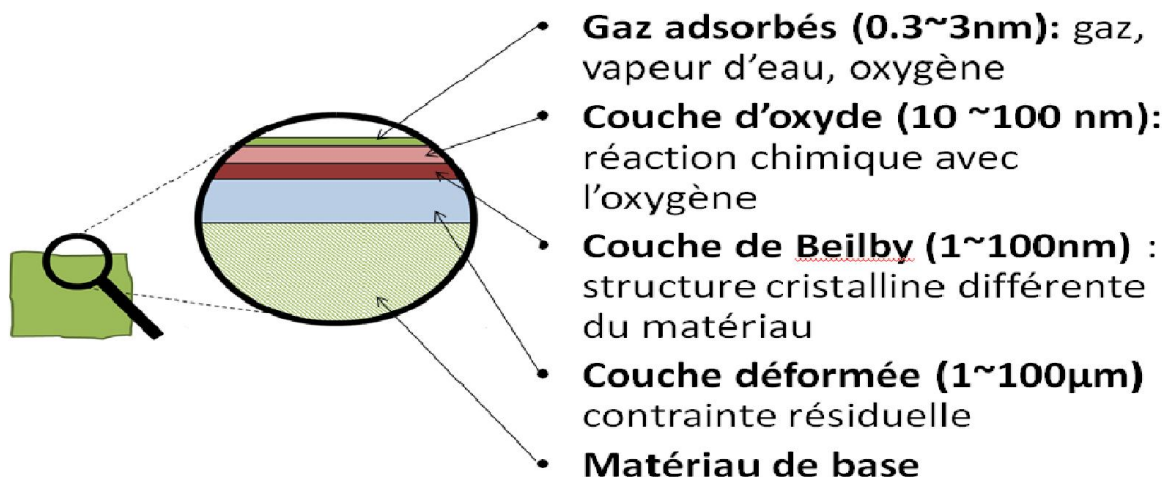


Figure 1.2 : Différentes couches en surface d'un solide métallique [3].

1.4 Profil de la surface

Ligne d'intersection d'une surface géométrique et d'un plan de coupe (figure 1.3). Le profil agrandi de la surface montre les défauts de la surface [4].

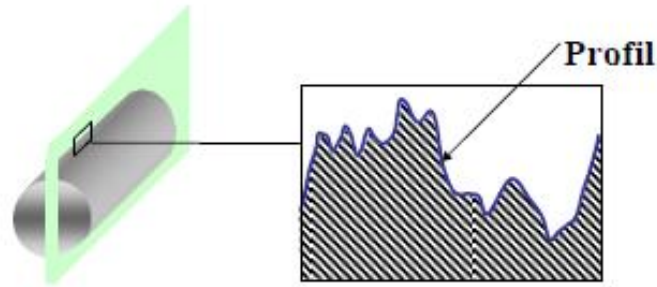


Figure 1.3 : Profil d'une surface.

En ramenant les facteurs d'amplification en x et y, les sommets du profil s'appellent crêtes ou aspérités et les fonds s'appellent creux (figure 1.4).



Figure 1.4 : Creux et crêtes du profil d'une surface.

1.5 Types de surface

1.5.1 Surface géométrique

C'est la surface parfaite, idéale. Sur le dessin, elle est définie géométriquement par le bureau d'études, à l'aide de cotes nominales.

1.5.2 Surface spécifiée

Elle résulte de la surface géométrique, transformée par le bureau des études qui prescrit des limites de réalisation de cette surface à l'aide de symboles et de valeurs numériques en complément des cotes nominales du dessin.

1.5.3 Surface réelle

C'est celle qui est obtenue au cours de la fabrication.

1.5.4 Surface mesurée

Elle résulte de l'exploration de la surface réelle par des instruments de mesure. Le degré d'approximation de la surface mesurée par rapport à la surface réelle dépend de la technique, de mesure appliquée, de la précision de l'instrument de mesure utilisé.

1.6 Quelques propriétés des surfaces

Nous présentons dans cette section quelques propriétés de surfaces qui jouent un rôle Fondamental en tribologie.

1.6.1 Caractérisation topographique des surfaces

La topographie des surfaces a une grande influence sur les propriétés d'un système tribologique. Elle couvre un large domaine allant du niveau micrométrique au niveau nanométrique.

Les surfaces sont caractérisées surtout par :

1.6.1.1 Ecart quadratique moyen du profil (R_q)

Valeur moyenne quadratique des écarts du profil par rapport à la ligne de référence des moindres carrés à l'intérieur de la longueur de base (figure 1. 5).

$$R_q = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2\right)} \quad (1.1)$$

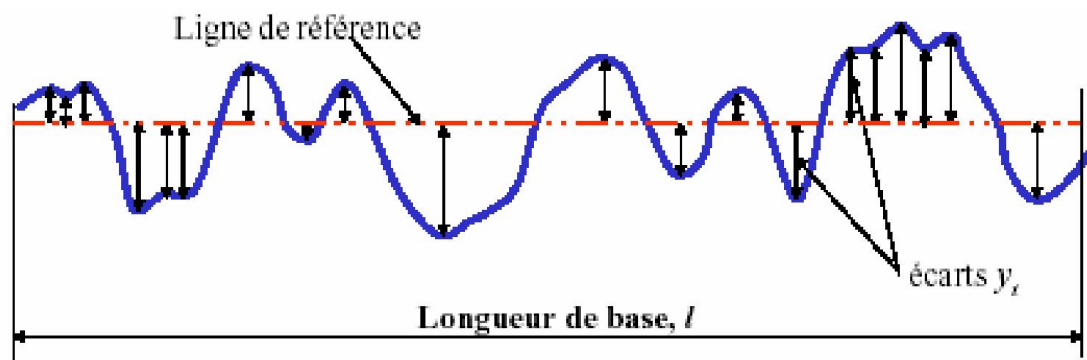


Figure 1. 5: Ecart quadratique moyen [2].

1.6.1.2 Ecart arithmétique moyen du profil (R_a)

Est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts du profil par rapport à la ligne de référence arithmétique à l'intérieur de la longueur de base (figure 1. 6).

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i| \quad (1.2)$$

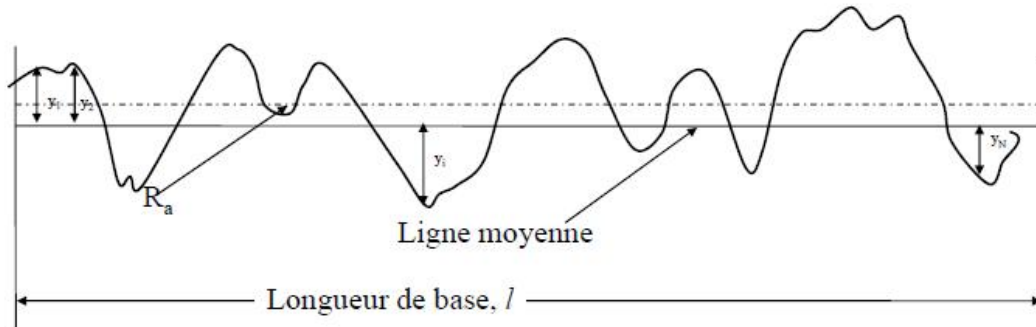


Figure 1.6 : Ecart arithmétique moyen du profil R_a [2].

1.6.2 Dureté des surfaces

La dureté caractérise la capacité d'un matériau (et donc de sa surface) à résister à la pénétration. Il existe plusieurs type d'essais qui se différencie par la forme du poinçon utilisé et la force appliquée : dureté Brinell avec une bille (HB), dureté Vickers avec une pyramide (HV), dureté Rockwell avec un cône (HRC) ou une bille (HRB). La dureté Vickers s'exprime à partir de la diagonale d de l'empreinte laissée :

$$HV \cong 1.89 \frac{F}{d} \quad (1.3)$$

On admet généralement que la dureté Vickers est liée à la limite élastique R_e :

$$0.3R_e \cong HV \quad (1.4)$$

En tribologie, on définit généralement la dureté H comme la pression moyenne de contact P_m conduisant à l'écoulement plastique du matériau. Dans le cas de la dureté Vickers, elle exprime en divisant la force d'indentation par la surface réelle de contact.

$$H = 2 \frac{F}{d^2} \cong \frac{2HV}{0.189} \cong 10HV \quad (1.5)$$

On en déduit la relation suivante entre la limite élastique R_e et la dureté H :

$$H = p_m \approx 3R_e \quad (1.6)$$

1.7 Contact entre surfaces

Le contact entre deux surfaces se fait par une série de 11points de contact et la somme de toutes ces aires donne l'aire réelle de contact. Cette aire réelle n'est qu'une petite fraction de l'aire nominale de contact, elle est fonction de la texture de surface, du chargement et des propriétés des matériaux.

Pour trouver des corrélations entre le frottement, l'usure et la rugosité de surface, l'aire de contact doit généralement être considérée.

1.7.1 Aires de contact réelle et apparente

À l'équilibre, sous l'action d'une force F , l'aire réelle de contact (A_r) est la somme des aires individuelles de contact A_i aux aspérités. Toutes les aspérités en contact sont alors en déformation plastique généralisée (figure 1. 7).

Aire apparente de contact : $A = a \times b$

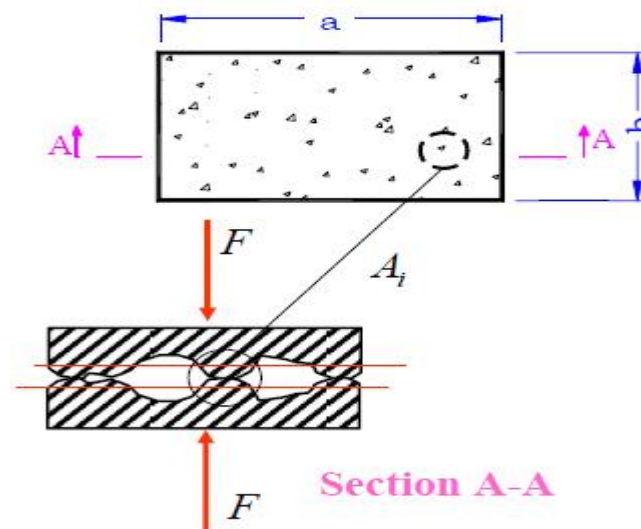


Figure 1.7 : Aires de contact réelle et apparente.

1.8 Mécanique du contact

La mécanique du contact décrit la déformation des corps en contact et des contraintes générées. Par nature du contact, on entend la définition générale de ce qui constitue le contact :

solide/solide, liquide/solide, liquide + particule/solide, liquide + vapeur/solide, etc. la géométrie du contact caractérise la forme générale des surfaces qui limitent les solides au voisinage de la zone de contact. On constate que l'ensemble de contacts que l'on rencontre peut se regrouper comme suit:

1.8.1 Contact localisé

Un contact est dit localisé lorsque la zone de contact est un point ou une ligne. Ce type de contact est très courant en mécanique (figure 1.8). On trouve des contacts ponctuels entre les billes et les bagues d'un roulement. Le contact entre une came et le poussoir d'une soupape de moteur se fait suivant une ligne.

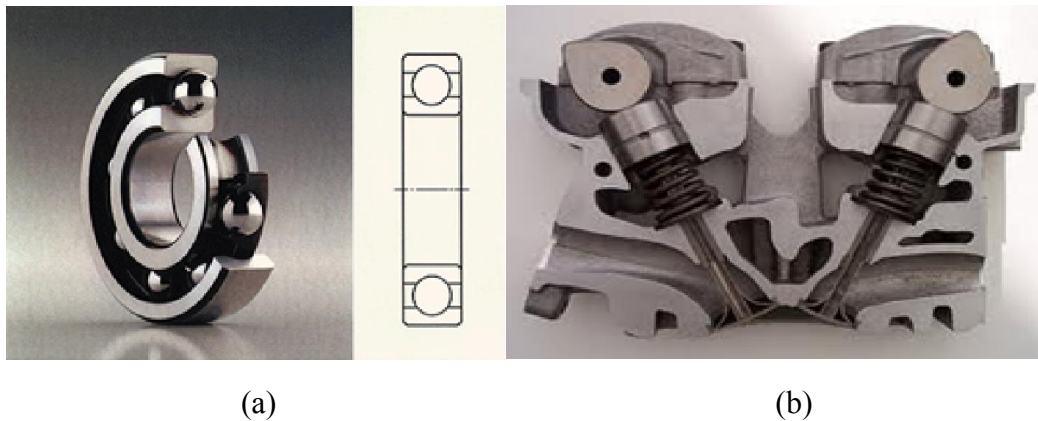


Figure 1.8 : Contacts localisés : a) Roulement à bille ; b) Came poussoir.

1.8.2 Contact élastique

En 1881, Heinrich Hertz a proposé une théorie, bien connue en mécanique du contact, Qui permet de calculer les caractéristiques d'un contact localisé élastique [6]. Les hypothèses utilisées sont les suivantes :

Les surfaces sont continues, lisses et non-conformes (c'est-à-dire que leurs rayons de courbure sont différents) ;

- Les déformations et les déplacements sont petits ;
- Chaque solide est un demi-espace infini élastique linéaire ;
- Le contact est sans frottement

Nous nous intéresserons uniquement au contact d'une sphère sur un plan comme cela est présenté sur la figure 1. 9.

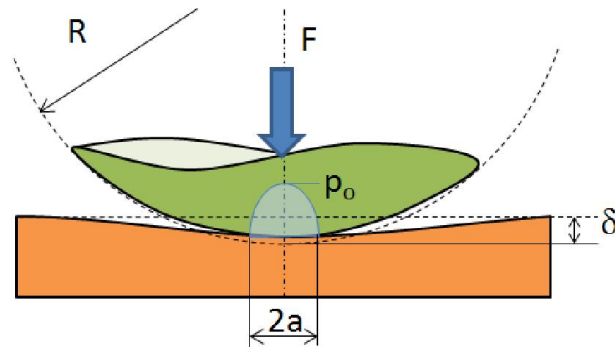


Figure 1.9 : Contact sphère-plan.

