



République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche
scientifique
Université de M'sila



N° d'ordre : GM/...../2019

Département de Génie Mécanique
MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Fabrication Mécanique

Thème

**Effet de la dureté sur le comportement en
frottement et en usure des couples d'aciers non
allié et faiblement allié**

Proposé et dirigé par :

Mr. ELHADI ABDELMALEK

Présenté par:

Silini Marwa

Taallah Ahlam

Année Universitaire : 2018 / 2019

Remerciements

*Nous remercions Dieu qui nous a donné le pouvoir
et nous 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 à les membres du
jury d'avoir accepté de participer à cette
soutenance, d'évaluer ce travail et de contribuer à
son amélioration.*

*A tous les étudiants et les professeurs du
département de génie mécanique.*

A tous nous disons merci !

Dédicace

Je dédier ce modeste travail

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

*mes très chères parents Qu'ALLAH les
protèges.*

*mes chères frères et aux filles de mon frère et
sa femme toute la famille.*

mon chères fiancé.

tous ceux qui me sont chère

Mes amis.

Silini Marwa

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail

A ma très chère mère

A mon très chère père

A mes grandes parents

A mes frères et mes sœurs à leurs enfants.

A mes amis

A mes amis de la promotion 2019

Taallah ahlem

Résumé

Il existe plusieurs applications dans le secteur industriel où le frottement et l'usure des surfaces antagonistes des pièces mécaniques en contact dynamique jouent un rôle très important dans le comportement tribologique et la durée de vie du système mécanique.

Notre étude s'agit particulièrement des contacts dynamiques secs de l'acier C45 et 42CrMo4 frottant contre l'acier C55.

La différence de dureté des surfaces de contact de matériaux de pions due à l'application du traitement thermique (trempe et revenu) a une influence importante sur le bon fonctionnement et le prolongement de la durée de vie des couples utilisés.

Des observations et des analyses seront effectuées en utilisant des techniques comme le microscope optique.

ملخص

هناك عدة تطبيقات في القطاع الصناعي أين يكون إحتكاك وتآكل أسطح القطع الميكانيكية بتلامسها الديناميكي الذي يلعب دورا هاما في السلوك التريبولوجي وكذا مدة الحياة للنظام الميكانيكي.

دراستنا هذه تتعلق إستثنائيا بالتلامس الديناميكي الجاف لنوعين من الفولاذ C45 و 42 CrMo4 التي تحتك مع الفولاذ C55 .

إن الفرق في قساوة أسطح التلامس لمواد الساق (pion) الناتجة عن تطبيق المعالجة الحرارية (التصليد والإرجاع) لها تأثير كبير على التشغيل الجيد وإطالة الحياة للزوج المستعمل. الملاحظات والتحليل تنجز باستعمال المجهر الضوئي.

Abstract

There are several applications in the industrial sector where the friction and wear of the surfaces of the mechanical parts plays a crucial role in the tribological behavior and the service life of the mechanical system .

Our study is particularly concerned with dry C45 and 42CrMo4 steel rubbing against C55 steel.

The difference in hardness of the contact surfaces of pion materials has a significant influence on the proper functioning and prolongation of the service life of the torques used.

Observations and analyses will be performed using such techniques as the light microscope.

TABLE DES MATIERES

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| INTRODUCTION GENERALE..... | 10 |
|-----------------------------------|-----------|

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LA TRIBOLOGIE ET LE CONTACT DES MATERIAUX METALLIQUES

| | |
|--|-----------|
| I.1.Introduction..... | 12 |
| I.2. Importance de la tribologie..... | 14 |
| I.3.Aspects scientifiques de la tribologie..... | 14 |
| I.4.Etude des surfaces..... | 15 |
| I.4.1.Structures de surfaces..... | 15 |
| I.4.2. Types de surface | 18 |
| I.4.2.1.Surface d'un corps..... | 18 |
| I.4.2.2.Surface géométrique..... | 18 |
| I.4.2.3.Surface spécifiée..... | 18 |
| I.4.2.4.Surface réelle | 18 |
| I.4.2.5.Surface mesurée | 18 |
| I.4.3.Les ordres de défauts d'une surface géométrique (Etats de surface) | 19 |
| I.4.3.1. Principaux défauts de surfaces..... | 19 |
| I.5.Mécanique du contact..... | 19 |
| I.5.1.Types de contact..... | 19 |
| I.5.1.1. Contact ponctuel ou linéique..... | 21 |
| I.5.1.2.Contact cylindre – plan..... | 22 |
| I.5.1.3.Contact sphère – sphère..... | 23 |
| I.5.1.4. Contact extérieur de deux cylindres parallèles..... | 23 |
| I.5.1.5.Contact plan | 24 |
| I.5.2. Surfaces de contact | 24 |
| I.5.2.1. Surface de contact nominale | 24 |
| I.5.2.2.Surface de contact réelle..... | 25 |
| I.5.3.Contact des aspérités..... | 25 |