1.8.3 Contact extérieur entre deux sphères

Soit R_1 et R_2 le rayon de deux sphères (figure 1. 10), E_1 et E_2 les modules d'élasticité et ν_1 , ν_2 les coefficients de poisson de leur matériau.

Figure 1.10 : Contact extérieur de deux sphères.

La surface de contact est un cercle de rayon $a_i = \pi a^2$

$$a = \sqrt[3]{\frac{3N}{2E} \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)}} \quad (1.7)$$

Le module d'élasticité réduit :

$$E = 2 \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (1.8)$$

1.8.4 Contact extérieur de deux cylindres parallèles

La surface de contact est un rectangle de longueur L (longueur du cylindre le plus court) et de demi-largeur b (figure 1.11).

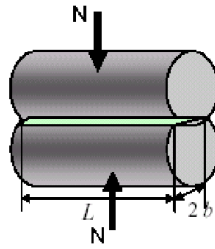


Figure 1.11 : Contact extérieur de deux cylindres parallèles [7].

$$b = \sqrt{\frac{8N}{\pi \cdot L E \frac{1}{R}}} \quad (1.9)$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

(1.10)

 R_1 et R_2 les rayons de deux cylindresL'aire de contact $A = 2bL$ (1.11)

1.8.5 Contact plan

Deux pièces conformes se touchent par une surface géométrique finie (figure 1.12) leur contact est dit surfacique. L'aire A contenue dans le contour de contact est appelée surface de contact. La force normale d'appui étant N , on définit la pression de contact [8].

$$P = \frac{N}{A} \quad (1.12)$$

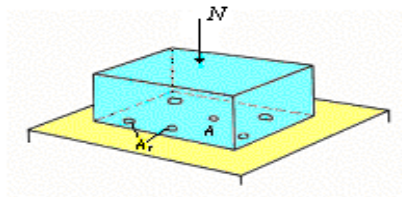


Figure 1.12 : Aire de contact.

2.1 Introduction

On peut considérer tous les aspects presque de nos vies sont affectés par les phénomènes de frottement, que ce soit de manières positive ou négative, telles que les opérations comme démarrer, arrêter, faire tourner une voiture, fixer des pièces, tenir un objet dans la main, écrire ...etc.

Le frottement désigne un ensemble de phénomènes et de mécanismes qui intervient au niveau de l'interface de deux corps en contact.

2.2 Définition du frottement

Le frottement peut être défini comme la résistance au mouvement qui se manifeste lors du déplacement relatif de deux surfaces en contact.

Les normes définissent 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 un autre [9].

Le frottement est un processus dissipatif et l'énergie peut se manifester sous des formes variées : déformation (élastique, plastique); rupture (fissuration, émission de débris), échauffement, réactions chimiques (adhésion, oxydation), phénomènes acoustiques (vibrations, bruits), électricité statique, étincelles [10].

2.3 Phénomène de frottement

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 2.1, nous considérons un mouvement rectiligne.

Quel que soit le matériau d'un solide, sa surface n'est pas parfaitement lisse, elle est rugueuse, comportant des irrégularités dues à l'usinage de la pièce ou même à sa nature.

Lorsque deux pièces mécaniques en contact se déplacent l'une par rapport à l'autre, ces aspérités se déforment 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 pouvant aller jusqu'à arracher de la matière [11].

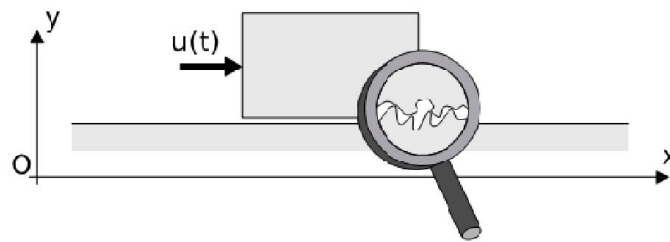


Figure 2.1 : Solide sur un support horizontal.

2.4 Force et coefficient de frottement

Soit deux corps en contact et F la force normale entre eux (figure 2.2). L'expérience montre qu'on peut appliquer à la pièce (2) une force T parallèle à la surface de contact sans qu'elle se mette en mouvement. Il existe donc une force F^- appliquée par le corps (1) à la pièce (2) capable de s'opposer à T et d'empêcher le mouvement [12].

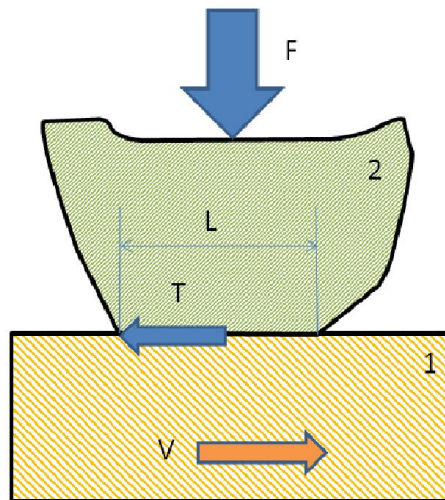


Figure 2.2 : Force de frottement [10].

Lorsque la vitesse de glissement V est différente de zéro, on parle de frottement dynamique.

Lorsque la vitesse de glissement V est nulle, on parle de frottement statique. Nous nous intéresserons principalement au cas du frottement dynamique.

Par définition, le coefficient de frottement μ est le rapport de la force tangentielle de frottement, lorsque les pièces glissent, à la force normale appliquée au point de contact entre les deux corps.

$$\mu = T/N \quad (2.1)$$

2.5 Types de frottement

2.5.1 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. Holm en 1938, montra que les aspérités en contact se déforment plastiquement et peuvent se souder, ainsi la force de frottement est directement reliée aux contraintes de cisaillement des jonctions formées.

Le modèle de Bowden et Tabor [13] suppose que le frottement sec entre deux surfaces rugueuses est dû essentiellement à deux processus physiques fondamentaux :

le cisaillement des micro-jonctions adhésives formées au niveau des points de contact et le labourage des surfaces par les aspérités. La force du frottement sec est ainsi la somme d'une force de cisaillement due à l'adhésion et d'une force de déformation due au labourage [14.15].

$$F_t = F_{ad} + F_{def} \quad (2.2)$$

2.5.2 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 (figure 2.3). Le coefficient de frottement est faible et ce type de frottement est indiqué pour l'utilisation à haute vitesse ou lorsque la force normale est élevée [16].

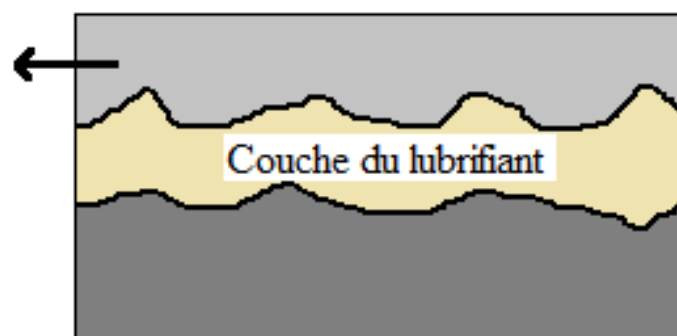


Figure 2.3. : Frottement hydrodynamique.

2.5.3 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 (figure

2.4). 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 [17].

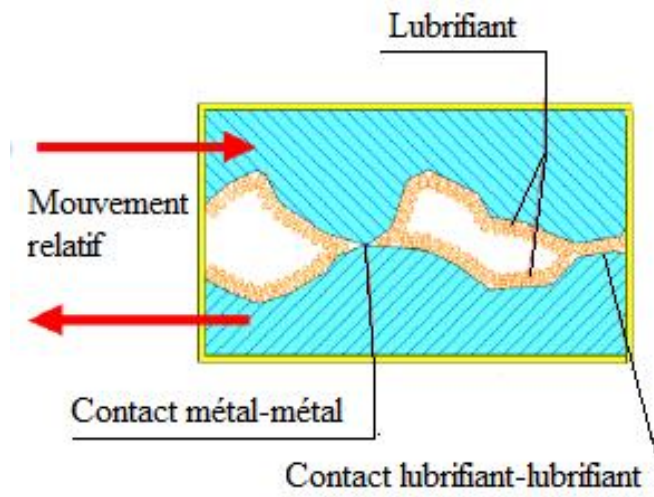


Figure 2.4. : Frottement onctueux.

2.5.4 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 $A_r \ll A_a$, comme l'indique la figure 2.5 [18], [19].

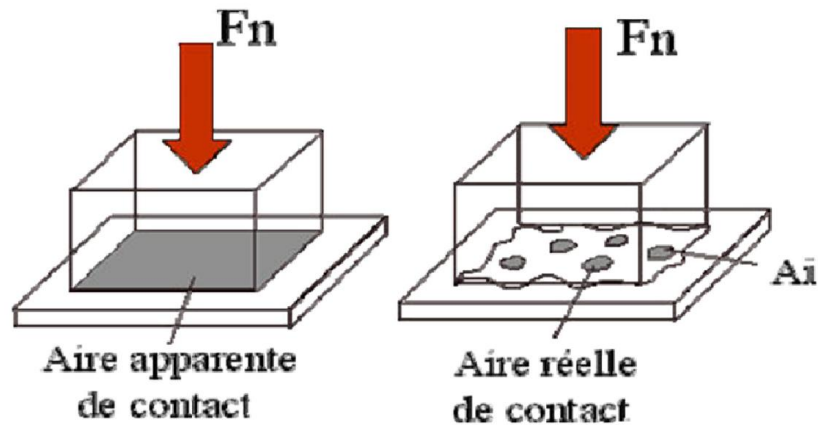


Figure 2.5. : Aires de contact réelle et apparente.

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

$$N = P_r \cdot A_r \quad (2.3)$$

P_r : Pression de contact.

La force de cisaillement du film :

$$T = \tau_f \cdot A_r \quad (2.4)$$

τ_f : Contrainte de cisaillement du matériau le moins résistant.

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

$$N = A_r \cdot H \quad (2.5)$$

Le coefficient de frottement.

$$\mu = \frac{T}{N} = \frac{\tau_f \cdot A_r}{A_r \cdot H} = \frac{\tau_f}{H} \quad (2.6)$$

2.5.5 Frottement de roulement

Le frottement de roulement se produit lorsqu'un cylindre ou sphère roule sur une surface plane ou moins courbée. On note que ce type de frottement peut être rencontré dans les roulements à billes ou à rouleaux [20].

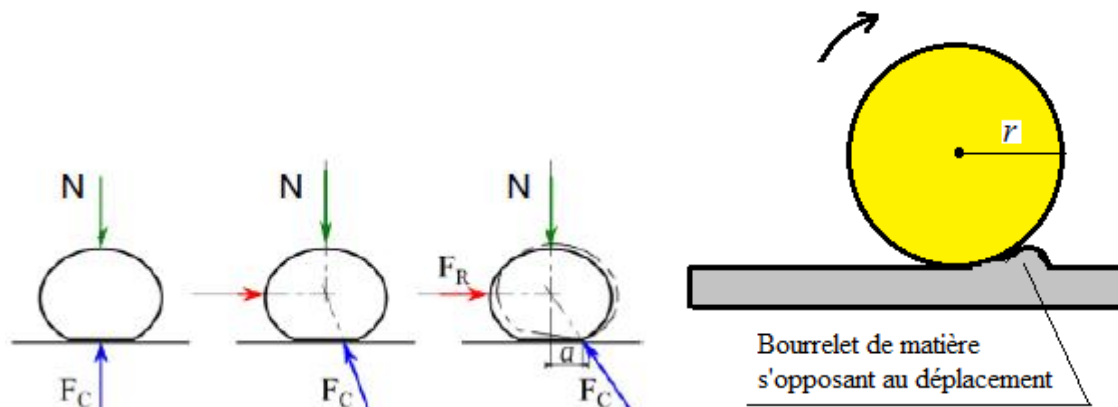


Figure 2.6: Frottement de roulement

On constate que, pour vaincre le frottement de roulement, il est nécessaire de développer moins de force que vaincre le frottement de glissement. Pour faire rouler une sphère, il est nécessaire d'appliquer au centre de cette dernière qui supporte une charge N , une force parallèle au plan sur laquelle repose. La charge N et la force F dépendent l'un de l'autre.

L'aire de contact est montrée sur la figure 2.6 un micro-glissement se fait au niveau de cette surface.

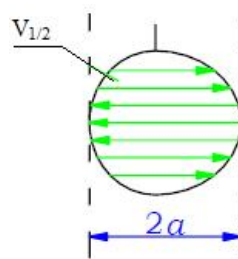


Figure 2.7 : Aire de contact.

2.6 Mécanismes du frottement de glissement sec

Adhérence

On observe que deux matériaux dont les surfaces sont absolument pures adhèrent l'un à l'autre dans le vide, il faut une certaine force de traction pour les séparer. Il existe des liaisons appelées jonctions. 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 (fonctions adhésives) [21].

Autrement dit, une création de lien ioniques, covalents ou de Vander Walls entre les molécules des matériaux de base lorsque les films de surface sont pénétrés.

Les jonctions en état de déformation élastique se séparent naturellement lorsque la charge normale diminue, seulement les jonctions plastiques peuvent rester liées.

- Les surfaces sont toujours polluées par des oxydes (figure 2.7), de la vapeur d'eau adsorbée, par des résidus d'outil et d'huile de coupe. Cette contamination empêche l'adhérence.

La force d'adhérence correspond à la force nécessaire à la séparation des corps.