CHAPITRE II
FROTTEMENT DES SURFACES DE CONTACT DES COUPLES DE
MATERIAUX

| | |
|---|----|
| II.1. Introduction | 27 |
| II.2. Frottement | 28 |
| II.2.1. Définition | 28 |
| II.2.2. Force et coefficient de frottement | 28 |
| II.2.3. Importance du coefficient de frottement | 28 |
| II.2.4. Type de frottement | 29 |
| II.2.4.1. Frottement de glissement | 29 |
| II.2.4.1.1. Adhérence | 29 |
| II.2.4.1.2. Labourage | 30 |
| II.2.4.2. Frottement par roulement | 32 |
| II.2.4.3. Réduction du frottement de roulement | 34 |

CHAPITRE III
USURE DES SURFACES DE CONTACT DES COUPLES DE
MATERIAUX

| | |
|---|----|
| III.1. Introduction | 35 |
| III.2. Définition | 35 |
| III.3. Différents types d'usure | 35 |
| III.3.1. Usure adhésive | 35 |
| III.3.1.1. Quantification de l'usure adhésive | 37 |
| III.3.2. Usure abrasive | 38 |
| III.3.2.1. Quantification de l'usure abrasive | 39 |
| III.3.3. Usure corrosive (ou tribochimique ou tribocorrosive) | 40 |
| III.3.4. Usure par oxydation | 41 |
| III.3.5. Usure par fatigue | 42 |
| III.3.5.1. Modification structurale due à la fatigue | 42 |

CHAPITRE IV
DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX UTILISES

| | |
|---|----|
| IV.1. Introduction | 43 |
| IV.2. Dispositif expérimental | 43 |
| IV.2.1. Présentation générale du tribomètre | 43 |
| IV.3. Identification des matériaux utilisés | 45 |
| IV.3.1. Matériaux du pion..... | 45 |
| IV.3.1.1. Acier C45..... | 45 |
| IV.3.1.2. Acier 42CrMo4..... | 45 |
| IV.3.2. Matériau du disque..... | 46 |
| IV.3.3. Composition chimique..... | 46 |
| IV.4. Présentation des couples tribologiques | 46 |
| IV.4.1. Disque..... | 46 |
| IV.4.2. Pion..... | 47 |
| IV.5. Préparation des échantillons | 47 |
| IV.5.1. Usinage des échantillons..... | 47 |
| IV.5.2. Traitements thermiques appliqués | 47 |
| IV.5.2.1. Introduction | 47 |
| IV.5.3. Le polissage..... | 49 |
| IV.6. Essai de micro dureté | 50 |
| IV.6.1. Introduction..... | 50 |
| IV.6.2. Principe de microdureté..... | 50 |
| IV.7. Observations microscopique | 51 |
| IV.8. Enregistrements des profils de la rugosité | 51 |
| IV.9. Analyse chimique de la piste d'usure | 52 |

CHAPITRE V
PRESENTATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET
DISCUSSION