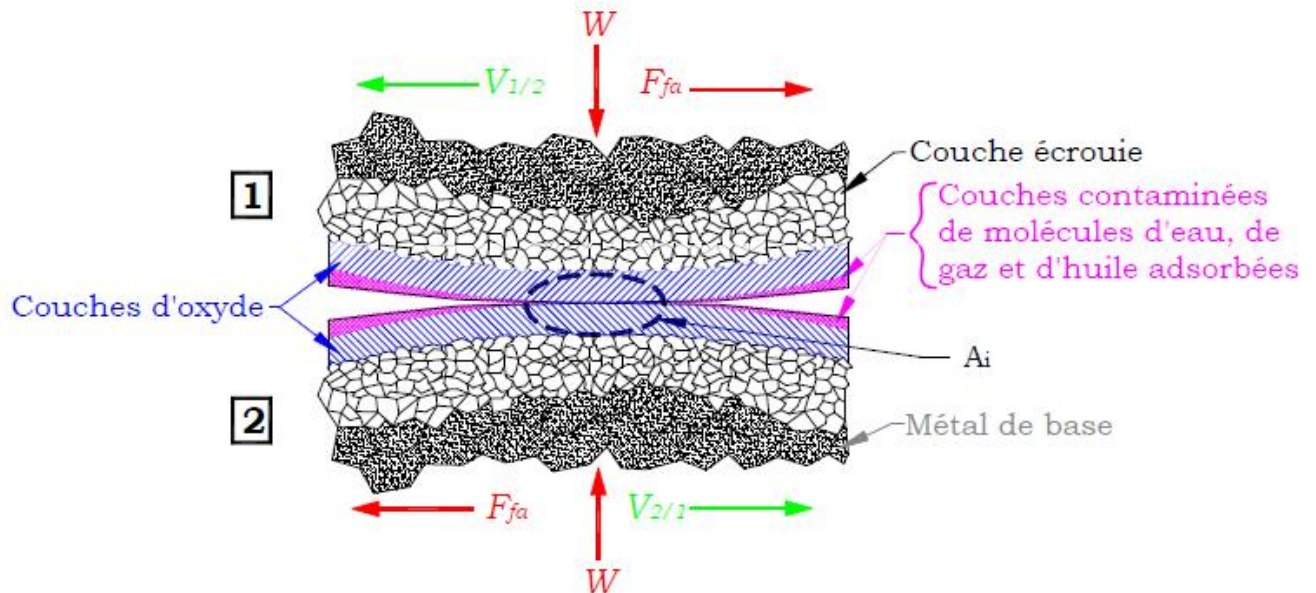


Figure 2.8 : Mécanisme d'adhérence

2.7 Labourage

Les aspérités du matériau le plus dur pénètrent dans le matériau le plus mou.

Une aspérité dure chargée par une force normale W s'enfonce dans une surface tendre (figure 2.8). 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. Au début du glissement, la matière de la base est repoussée et forme devant l'aspérité le bourrelet frontal, l'aspérité remonte au-dessus de sa position initiale.

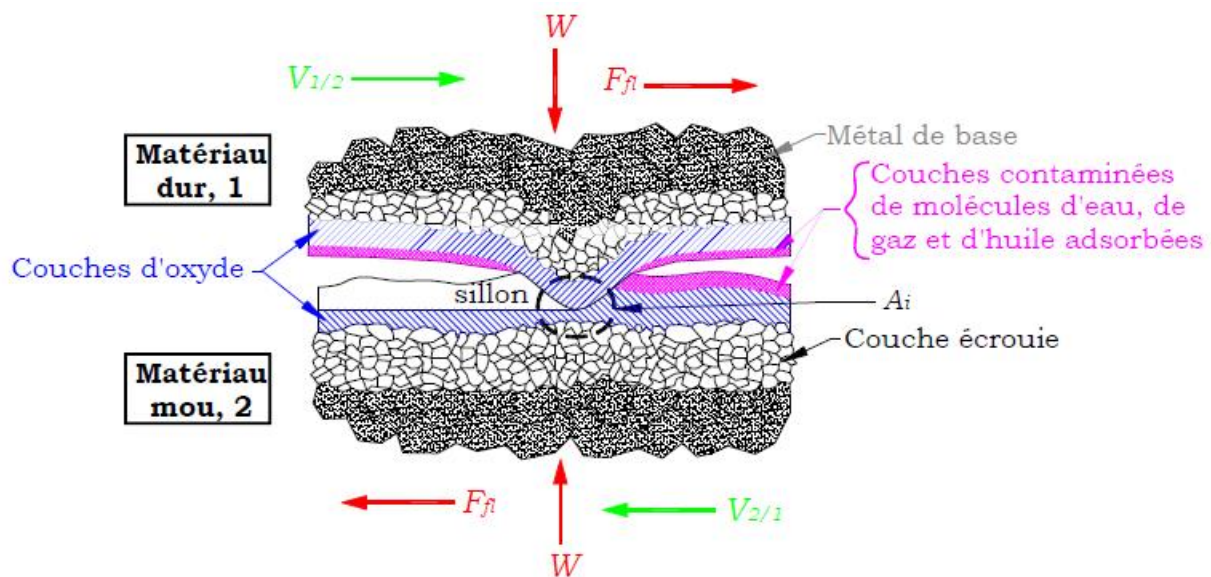


Figure 2.9. : Labourage d'une surface tendre par une aspérité dure.

Le contact s'opère par les aspérités les plus grosses qui labourent la surface tendre en creusant de larges sillons (Fig. 2.10a).

Après une certaine distance de glissement, des débris d'usure enfermés entre les corps s'incruster dans la surface la plus tendre (Fig. 2.10b). Ces débris sont souvent très durs parce qu'ils sont formés de matière fortement écrouie et parfois auto trempée, si c'est de l'acier. Ils agissent comme de grosses aspérités et raient la surface opposée [22].

Le coefficient de frottement de labourage dépend du rapport de la résistance au cisaillement de la surface rayée à sa dureté et de l'inclinaison des flancs des aspérités [23].

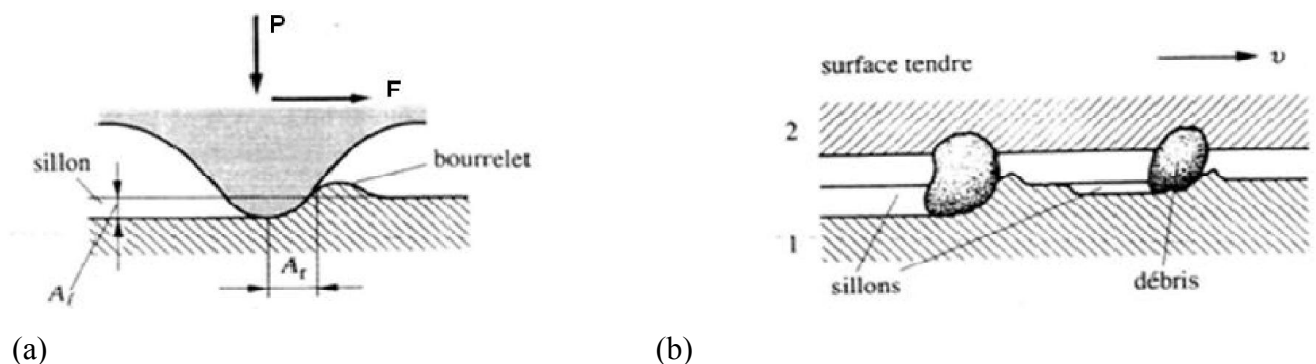


Figure 2.10 (a) Sillon de labourage par bourrelet frontal ; (b) Labourage par des débris d'usure [37].

3.1 Introduction

L'usure est une conséquence du frottement, et se produit au niveau de la zone de contact. Elle est un problème difficile, souvent conduit à la perte de matière ou de fonction d'un mécanisme suite à une détérioration. Elle est généralement dommageable, mais peut aussi être bénéfique, par exemple lors du rodage, l'affûtage de l'outil, la finition d'une surface par rectification, l'écriture à l'aide de la craie sur le tableau ou du crayon sur le papier.

3.2 Définition de l'usure

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 et à l'endommagement de surfaces[24].

Il n'existe pas d'unité standard de l'usure : l'unité la plus souvent utilisée est le taux d'usure généralement exprimé par la masse perdue rapportée à la distance parcourue ou à la surface de contact. Ce taux d'usure peut être inadapté dans plusieurs cas à cause de la diversité des mécanismes, des sollicitations et des mécanismes de dégradation.

3.3 Facteurs de l'usure

3.3.1 Mode de contact

Suivant la forme géométrique des pièces avant utilisation, on distingue les contacts ponctuels (exemple : sphère sur plan), les contacts linéaires (exemple : cylindre mâle dans cylindre femelle) les contacts surfaciques (exemple : plan sur plan) (figure 3. 1).

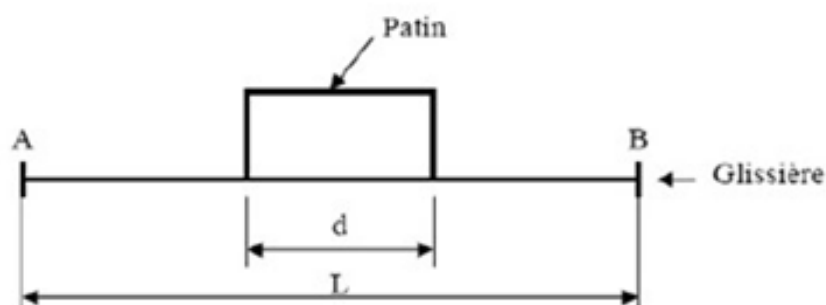


Figure 3.1 : Schéma d'un patin plan glissant sur une glissière plane.

3.3.2 Charge de contact

C'est la résultante P des projections sur la normale en chaque point de contact des actions de contact. Elle est de petit ordre dans certains mécanismes horlogers, mais peut atteindre des grandes valeurs dans le cas de certains éléments de l'industrie lourdes. La charge de contact a une influence sur les mécanismes et le taux d'usure. Avec l'augmentation de la charge appliquée, le film d'oxyde se développe et joue un rôle critique dans le contact glissant.

3.3.3 Vitesse relative entre les pièces

Il s'agit, suivant le cas, des vitesses de glissement, de roulement. Dans le cas du glissement à sec, elle influe surtout sur la température superficielle des pièces en contact, et dans le cas du glissement lubrifié, elle est un facteur important d'établissement du régime hydrodynamique. La vitesse peut être de l'ordre de quelques microns par seconde lorsque les supports des machines se déplacent sous l'effet des dilatations thermiques ou bien atteindre plusieurs centaines de mètres par seconde dans le cas de projectiles se déplaçant sur leurs guides.

3.3.4 Etat des surfaces flottantes (rugosité)

Nous avons vu précédemment que les surfaces métalliques comportent toujours des aspérités, même si elles sont soigneusement usinées. L'une des conséquences de ces défauts géométriques est que l'aire réelle de contact n'est souvent qu'une faible fraction de l'aire apparente de contact.

L'état micro géométrique des surfaces ou rugosité influe sur l'étendue de l'aire réelle de contact et le taux d'usure. Pendant la période de rodage, la rugosité est importante, ce qui conduit à un taux d'usure élevé. Quand on atteint le régime de fonctionnement normal, la rugosité est beaucoup moins élevée et on a un taux d'usure faible.

3.3.5 Propriétés mécaniques des matériaux (dureté)

Le taux d'usure diminue généralement lorsque la dureté des surfaces antagonistes des couples de matériaux augmente.

3.3.6 Absence ou présence d'un lubrifiant

Le frottement à sec augmente l'usure, par contre, l'existence de lubrification va la diminuer.

3.3.7 Matériaux

Bien que les caractéristiques de frottement ne soient pas une propriété intrinsèque des matériaux, ceux-ci peuvent intervenir d'une manière décisive dans le comportement général du système tant par leurs propriétés mécaniques que physicochimiques [25].

3.4 Mécanismes d'usure

Une liste non exhaustive de mécanismes d'usure peut être dressée. Ces phénomènes repérés dans des cas différents de contacts, peuvent en théorie s'appliquer tous en même temps, certains étant prépondérants par rapport à d'autres en fonction des conditions imposées.

3.4.1 Usure adhésive

Elle 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 physicochimique (figure 3.2). Pour le transfert mécanique, plusieurs hypothèses ont été développées.



Figure 3.2: Tourillon avec diverses traces d'usure.

Les micro-aspérités présentées 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). Lors du frottement, il existe entre les matériaux antagonistes une multitude de microcontacts qui supportent l'ensemble de la charge normale. En effet, dans ces régions, une constriction des lignes de forces engendre des concentrations de contraintes et l'augmentation de la température (températures flashes). L'évolution de ces aspérités dépend des conditions de sollicitations et de l'environnement. Un équilibre est atteint dès que l'adhérence des films de transfert est supérieure à la force de frottement. Sinon, les contraintes de cisaillement générées provoquent la rupture à l'interface surface/film transféré et forme des débris.

La figure 3.3 montre un tourillon qui porte diverses traces d'usure. À gauche, on trouve des stries continues probablement dues à un phénomène d'abrasion. À droite, les stries sont beaucoup plus chaotiques, avec des traces d'arrachements caractéristiques de l'usure adhésive. Les débris ont un effet de séparation des antagonistes, supportent les pressions. L'usure et le coefficient de frottement deviennent moindres [26].

3.4.1.1 Quantification de l'usure adhésive

Le premier travail sur l'usure daté du 19^{ème} siècle. Il concernait la perte de poids de pièces de monnaie anglaises. Certains auteurs ont cherché à relier le taux d'usure adhésive aux différents paramètres qui interviennent dans le frottement. C'est ainsi que J.F. Archard, émettant le premier, l'idée d'une certaine probabilité pour qu'une particule d'usure puisse se former à partir de la jonction entre deux aspérités. Proposé l'expression :

$$V = a K/3. NL/H \quad (3.1)$$

V : Taux d'usure adhésive ou le volume arraché [mm^3]. a : Coefficient caractérisant le type de frottement : $a = 1$ Pour le frottement sec ou à très faible vitesse. $a < 1$ Pour le frottement lubrifié.

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 [26].

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

3.4.2 Usure abrasive

Elle se caractérise par la présence dans le contact d'un état de surface rugueux ou par pénétration dans le matériau le plus tendre de particules dures provenant des débris d'usure du contact ou de la pollution du milieu. Ce mécanisme de dégradation qui fait intervenir dans les premiers instants uniquement les corps antagonistes, devient rapidement une usure à trois corps (figure 3.2a). Cette forme d'usure se manifeste par des polissages, des griffures, des

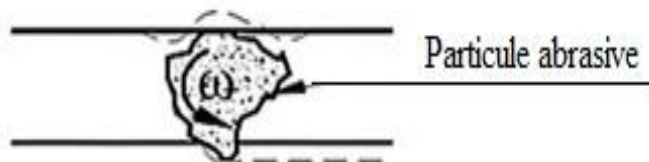
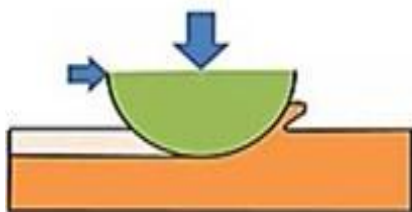
micro-labourages, des arrachements de particules. Le micro-labourage (ou micro-usinage) se manifeste par des rayures à la surface du matériau le plus tendre sans arrachement de matière mais provoquant sur les bords du sillon une déformation plastique. Pour lutter contre l'usure abrasive, on cherche souvent à durcir les matériaux (au moins leur surface) [27].

On doit différencier le labourage (déplacement de matière et formation de bourrelets), prédominant pour les matériaux ductiles, de la coupe (enlèvement de matière), repérée surtout pour des matériaux fragiles.

On distingue l'usure abrasive par l'enlèvement de matière à l'interface, on parle aussi d'abrasion à deux corps et à trois corps (figure 3.3b).



(a)



(b)

Figure.3.3 : a) Etat de surface présentant une usure par abrasion ; b) Mécanisme d'usure par abrasion [28]

3.4.2.1 Types d'usure abrasive

L'usure peut se faire à deux corps, directement à partir des solides en contact ou bien à trois corps, on distingue :

- L'abrasion à deux corps
- L'abrasion à trois corps fermés
- L'abrasion à trois corps ouverts

Pendant l'usure abrasive on a le déplacement de matière. Produite par des particules dures un corps dur déforme plastiquement avec ou sans enlèvement de matière un corps plus mou. On peut distinguer :

3.4.2.1.1. Usure abrasive à deux corps

L'usure abrasive à deux corps (figure 3.4) est un processus d'usure par déplacement et/ou enlèvement de matière de la surface frottant d'une pièce mécanique sous l'action d'aspérités dures fixes. Une aspérité de la surface la plus dure raye la surface la plus tendre. Les sillons sont formés parallèlement à la direction de déplacement des aspérités abrasives.

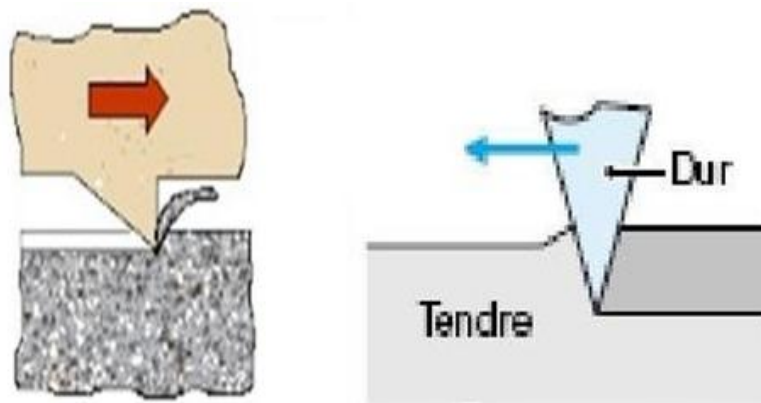


Figure 3.4 : Usure abrasive à deux corps.

3.4.2.1.1.1 Usure abrasive à trois corps

3.4.2.1.1.2 Abrasion à trois corps fermés

L'usure abrasive à trois corps fermés est générée lorsqu'on frotte deux surfaces avec interposition d'abrasifs libres (figure 3.5). Dans les configurations d'abrasion à trois corps, il faut distinguer deux cas :

La distance entre les surfaces est du même ordre de grandeur que la dimension des grains abrasifs.

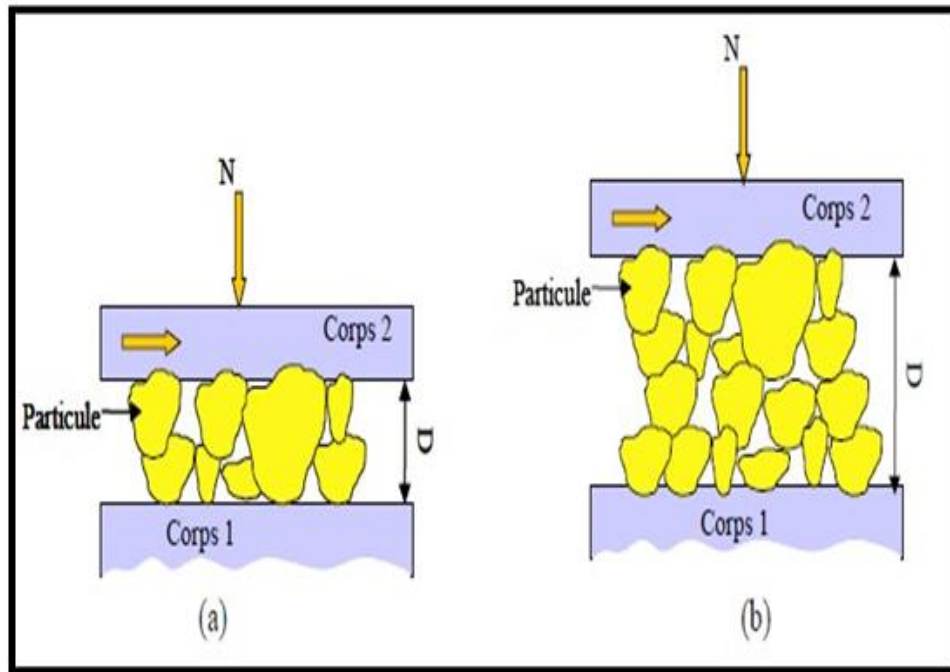


Figure 3.5 : Abrasion à trois corps fermés.

3.4.2.1.1.3 Abrasion à trois corps ouverts

Dans le cas de l'abrasion à trois corps, si une seule surface intervient dans le processus de frottement, on parle d'usure abrasive à trois corps ouverts (Fig.3.6). Ce type de configuration est souvent rencontré dans le cas de matériaux granulaires en contact avec un solide.

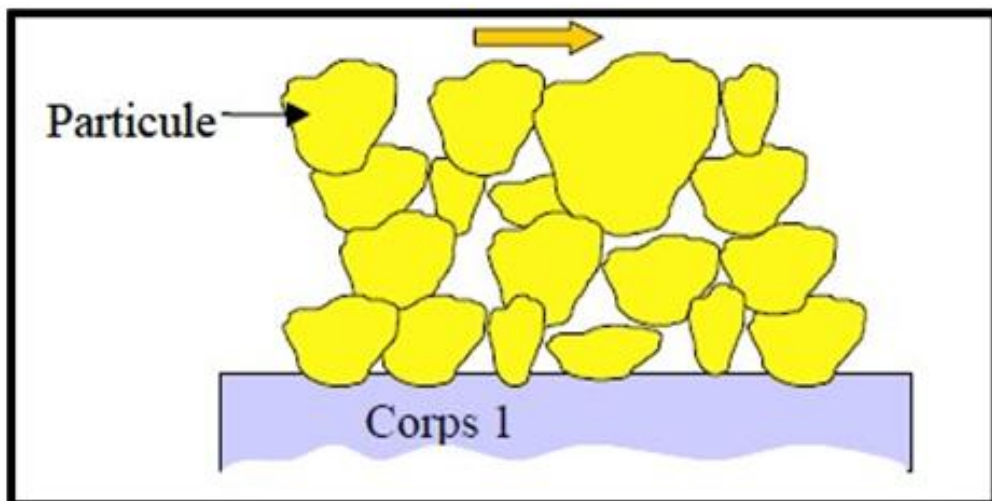


Figure 3.6 : Abrasion à trois corps ouverts.

3.4.2.2 Quantification de l'usure abrasive

Une loi généralisée d'usure par abrasion a été proposée sous la forme suivante [29] :

$$V = \frac{kfL}{3H} \quad (3.2)$$

Avec

$$K' = \left[\frac{K}{H} \right] \quad (3.3)$$

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 légal 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

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:

$$\frac{dV}{dl} = K_{abr} \frac{N}{H} \quad (3.4)$$

$\frac{dV}{dl}$: 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 (3.4) 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.

4.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'influence de la charge normale appliquée sur le comportement en frottement et usure des couples métalliques tournants. Les tests tribologiques étudiés ont été réalisés à sec et à l'air ambiant.

Les résultats que nous présentons ultérieurement, sont des travaux déjà réalisés par des chercheurs. Nous allons faire une comparaison entre les résultats obtenus, pour aboutir enfin à des conclusions qui synthétisent notre étude.

4.2 Effet de la charge normale sur le coefficient de frottement

Mouadji [30] a réalisé ses tests tribologiques à l'aide d'un tribomètre de type pion-disque (figure 4.1). 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.

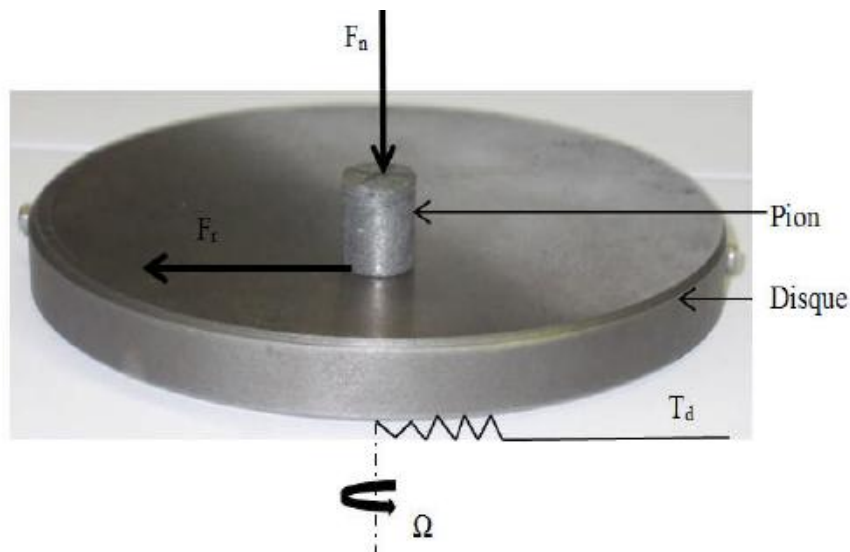


Figure 4.1: Couple pion-disque.

Les caractéristiques mécaniques de ces trois matériaux sont citées dans le tableau 4.1

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

Tableau I.1. Caractéristiques des matériaux.

Les coefficients de frottement des différentes couples ont été enregistrés avec les conditions suivantes : Chaque test a duré trente minutes et une vitesse de glissement 1m/s et des charges appliquées varient entre 5N et 30 N. La figure 4.2 montre l'évolution du coefficient de frottement des couples des matériaux frottant en fonction de la charge appliquée.

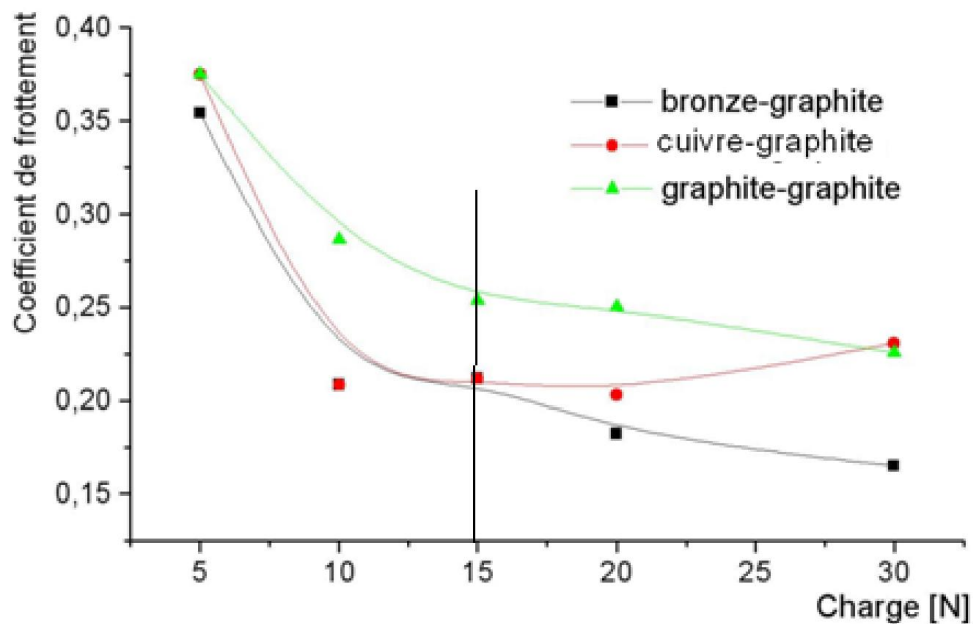


Figure 4.2 : Evolution du coefficient de frottement en fonction des matériaux frottant en fonction de la charge appliquée.

La figure 4.2 indique que le coefficient de frottement diminue en fonction de la charge normale pour tous les couples étudiés. Nous constatons aussi que, dans le cas du couple bronze-graphite le coefficient de frottement tend vers la valeur de $\mu = 0,17$. Dans le cas du

couple cuivre-graphite, μ se stabilise autour de 0,21 et enfin pour le couple graphite-graphite, μ est autour de 0,23.