| | |
|---|-----------|
| V.1. Introduction..... | 54 |
| V.2. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la distance de glissement..... | 54 |
| V.3. Variation du coefficient de frottement μ en fonction de la dureté du pion..... | 55 |
| V.4. Variation de l'usure en fonction de la dureté du pion..... | 56 |
| V.5. Mesure de l'état de surface | 57 |
| V.6. Discussion des résultats obtenus..... | 58 |
| V.6.1. Influence de la distance de glissement sur le coefficient de frottement..... | 58 |
| V.6.2. Variation du coefficient de frottement μ en fonction de la dureté du pion... | 59 |
| Conclusion générale..... | 67 |
| Référence bibliographique..... | 68 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure I.1: Schéma général de la tribologie..... | 13 |
| Figure I.2: Vue théorique en coupe d'une surface..... | 16 |
| Figure I.3 : Schématisation des trois familles de contacts..... | 20 |
| Figure I.4: Représentation des différentes familles de contact..... | 21 |
| Figure I.5: Contact ponctuel..... | 22 |
| Figure I.6: Contact linéique..... | 22 |
| Figure I.7: Contact cylindre – plan..... | 22 |
| Figure I.8: Contact sphère – sphère..... | 23 |
| Figure I.9: Contact extérieur de deux cylindres parallèles..... | 23 |
| Figure I.10: (a) Enfoncement d'une pièce dans une plaque champ de force ; (b) modèle de calcul..... | 24 |
| Figure I.11: Contact de deux surfaces..... | 25 |
| Figure I.12: Surfaces en contact par leurs aspérités..... | 26 |
| Figure II.1. Début du labourage d'une surface tendre par une aspérité dure..... | 31 |
| Figure II.2: Sillon de labourage et bourrelet frontal..... | 31 |
| Figure II.3: Labourage par des débris d'usure..... | 32 |
| Figure II.4: Frottement par roulement..... | 33 |
| Figure II.5: Aire de contact..... | 34 |
| Figure III.1: Tourillon avec diverses traces d'usure..... | 36 |
| Figure.III.2: a) Etat de surface présentant une usure par abrasion ; b) Mécanisme d'usure par abrasion..... | 39 |
| Figure III.3: Etat de surface présentant une usure par corrosion..... | 41 |
| Figure III.4: Formation des couches d'oxydes superposées sur la surface du fer à 625 °C après 24h..... | 41 |
| Figure III.5: Fissures générées par fatigue..... | 42 |
| Figure IV.1: Système de pion-disque..... | 44 |
| Figure IV.2: Couple pion – disque..... | 45 |

| | |
|---|----|
| Figure IV.3 : Dessin de définition du disque..... | 46 |
| Figure IV.4 : Géométrie du pion..... | 47 |
| Figure IV.5 : Four électrique "Nabertherm"..... | 48 |
| Figure IV.6 : Polisseuse de type knuth-rotor-2..... | 49 |
| Figure IV.7 : Microduromètre..... | 50 |
| Figure IV.8 : Microscope optique de type Métallurgicale Microscope..... | 51 |
| Figure IV.9 : Rugosimètre à stylet de type "MITUTOYO Surf test - 4"..... | 52 |
| Figure IV.10 : Analyseur chimique portatif..... | 52 |
| Figure IV. 11 : Microbalance de précision 0,1mg..... | 53 |
| Figure V.1: Evolution du coefficient de frottement en fonction de la distance de glissement à la dureté 40HRC des pions pour:(a) Couple 42CrMo4/C55 ; (b) Couple C45/C55..... | 55 |
| Figure V.2:Variation du coefficient de frottement μ en fonction de la dureté du pion... | 56 |
| Figure V.3: Variation de l'usure du pion en fonction de sa dureté..... | 57 |
| Figure V.4: Variation de R_a de la piste d'usure du disque en fonction de la dureté du pion..... | 58 |
| Figure V.5 : Contact des aspérités en frottement..... | 59 |
| Figure V.6 : Vue microscopique de la face usée du pion (40HRC) : (a) 42CrMo4 ; (b) C45..... | 61 |
| Figure V.7: Vue microscopique de la face usée du disque correspond au pion 42CrMo4..... | 62 |
| Figure V.8: Vue microscopique de la face usée du disque correspond au pion C45..... | 63 |
| Figure V.9: Taux des éléments chimiques détectés sur la face usée du disque pour le couple 42CrMo4/C55 à la dureté : (a)35HRC; (b) 40HRC..... | 65 |
| Figure V.10: Rayage par les grains de la poudre d'usure..... | 66 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau IV.1: Composition chimique (pds %) des échantillons..... | 46 |
| Tableau V.1: les valeurs du coefficient de frottement du couple C45/C55 et du couple 42CrMo4/C55..... | 55 |
| Tableau V.2: les résultats de la perte en masse des pions en fonction de la dureté du pion pour les deux couples..... | 56 |
| Tableau V.3: les valeurs de la rugosité arithmétique moyenne R_a de la piste d'usure du disque..... | 57 |