L'augmentation de la charge conduit à une réduction significative du coefficient de frottement, le pion comprime la matière et l'oblige à s'écouler vers les cotés, sous forme des bourrelets, comme indique la figure 4.3, ce qui facilite son déplacement.

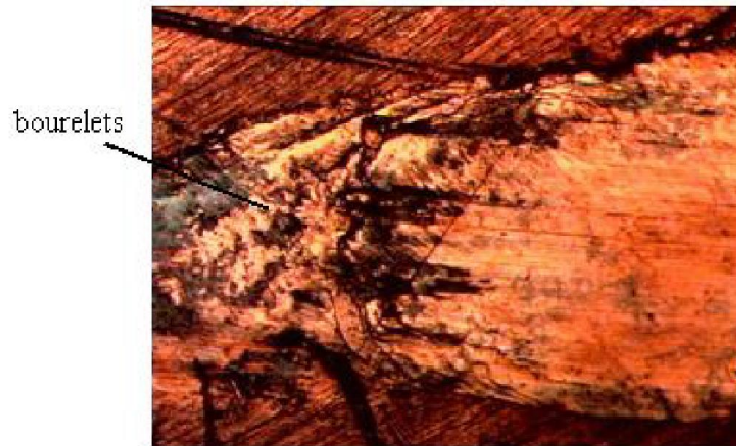


Figure 4.3 : Image obtenue par microscope optique de la surface usée du pion dans un contact cuivre-graphite ($P = 20$ N).

4.3 Effet de la charge normale sur l'usure

L'évolution du taux d'usure en fonction de la charge est représentée graphiquement par la figure 4.4. Sous faible charge, le volume usé est sensiblement proportionnel à la charge ou l'usure croît considérablement pour les couples cuivre-graphite et graphite-graphite. Pour le couple bronze-graphite, l'usure augmente presque linéairement en fonction de la charge, alors que pour le couple cuivre-graphite l'usure est assez importante, dans sa valeur moyenne, pour de faibles charges par rapport aux autres couples, contrairement au couple graphite-graphite dont l'usure de ce dernier est assez faible même après l'augmentation de la charge, ce qui le favorise des autres couples.

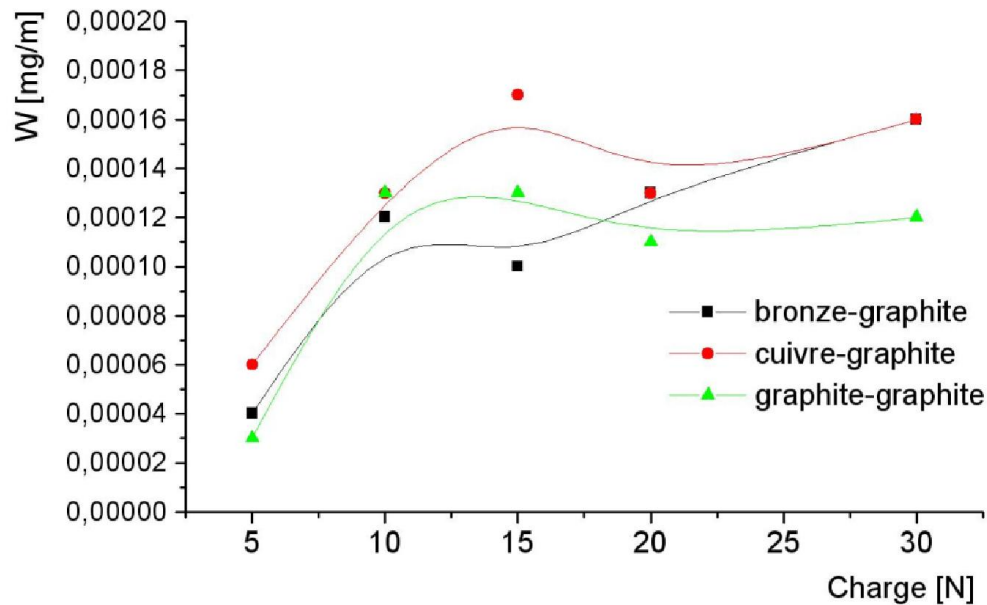


Figure 4.4. Evolution du taux d'usure en fonction de la charge des trois couples pour $V = 1 \text{ m/s}$.

L'accroissement de la charge normale, engendre une augmentation de l'aire réelle de contact. Nous supposons que dans le cas du contact cuivre-graphite, les particules formées qui sont d'une taille importante participent à la destruction de la surface du pion et provoquent une augmentation de l'usure (figure. 4.5a). Dans le cas du contact bronze-graphite des débris naissent. Ecrouis, broyés, oxydée, s'agglomèrent et recouvrent la surface, provoquant une usure de plus en plus intense

(figure 4.5(b)). L'augmentation de la charge, dans le cas du contact graphite-graphite, provoque la destruction de la surface par les transformations sous l'effet des échauffements superficiels (figure. 4.5b).

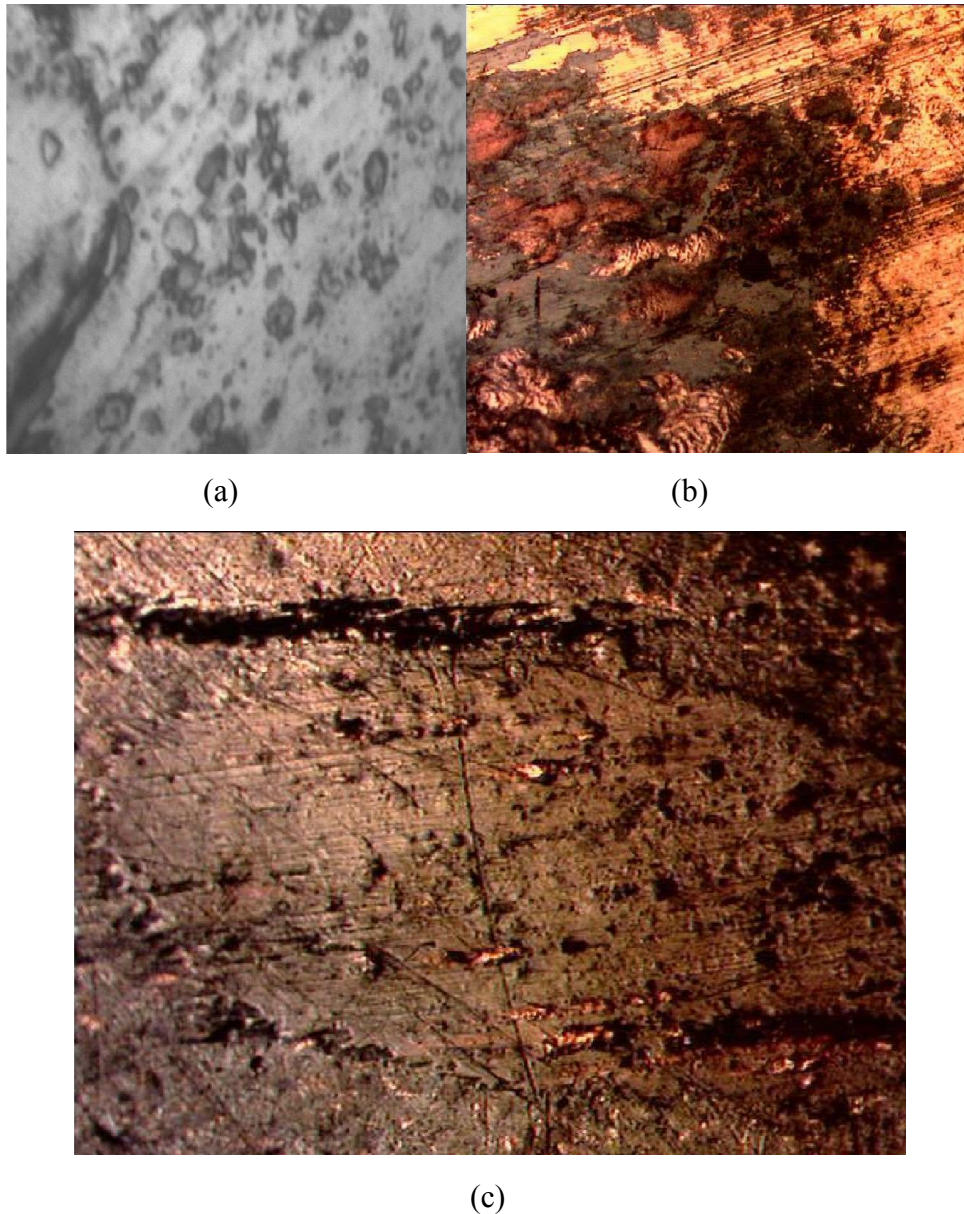


Figure 4.5. Image obtenue par microscope optique de la surface usée du pion, (a) contact cuivre-graphite, (b) contact bronze-graphite, (c) contact graphite-graphite.

N. Khanafi et al [31] ont étudié les mécanismes de frottement et de l'usure de l'acier 25CrMo4 utilisé comme pion, la surface de contact est un tronc de cône avec un demi-angle $\alpha = 45^\circ$ et une surface plate d'un diamètre initial 2mm glissant sur du carbure de tungstène cimenté. Les paramètres pris en compte sont : la charge normale P (de 500 à 1500 N), la structure de l'acier 25CrMo4 est normalisé (Normalised steel) de dureté : 220 HV et trempé et revenu (quenched/tempered steel) de dureté 480 HV), la vitesse V de glissement 0.1 m / s, la durée nominale de l'essai 15 min pour une vitesse de glissement $v = 0,1$ m / s correspondant à une distance de glissement $L = 90$ m et le frottement est effectué avec lubrification. Le

lubrifiant Deltaforge Acheson (non dilué), ce lubrifiant est utilisé dans le forgeage à chaud de l'acier; il produit un solide blanc film de l'évaporation de ses phase.

4.4 Evolution du coefficient de frottement avec la force normale

La valeur moyenne du coefficient de frottement est d'environ 0,2 pour les deux états structuraux dans la gamme de la force normale utilisée (figure 4.6). La loi de Coulomb est donc bien vérifiée. Considérant qu'il ya une dispersion autour de cette valeur moyenne pour l'état normalisé, nous remarquons qu'il n'est que légèrement dispersé et ne dépend pas de manière significative en fonction de la force normale.

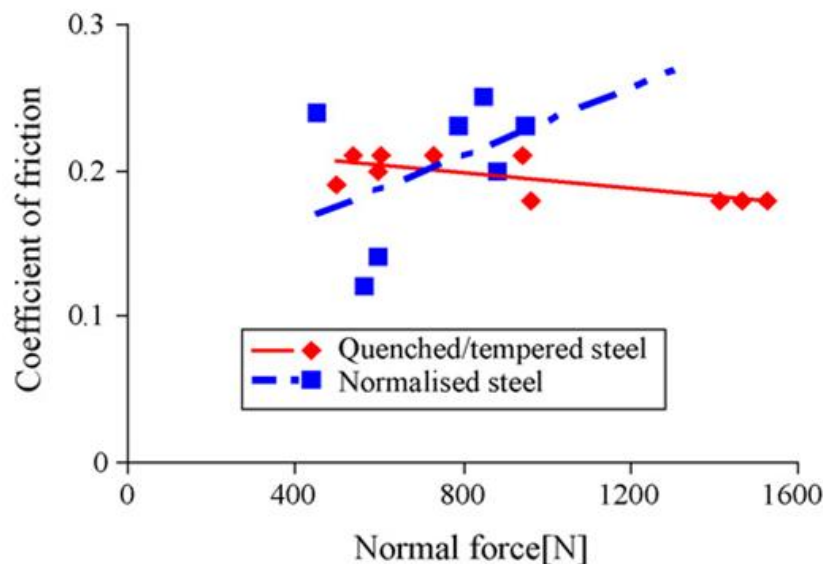


Figure 4.6. : Evolution du coefficient de frottement avec la force normale ($V = 0,1$ m/s)

4.5 Variation de l'usure en fonction de la force normale

La figure 4.7 montre qu'il y a une certaine stabilité entre la variation du taux d'usure et l'augmentation de la charge normale appliquée. Par contre, on remarque que, le taux d'usure diminue si la dureté augmente (le cas de l'acier quenched/tempered steel).

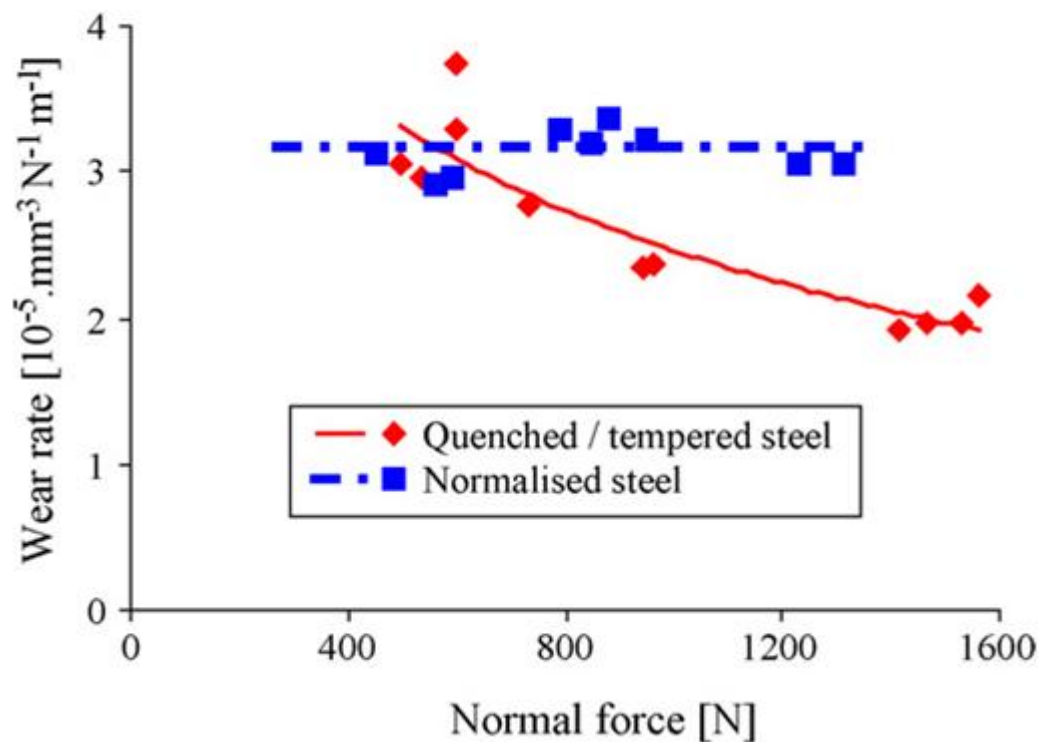


Figure 4.7 : Variation de l'usure en fonction de la force normale

L'augmentation de la résistance à l'usure avec l'accroissement de la dureté est basée sur la microstructure des aciers et le pourcentage de cémentite. Les structures martensitiques obtenues après traitement thermique (trempe et revenu) des aciers montrent que, plus les grains de l'acier sont fins plus la dureté augmente. La résistance à l'usure croît proportionnellement avec la teneur en cémentite.

Le travail de Mekroud [32] a visé l'étude tribologique des couples de matériaux sur un tribomètre Pion-disque. Ces couples sont : Le disque et le pion sont usinés à partir de l'acier C 45, il est beaucoup utilisé dans le domaine industriel tels que la machinerie, les axes de rotation, la partie de connexion, les engrenages [33].

Les conditions de réalisation des expériences sur le tribomètre sont les suivantes:

- Charge normale appliquée : De 60 à 240N, vitesse relative de glissement : 0,38 m/s, durée du test : 30 min, rayon du pion 5mm, rayon de la piste de contact sur le disque : 100 mm. Les duretés du matériau sont comme C45 : 203HV.

L'influence de la charge normale appliquée sur le coefficient de frottement du couple C45/C45 est donnée sur la figure 4.8

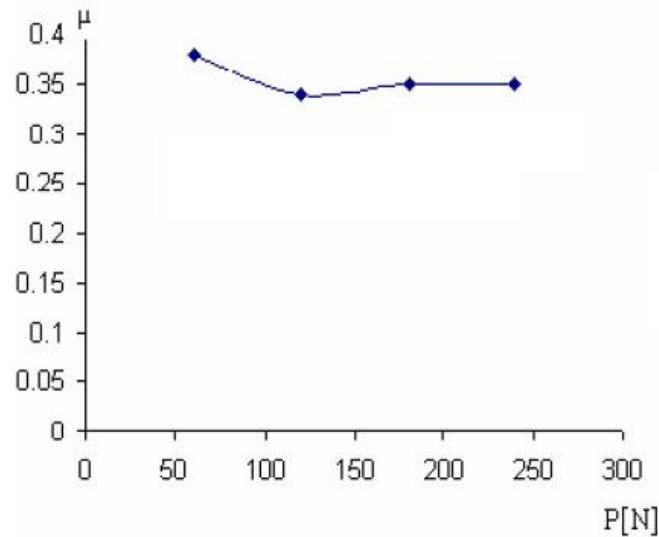


Figure 4.8 : Influence de la charge normale appliquée sur le coefficient de frottement du couple C45/C45.

On remarque que la valeur diminue avec une légère variation avec l'accroissement de la charge. L'augmentation de la charge normale, peut produire un film d'oxyde qui contribue à la diminution du coefficient de frottement.

Les matériaux utilisés par Zemzemi [34] dans ses tests tribologiques 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 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 4.8 donne l'influence de l'effort normal appliqué sur le coefficient de frottement des couples de matériaux carbure de tungstène non revêtu et revêtu TiN avec 27MnCr5.

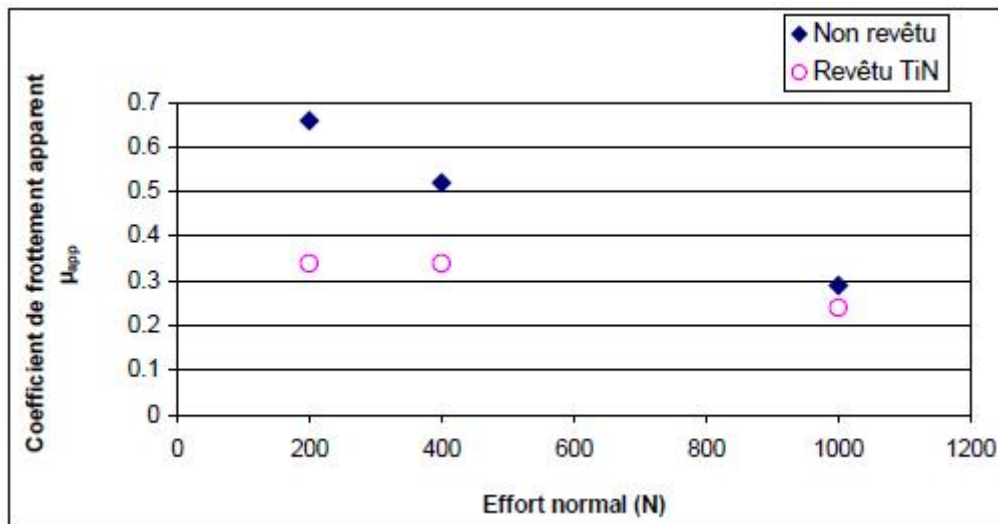
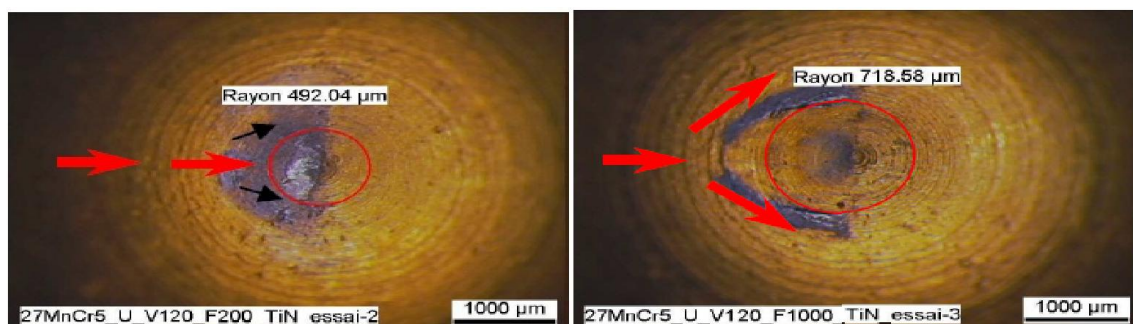


Figure 4.9 : Influence de l'effort normal sur le coefficient de frottement pour une vitesse de glissement 120 m/min.

Le coefficient de frottement diminue avec l'augmentation de l'effort normal. L'observation microscopique des pions montre que l'écoulement de la matière change en augmentant l'effort normal. A 200N, le coefficient de frottement est assez grand à cause de déformations plastiques générées envisagées (figure 4.10a). A 1000 N, le pion comprime la matière et l'oblige à s'écouler vers les cotés ce qui facilite son déplacement et par conséquent réduit le coefficient de frottement (figure 4.10b). Ce phénomène peut être expliqué aussi par l'effet de l'écrouissage de la pièce qui empêche le phénomène d'adhésion pour les hautes valeurs d'efforts.

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



(a) (b)

Figure 4.10 : (a) Déformations plastiques générées ; (b) déplacement de la matière vers les cotés.

Les essais de Djafri [35] 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, 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 à une vitesse de glissement 3.76m/s, une humidité 25%, une température 25°C, une durée de 140 sec et la charge normale appliquée varie entre 10N à 200N.

La figure 4.11 donne l'influence de l'effort normal appliqué sur le coefficient de frottement des matériaux de disques de frein sur le pion. Les coefficients de frottement de la fonte grise FG25 et l'acier 100Cr6 diminuent avec l'augmentation de l'effort normal, D'après [35], celle-ci est due généralement à une formation insuffisante de tribo-couche entre les interfaces de glissement. Le composite d'aluminium Al-MMC a un coefficient de frottement presque stable en fonction de la charge appliquée. Donc la charge dans ce cas n'a aucun effet sur le coefficient de frottement [36].

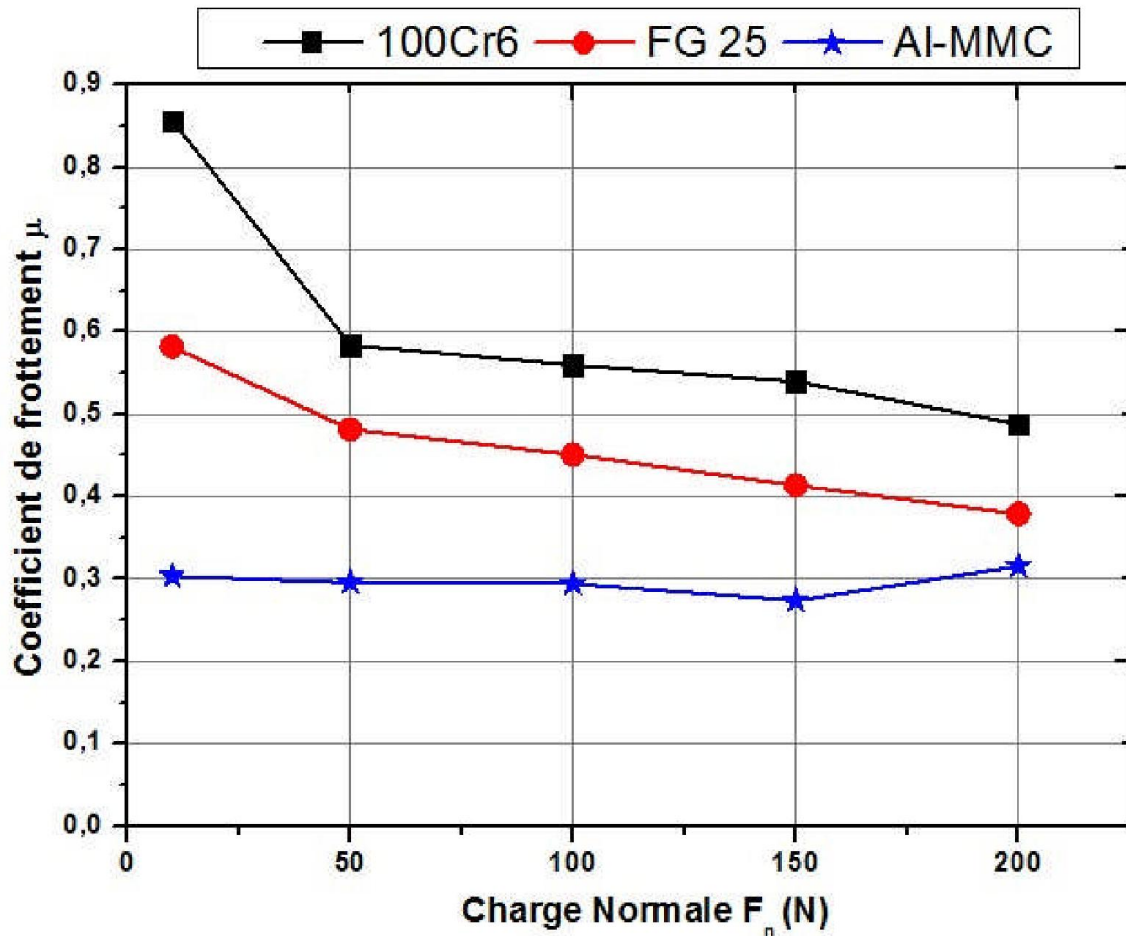


Figure 4.11 : Influence de la charge normale sur le coefficient de frottement avec matériau de friction organique.

4.6 Influence de la charge normale sur l'usure

La figure 4.12, indique les taux d'usure des matériaux testés augmentent avec l'accroissement de la charge normale, cette augmentation du taux d'usure est probablement due à la déformation plastique rapide des surfaces de contact des matériaux examinés, où les forces de cisaillement entre les aspérités augmentent de manière continue avec la charge normale.

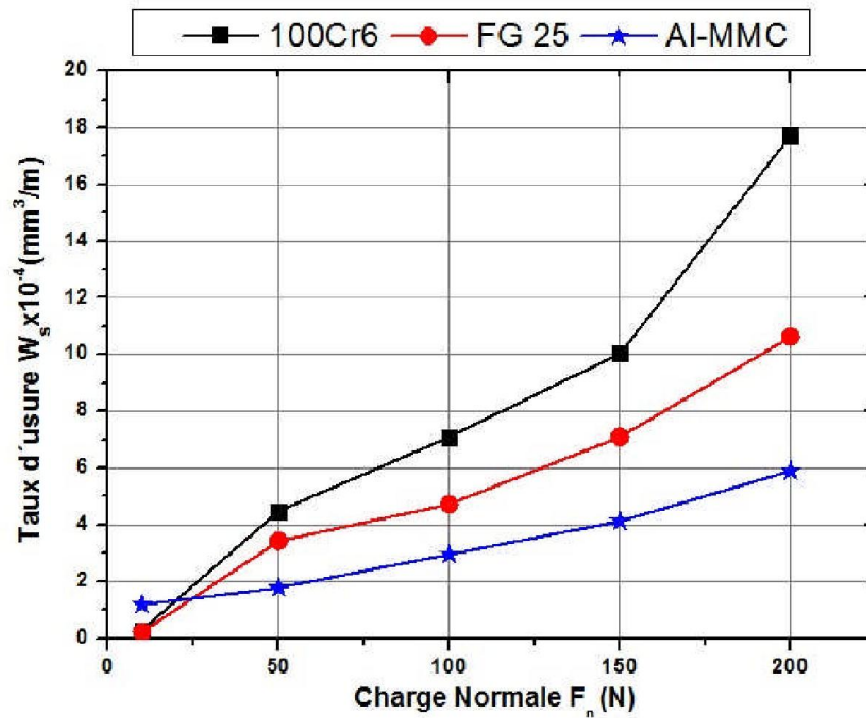


Figure 4.12: Influence de la charge normale sur le taux d'usure matériau de friction organique.