INTRODUCTION GENERALE

Le mot tribologie, construit à partir des racines grecques, signifie science du frottement. Il recouvre entre autres tous les domaines du frottement, de l'usure et de la lubrification. La tribologie s'intéresse aussi aux diverses méthodes qui permettent de donner un bon comportement à ces contacts. Son étude s'impose pour de nombreuses raisons :

- assurer le bon fonctionnement et la fiabilité des machines.
- diminuer le coût d'obtention des surfaces frottantes.
- améliorer le rendement et la longévité des machines.
- assurer la sécurité des biens et des personnes, particulièrement dans le domaine des transports.
- contribuer à la santé publique et au confort, par exemple en diminuant les bruits, très nombreux liés aux contacts mécaniques

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. Le frottement et l'usure d'un matériau sont des processus complexes, liés à des facteurs physico-chimiques et mécaniques, tels que la charge appliquée, la vitesse de glissement et la dureté. La différence de dureté des surfaces en contact joue un rôle important sur le bon fonctionnement et la durée de vie des couples utilisés.

Les aciers qui peuvent être traités thermiquement tels que, les aciers faiblement alliés et les aciers au carbone spéciaux non alliés sont les matériaux métalliques les plus utilisés pour la fabrication des éléments de machines et des pièces qui doivent avoir une bonne résistance à l'usure, en raison de leurs propriétés mécaniques et tribologiques élevées.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de la dureté du pion en aciers C45 et 42CrMo4 sur le comportement en frottement et en usure par glissement sec sur un disque en acier C55 et les conséquences sur les surfaces frottantes.

De ce fait, le mémoire est structuré de cinq chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique, concernant des généralités sur la tribologie et le contact des matériaux métalliques.

Dans le deuxième chapitre, on présente une recherche théorique sur le frottement des surfaces de contact des couples de matériaux.

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

Le quatrième chapitre concerne l'étude expérimentale, il décrit les dispositifs expérimentaux utilisés, l'identification des matériaux utilisés, la préparation des échantillons et les techniques de mesure.

Enfin ; le cinquième chapitre est une présentation des résultats obtenus, discussion et analyse de ces résultats en utilisant particulièrement un microscope optique.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LA TRIBOLOGIE ET LE CONTACT DES MATERIAUX METALLIQUES

I.1.Introduction

La tribologie est le domaine de la science et de la technologie qui concerne l'interaction de surfaces en mouvement relatif. L'usure et le frottement ne sont pas des propriétés des matériaux mais des propriétés d'un système tribologique.

Un système tribologique se définit comme un système mécanique, formé de deux matériaux antagonistes en contact, animés de mouvements relatifs. Ces deux solides évoluent dans un milieu ambiant et peuvent être séparés par un film intercalaire appelé troisième corps [1].

Les enjeux de la tribologie sont de plusieurs natures : assurer le bon fonctionnement et la fiabilité des machines ou améliorer leur rendement et leur durée de vie, diminuer les bruits de fonctionnement liés aux contacts mécaniques, diminuer le coût d'obtention des surfaces frottantes, etc. Il est important de reconnaître le caractère pluridisciplinaire de la tribologie où le terme de couplage multi-physique prend tout son sens avec la science des matériaux, la physico-chimie des surfaces, la mécanique des solides et des surfaces, la thermique et la thermodynamique, la thermo-chimie et la thermo-métallurgie, etc. Par ailleurs, l'usinage par enlèvement de matière est une technique classique de génération de surface grâce à la combinaison de mouvements relatifs de l'outil coupant par rapport à la pièce usinée.

Les interactions entre le couple outil/matière et les phénomènes physiques qui lui associées sont très complexes. C'est un processus thermomécanique fortement couplé dans lequel les déformations plastiques, la chaleur et les phénomènes de frottement jouent un rôle critique en termes d'usure [2].

Quand un outil pénètre dans une pièce métallique pour former un copeau, la matière située près de la surface est fortement cisailée. Le copeau se trouve en contact intime avec la face de coupe de l'outil dans un environnement très hostile. Outre ces phénomènes d'ordre mécanique et thermique, les interfaces Outil/Copeau/Pièce sont également le siège de réactions chimiques entre l'outil, la matière coupée et l'atmosphère environnante. Ceux-ci ayant lieu dans une région très petite autour de la pointe de l'outil, les phénomènes liés à la tribologie de la coupe sont très difficiles à étudier et à modéliser.