4.7 Influence de la charge normale sur le coefficient de frottement du matériau semi métallique et matériaux des disques de frein

L'évolution du coefficient de frottement, l'allure des courbes du coefficient de frottement est la même que celle des matériaux frottant contre un pion organique (figure 4.13). La plus grande valeur est celle de l'acier chromé 100Cr6 pour la charge appliquée de 10N. Les valeurs des coefficients de frottement de tous les matériaux sont presque identiques à la charge 100N. Pour les grandes charges, la différence entre les coefficients de frottement est faible.

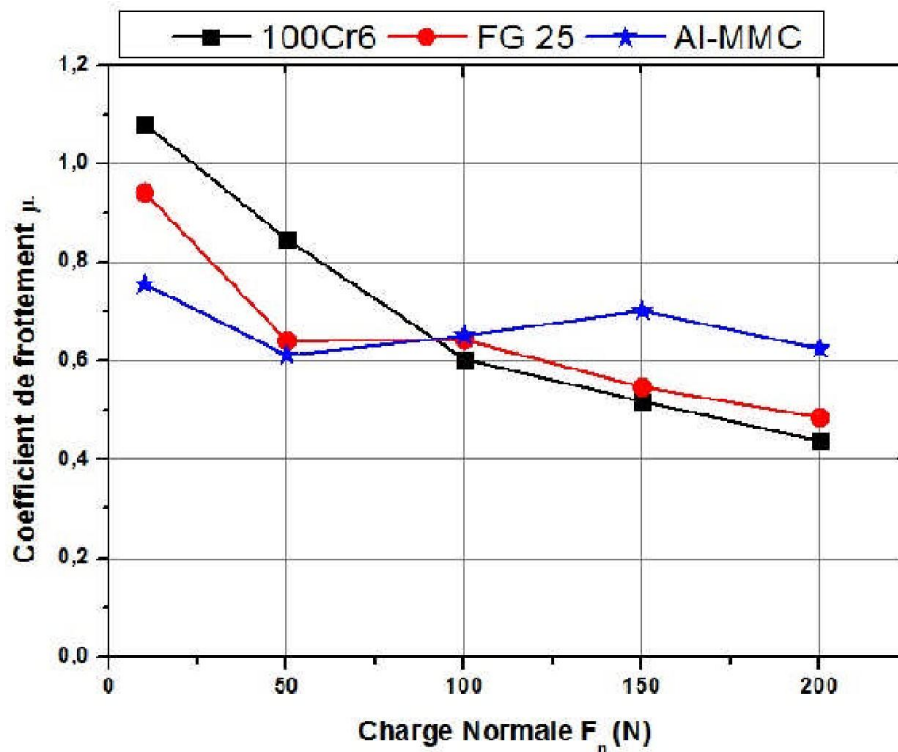


Figure 4.13 : Influence de la charge normale sur le coefficient de frottement

Matériau de friction semi métallique.

4.8 Influence de la charge normale sur l'usure du matériau semi métallique et matériaux des disques de frein

La figure 4.14 montre l'évolution du taux d'usure du pion en matériau semi métallique frottant contre les matériaux des disques testés. La loi de comportement est la même pour tous les matériaux testés ; le taux d'usure augmente avec l'accroissement de la charge appliquée sur le pion. Le taux d'usure du pion frottant contre le disque en fonte grise FG25 est plus élevé comparé deux autres matériaux. Ceci est dû à l'augmentation des forces de cisaillement entre les aspérités. On remarque aussi que l'acier chromé 100Cr6 est caractérisé par un taux d'usure moins élevées que les deux autre matériaux. Le taux d'usure du composite Al-MMC est acceptable.

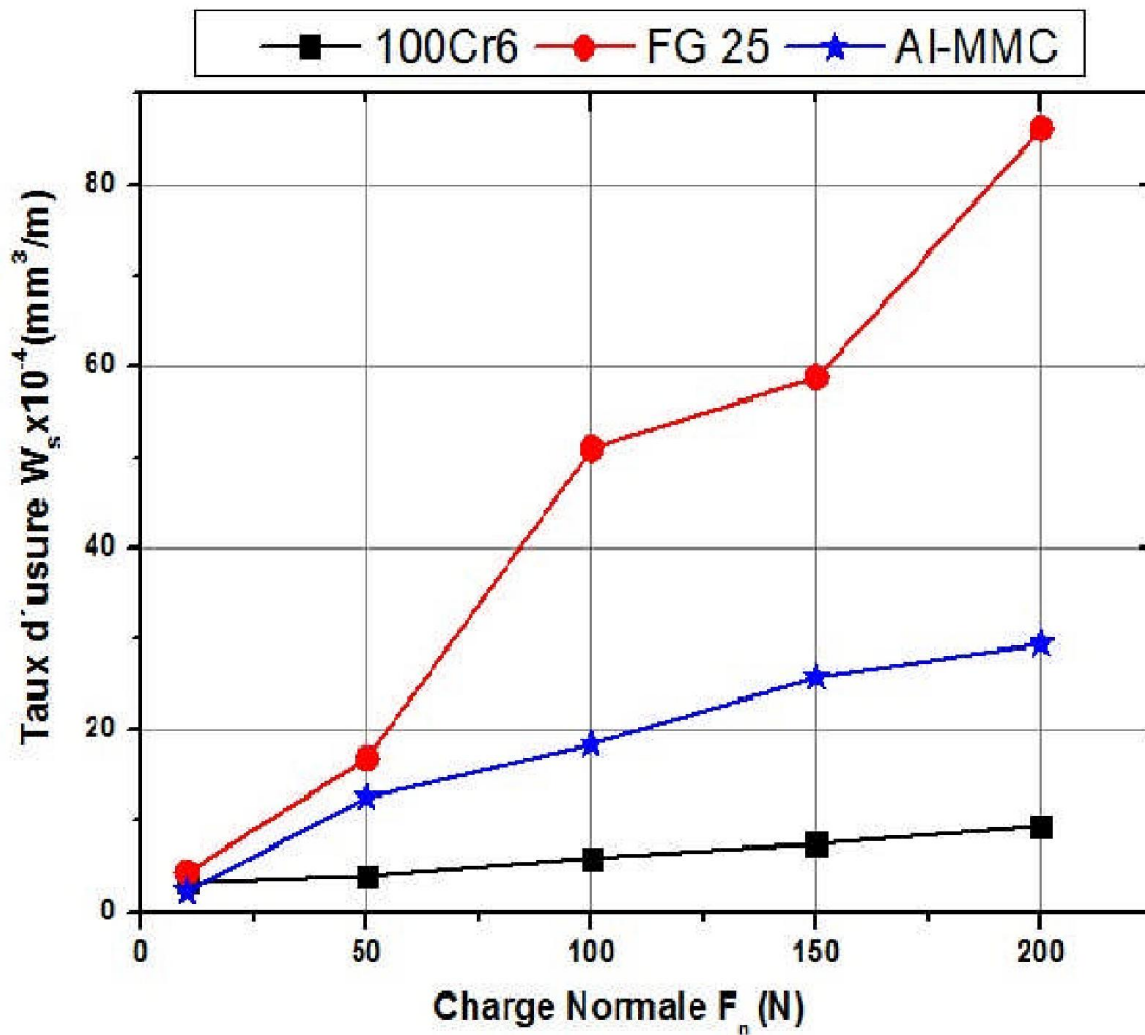
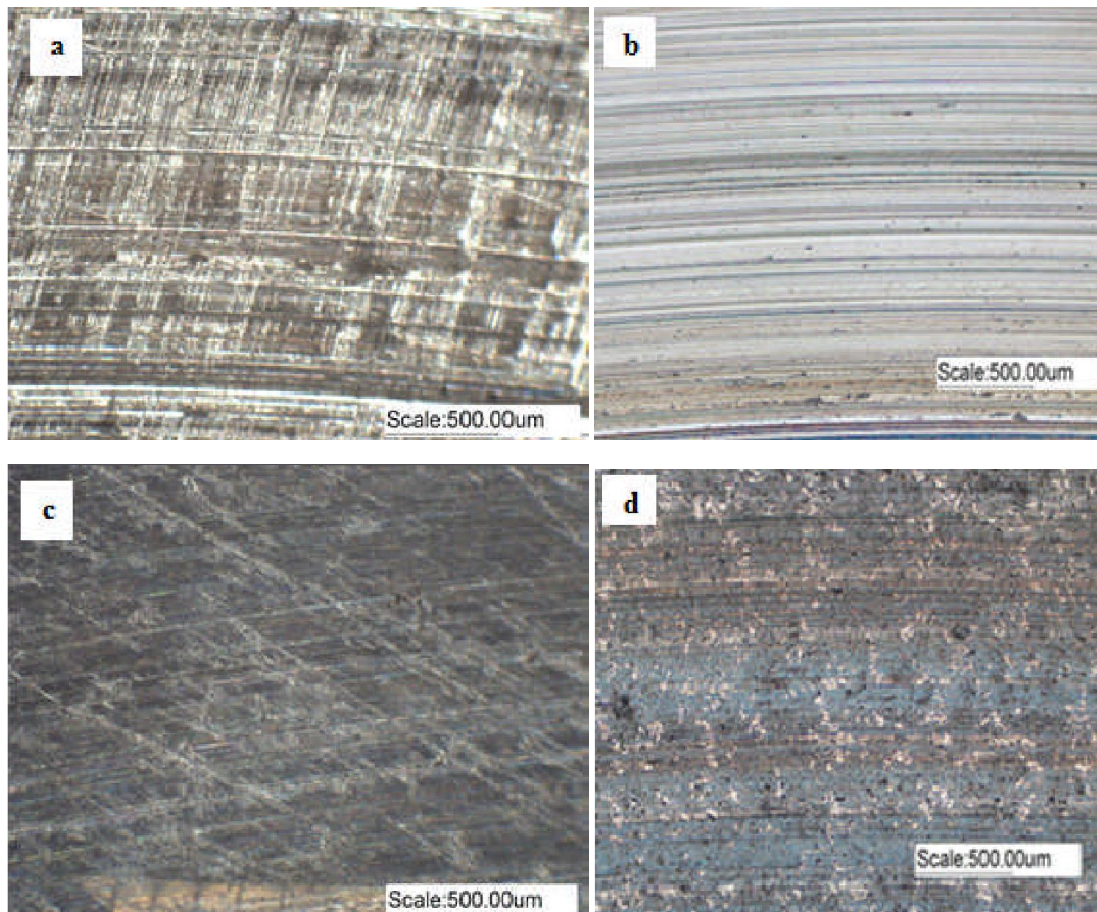


Figure 4.14 : Influence de la charge normale sur le taux d'usure du matériau de friction semi métallique.

D'après les figures 4.13 et 4.14, l'acier chromé 100Cr6 est caractérisé par un coefficient de frottement élevé et un taux d'usure faible, donc a un bon comportement tribologique. Le composite Al-MMC a un meilleur comportement tribologique par rapport à la fonte FG25. L'effet de la charge appliquée sur l'usure du pion est important et significative. Les observations macroscopiques des pistes usées des disques pour deux charges normales $F_n = 10\text{N}$ et $F_n = 200\text{N}$. À la charge 10N, les surfaces usées sont rugueuses et présentent des sillons de glissement, (figure 4.15 (a, c et e)). De nombreuses rainures résultant du labourage ont été observées sur les surfaces de contacts à la charge 200N (figure 4.15 (b, d et f)). A une charge normale élevée, le disque en acier chromé se distingue par une surface usée non-uniforme avec de faibles déformations, et présente des rainures parallèles dues à l'abrasion (figure 4.15 b).

La surface usée de la fonte présente des rainures parallèles avec le sens de glissement provoqué par l'usure abrasive, ainsi que de nombreux fragments pulvérulents collectés sur la piste de frottement de l'échantillon (figure 4.15 d). A faible charge normale (10N), la surface usée du composite Al-MMC présente des zones sombres correspondant aux surfaces de contacts réels entre le pion et le disque, et aussi des rainures parallèles. La distance entre ces rainures est plus grande par rapport à celles observées sur les surfaces de contact des autres matériaux testés, (figure 4.15 e).

Avec l'augmentation de la charge normale, la surface de contact réel croit et devient plus sombre (figure 4.15 f).



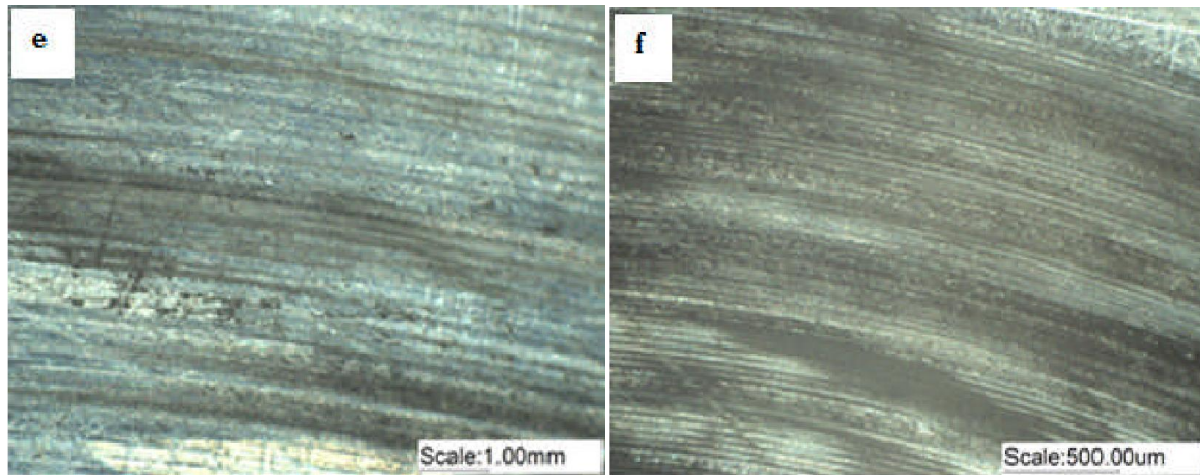


Figure 4. 15 : Evolution de la surface de contact des disques après les tests de frottement contre pion en matériau organique : Fonte grise FG25 (a et b) ; Acier chromé 100Cr6 (c et d) ; Composite Al MMC(e et f).