Le problème de la tribologie en usinage des métaux a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche dans le but de le maîtriser pour optimiser l'opération et améliorer la qualité du produit final.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une synthèse bibliographique concernant l'étude et la modélisation des phénomènes tribologiques produits durant l'opération d'usinage des métaux.

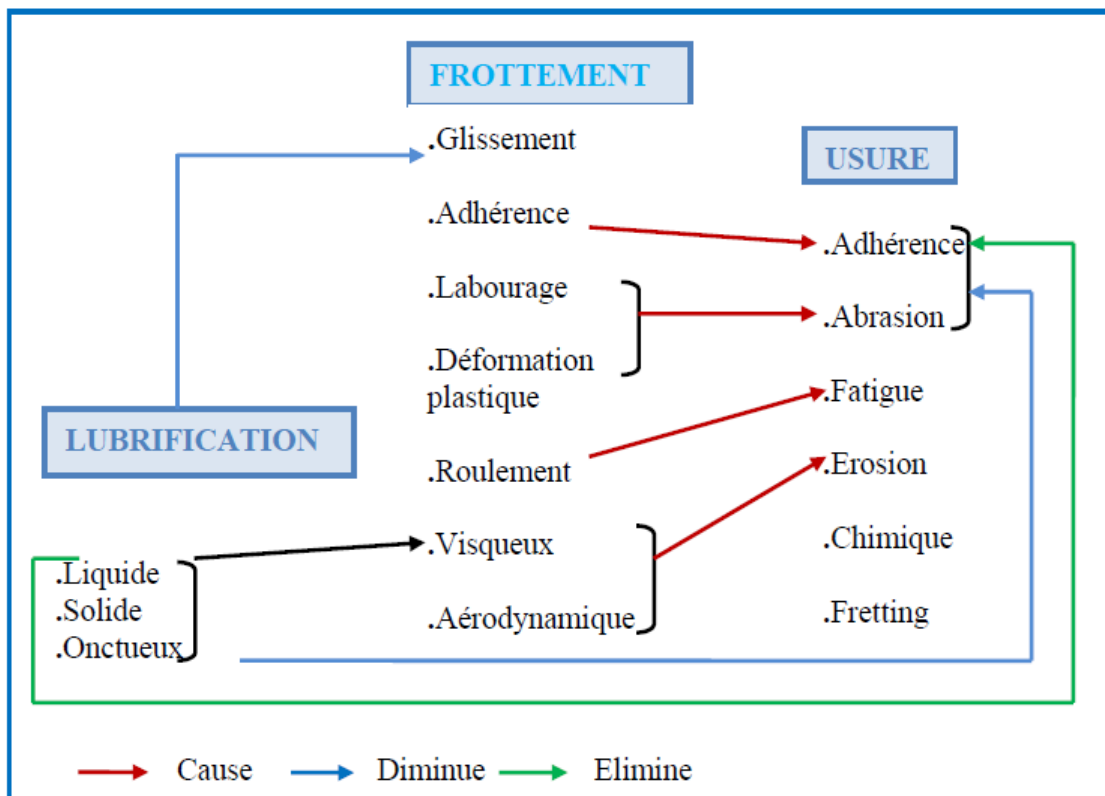


Figure I.1 : Schéma général de la tribologie [3]

I.2. Importance de la tribologie

On observe des phénomènes de frottement dans tous les systèmes mécaniques, et cette composante tribologique est décisive dans les domaines d'application variés qui vont de la mécanique industrielle aux systèmes du vivant.

La tribologie s'intéresse à l'étude et à l'interprétation scientifique des faits expérimentaux, elle entre en jeu de façon significative dans de nombreux domaines industriels. La connaissance de la tribologie est devenue une nécessité pour de multiples raisons:

- Assurer le bon fonctionnement et la fiabilité des machines.
- Diminuer le coût d'obtention des surfaces frottantes.
- Améliorer le rendement et la longévité des machines.
- Assurer la sécurité des biens et des personnes, particulièrement dans le domaine de transport.
- Contribuer à la santé publique et au confort, par exemple en diminuant les bruits, très nombreux, liés aux contacts mécaniques.

I.3.Aspects scientifiques de la tribologie

La tribologie est un domaine pluridisciplinaire, dans lequel interviennent, bien sûr, les bases fondamentales de la mécanique, mais aussi les aspects scientifiques multiples de la science des matières.

Les échelles dimensionnelles des phénomènes étudiés vont en général du mètre (caractéristique des dimensions d'une machine) à l'angström (caractéristique des interactions d'origine atomique et moléculaire).

L'analyse scientifique de la tribologie peut se structurer en trois grands domaines qui concernent : Les matériaux, les surfaces et les écoulements de la matière.

Le comportement des matériaux apparaît comme un élément essentiel. Selon leur ductilité ou leur fragilité, la nature de leur contact diffère énormément, et les lois de frottement et d'usure varient aussi.

La compréhension des lois physico-chimiques des surfaces permet dans certains cas, d'apercevoir l'origine de leurs comportements particuliers.

La compréhension de la tribologie nécessite l'application des lois de la mécanique des fluides complexes, de la mécanique des solides, pour pouvoir les régimes de lubrification.

On a dit d'une science qu'elle a l'âge de ses instruments de mesure. La tribologie, qui utilise les toutes dernières de la physique, de la chimie, de la mécanique et aussi de l'informatique, est donc une science jeune et actuelle.

En fin, les efforts entrepris dans le domaine de la tribologie ne concernent pas uniquement les laboratoires de recherche, mais aussi concernent les laboratoires industriels.

I.4. Etude des surfaces

L'étude des surfaces revêt de l'importance dans un grand nombre d'applications industrielles.

I.4.1. Structures de surfaces

La surface d'un corps est le lieu des points séparant ce corps du milieu environnant. Elle correspond donc à une discontinuité dans l'aménagement périodique des atomes de celui-ci. En surface, le nombre de plus proches voisins est différent de ce qu'il est en volume. On parle aussi d'interface solide-gaz, solide-liquide, solide-solide.

La notion d'état de surface comprend :

- l'état physico-chimique (nature, structure, texture des couches superficielles).
- l'état géométrique (ensemble des écarts géométriques de la surface réelle par rapport à la surface géométrique idéale).

Les surfaces présentent des défauts géométriques de différents ordres :

- Ordres macroscopiques liés à des écarts de grande amplitude dus généralement aux défauts géométriques de la machine génératrice (écart de forme du 1er et 2ème ordre).

- Ordres microscopiques liés à des écarts de faibles amplitudes dus à l'outil de coupe, aux grains abrasifs, aux particules de sablage ou grenailage, aux vibrations de la machine ou encore aux piqûres de corrosion (rugosité, écarts de forme de 3^{ième} et 4^{ième} ordre).

En réalité, le terme surface représente une couche d'épaisseur comprise entre 10^{-2} mm et 10^{-6} mm. La composition chimique et les propriétés mécaniques de cette zone peuvent être très différentes de celles du cœur du matériau. La surface peut être recouverte de films contaminant (gaz adsorbés, produits organiques) d'oxydes et dans le cas de métaux, peut être écrouie. La présence de ces écrans va modifier le comportement tribologiques des corps en contact (Figure I.2).

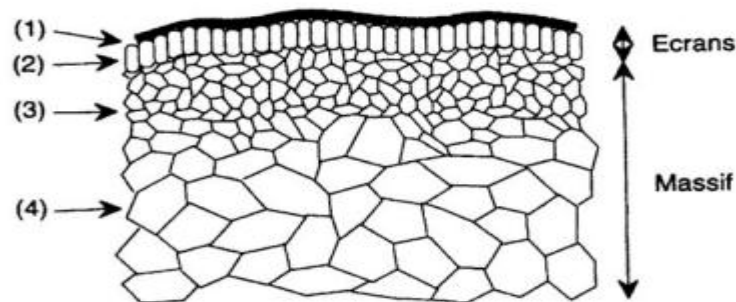


Figure I.2: Vue théorique en coupe d'une surface.

La surface est donc l'endroit le plus perturbé d'une pièce. La zone (1) est un film de contamination (0,3 à 3 nm) constitués de couches absorbées. La zone (2) est un film d'oxydes (1 à 10 μm). La zone (3) est une zone mécaniquement perturbée (1 à 50 μm) de structure écrouie ou structure de couche de diffusion. La zone (4) partant de 100 μm est le matériau massif.