Les essais de Elhadi [37] 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. 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.

4.9 Evolution du coefficient de frottement en fonction de la charge normale

La figure 4.16 illustre la variation du coefficient de frottement en fonction de la charge normale appliquée. En examinant cette figure, sur ces courbes on peut distinguer :

- Première zone

Cette zone commence de 5 à 12N environ, il s'agit d'une diminution du coefficient de frottement avec l'augmentation de la charge.

- Deuxième zone

Elle caractérise une quasi-stabilité du coefficient de frottement ($\mu \approx 0,35$ pour A60/XC55 et $\mu \approx 0,25$ pour XC48/XC55).

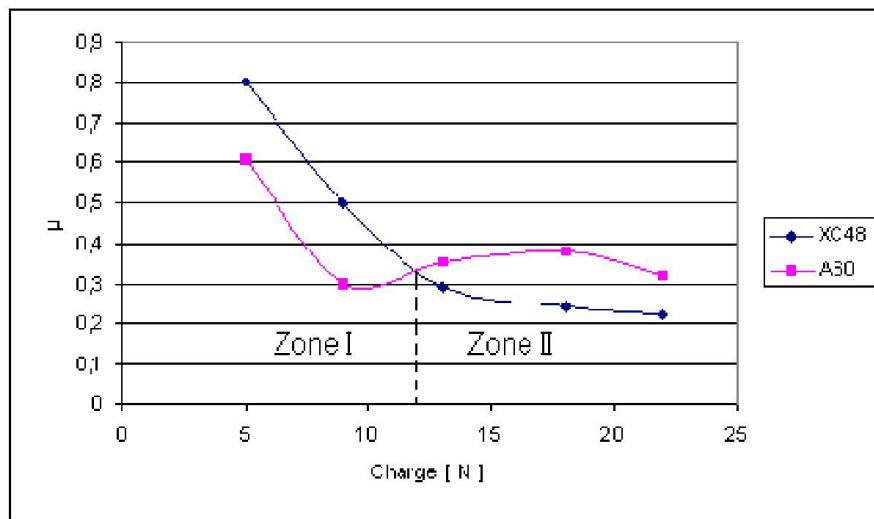


Figure 4.16.: Evolution du coefficient de frottement μ en fonction de la charge ($V=0,24$ m/s).

4.10 Variation de l'usure en fonction de la charge normale

La figure 4.17 montre l'influence de la charge normale appliquée sur l'usure. On remarque que la variation de l'usure est une fonction linéaire avec la charge appliquée.

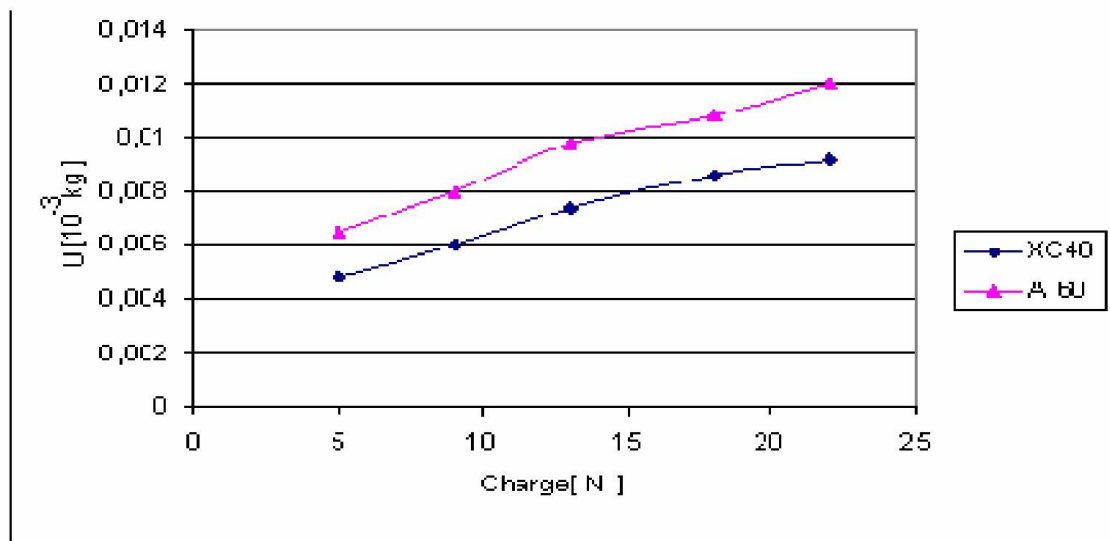


Figure 4.17: Effet de la charge normale sur l'usure du pion ($V=0,08$ m/s).

Aux très faibles charges, les surfaces des matériaux antagonistes ne se touchent que par les aspérités les plus élevées. Les aspérités s'enchevêtrent et conduisent à leur déformation plastique. La surface de contact croît au fur et à mesure que la charge N augmente sous

l'action combinée de la charge normale et la contrainte tangentielle, Après rodage les surfaces s'adaptent et deviennent lisses, le coefficient de frottement diminue puis se stabilise lorsque les conditions de fonctionnement à l'interface sont stables.

Pour des petites charges (figure 4.17), l'usure du pion est faible à cause du nombre limité des points de contact entre les surfaces ainsi que le rôle important que joue la couche adsorbée comme un élément de lubrification. Lorsqu'on augmente la charge, ceci se traduit par un accroissement de la surface réelle de contact et de la température à l'interface, ce qui entraîne différentes conséquences et en particulier facilite la formation puis l'enlèvement de l'oxyde.

Les caractéristiques des endommagements observées sur la face usée du pion et sur la piste de frottement du disque suggèrent que dans la majorité des cas, l'usure se développe simultanément par adhésion et abrasion.

L'observation au microscope optique révèle le recouvrement des faces usées des pions de l'acier XC48 (figure 4.18a) et l'acier A60 (figure 4.18b) par une couche d'oxyde noire qui s'adapte bien aux irrégularités des surfaces.

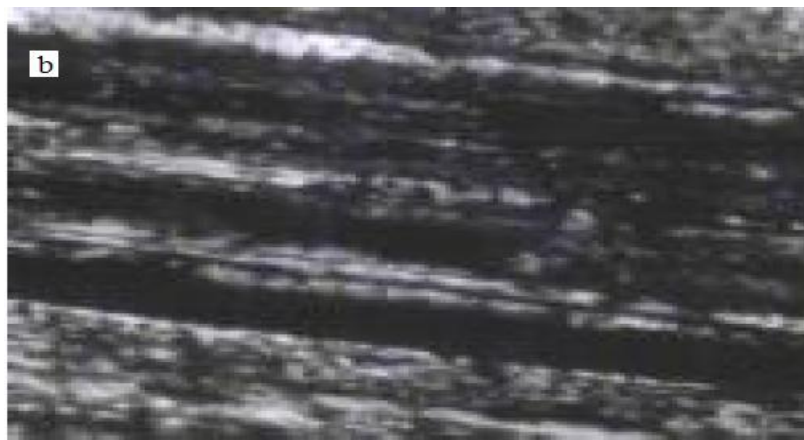


Figure 4.18 : Vue microscopique (x100) de la face usée du pion : (a) XC48; (b) A60 non traité dans les conditions expérimentales suivantes : $N = 9\text{N}$ et $V = 0,32\text{ m/s}$.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

Le travail entrepris dans ce mémoire est principalement de nature expérimentale s'inscrit dans le cadre d'une étude d'évolution d'un contact dynamique sec de type pion-disque. Il consiste à étudier le comportement au frottement et à l'usure sur les couples matériaux métalliques.

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.

En général, les tests tribologiques effectués montrent que le coefficient de frottement est assez grand au démarrage du mouvement, il diminue avec la croissance de la charge normale appliquée.

Le coefficient de frottement diminue avec l'élévation de la charge normale appliquée.

Le coefficient de frottement ne varie pas de manière significative avec la variation de la dureté du matériau du pion.

Le taux d'usure des pions augmente généralement, avec l'élévation de la charge normale appliquée.

Les résultats ont montré qu'un régime d'usure abrasive et un régime d'usure adhésive étaient présents.

Pour diminuer l'usure et par conséquent prolonger la durée de fonctionnement, il faut agir sur le choix de la nature du matériau et sur l'utilisation raisonnable des paramètres tribologiques pendant le service.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Q.J.Wang and Y-W. Chung, editors. Encyclopedia of Tribology. Springer, 2013.
- [2] DROUIN et al, "Manuel éléments de machines". Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal, 1986.
- [3] B. Bhushan. Introduction to Tribology. John Willy& Sons, 2002.
- [4] Nano ingénierie des couches minces, 2009
- [5] DROUIN et al "Manuel éléments de machines" Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal, 1986.
- [6] G. Ingle Bert, T. Da Silva Botelho, and I. Lemaire Caron. Théorie du contact de hertz - contacts ponctuels ou linéiques. In Techniques de l'Ingénieur, number TRI 200, page 12.
- [7] DROUIN et AL "Manuel éléments de machines" Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal, 1986.
- [8] GEORGES SPINNLER, "Conception des machines". Principe et application, 1 Statique 1997.
- [9]:RABINOWICZ.E, friction and wear of materials, John Wiley and sons Inc.,) New York - London – Sydney (1965)
- [9]: ASTM, 1990 Norma G40-90A
- [10]: Stick-slip motion in boundary lubrication, Tribology Series, 7, Elsevier, Amsterdam.
- [11]: 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.
- [12] G. SPINNLER, Conception des machines, Presses polytechniques et universitaires roandes, 1997, Lausanne, vol. 1, 566.
- [13] F. P. BOWDEN, D. TABOR, The Friction and Lubrication of Solids I, Clarendon Press, Oxford 1950
- [14] G. ZAMBELLI, L. VINCENT, Matériaux et contacts, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1998.
- [15] N. KHANAFI-BENGHALEM, Étude des mécanismes d'usure et de frottement de deux aciers X12NiCrMoSi25-20 et le 25CrMo4 (Etude comparative), thèse de doctorat, université de SETIF, 2007

BIBLIOGRAPHIE

- [16] N. KHANAFI-BENGHALEM, Étude des mécanismes d'usure et de frottement de deux aciers X12NiCrMoSi25-20 et le 25CrMo4 (Etude comparative), thèse de doctorat, université de SETIF, 2007
- [17]: PEGNA J., TROCHU F, Eléments de la tribologie, Cours Théoriques sur le frottement, l'usure et la lubrification, 2003.
- [18]: WIKIBOOK, Cours de tribologie, Encyclopédie Wikipédia, 2004, <http://fr.Wikibooks.org>.
- [19] M. REDHA, Contribution à l'étude des contacts mécaniques du couple cuivre acier traversé par le courant électrique, 2007, mémoire de magister, université de Skikda
- [20] STATIQUE : LOIS DE COULOMB. COURS. Lycée Jules Ferry -Edition 1 – Cannes 2018
- [21] B. Bhushan and B.K. Gupta, Handbook of Tribology Materials. Coatings and Surface Treatments, McGraw-Hill, United States, 1991.
- [22] H. J. Mathieu, E. B. Rene, Analyse et technique des surfaces, Presse polytechnique Lausanne, première édition 2003.
- [23] P. Kapsa, M. Cartier, Usure des contacts mécaniques – Manifestations de l'usure, Techniques de l'Ingénieur BM5067, p. 1-13, 2001.
- [24] 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
- [25] F. P. Bowden, D. Tabor, Friction and Lubrication of Solids, Part II. Oxford: Clarendon press, 1964.
- [26] T. Mang, K. Bobzin, T. Bartels, Industrial Tribology, Weinheim, Germany, Wiley VCH Verlag GmbH, 2011.
- [27] J.M. Georges, Frottement, usure et lubrification. Paris : Eyrolles et Cnrs Editions, Sciences et techniques de l'ingénieur, 424. (2000).
- [28] Notions de tribologie, [http://58consme.free.fr/Cours%20a%20Pdf/contact tribologie](http://58consme.free.fr/Cours%20a%20Pdf/contact%20tribologie).
- [29] P. Dumon "Revêtements par soudage et projection thermique" Tome 1 Usure – Produit et procédés, Institut de Soudage, 1991.
- [30] Mouadji Youcef. Effets du courant électrique sur le mécanisme de croissance de la couche d'oxyde à l'interface des contacts électrodynamiques cuivre-graphite et graphite-graphite. Thèse de Doctorat en Sciences. Université de Constantine 1. 2013.
- [31] N. Khanafi-Benghalem, E. Felder, K. Loucif, P. Montmitonnet. Plastic deformation of 25CrMo4 steel during wear: Effect of the temperature, the normal force, the sliding velocity and the structural state. Wear 268 (2010) 23–40.

BIBLIOGRAPHIE

- [32] Mekroud Abdesselam. Influence du champ magnétique sur le comportement tribologique des couples métalliques glissants acierXC48/acier XC 48, laiton/acier XC 48 et aluminium/acier XC 48 Thèse de Doctorat en Sciences. Université de Constantine 1. 2008
- [33] P.Arnaud, cours de chimie physique, 2e édition, Dunod, 1992.
- [34]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.
- [35] 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.
- [36] N. Natarajan, S. Vijayarangan, I. Rajendran, Wear behaviour of A356/25SiCp aluminium matrix composites sliding against automobile friction material, Wear 812–261(2006).
- [37] 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.