Lorsque l'usure est limitée à l'enlèvement des films de surface, elle est appelée « usure douce ». Ces écrans détruits peuvent être reconstitués par réaction avec l'environnement. Lorsque l'usure s'étend au massif, elle est appelée usure « destructrice » ou « sévère ».

Les surfaces de contact de deux corps frottants peuvent ne pas jouer des rôles symétriques. Par exemple, dans le cas du glissement d'un pion sur un disque :

un point de la surface de contact du pion est constamment sollicité, alors qu'un point de la piste du disque ne l'est qu'au passage du pion. Les distances cinématiques sont alors différentes.

L'exposition au champ de contraintes développées dans le pion et le disque ne sera pas la même, et les effets de fatigue vont être différents. Les usures du pion et du disque différeront également ainsi que les coefficients de frottement. Par exemple, pour des conditions expérimentales identiques, un pion de cuivre frottant sur un disque d'alumine présente un coefficient de frottement type Coulomb de 0,2 qui s'élève jusqu'à 1,5 lorsque le pion est en alumine et le disque en cuivre [4].

Le contact peut être selon les géométries des corps :

- Ponctuel (sphère/sphère, sphère /plan,...)
- Linéaire (cylindre/plan)
- Surfaccique (plan/plan)

Le contact statique entre deux solides ne s'effectue donc pas sur la surface apparente commune aux deux solides, mais sur un ensemble de zones discrètes (aussi appelées aspérités) dont la somme des aires donne la surface réelle de contact. Dans le cas d'un frottement de glissement, les zones de contact sont sans cesse renouvelées. Le rapport aire réelle sur aire apparente peut varier de façon significative : il est alors plus facile de raisonner en terme de force appliquée plutôt que de pression.

La surface réelle de contact est sensible à la charge appliquée. De nombreuses études se sont intéressées à la variation de l'aire réelle de contact en fonction du mode de déformation des aspérités : élastiques pour le modèle d'Archard (années 50), élasto-plastiques pour le modèle de Greenwood-Williamson (années 60). Plus récemment, Robbe-Valloire & al [5].

I.4.2. Types de surface**I.4.2.1. Surface d'un corps**

Elle est constituée par l'ensemble des points qui délimitent la portion de l'espace où se trouve la matière de ce corps.

I.4.2.2. 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.

I.4.2.3. 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.

I.4.2.4. Surface réelle

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

I.4.2.5. 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 et de la nature même de la surface réelle.

L'intersection de la surface réelle avec un plan perpendiculaire à la surface géométrique qui lui correspond s'appelle profil.

I.4.3. Les ordres de défauts d'une surface géométrique (Etats de surface)**I.4.3.1. Principaux défauts de surfaces**

- Les défauts possibles d'une surface peuvent être divisés en quatre catégories, en allant du plus grand au plus petit.

Défaut d'ordre 1

- Ils correspondent aux défauts géométriques des surfaces : planéité, rectitude, circularité...

Défaut d'ordre 2

- Ils sont relatifs aux ondulations, sortes de collines et de vallées successives, inscrites dans le profil et engendrées par les vibrations, déformations des machines, traitements thermiques...

Défaut d'ordre 3

- Ce sont les stries de rugosité, sortes de sillons tracés avec régularité dans le relief des ondulations par les outils de coupe.

Défaut d'ordre 4

- Plus irrégulières, parfois accidentels, ils correspondent à des arrachements, fentes...

I.5. Mécanique du contact**I.5.1. Types de contact**

Il s'agit de définir la nature et la géométrie du contact. Ces informations participeront en particulier à l'évaluation du champ de contrainte imposé au contact. Elles permettront aussi d'avoir une première idée sur les modes de lubrification à mettre en œuvre.

Par nature du contact, on entend la définition générale de ce qui constitue le contact: solide/solide liquide/solide, liquide et particule/solide, liquide et 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 en génie mécanique peut se regrouper en trois grandes familles (Figure I.3) :

- Les contacts de type ponctuel (typiquement sphère/plan).
- Les contacts linéiques (typiquement cylindre/plan).
- Les contacts surfaciques (typiquement parallélépipède/plan).

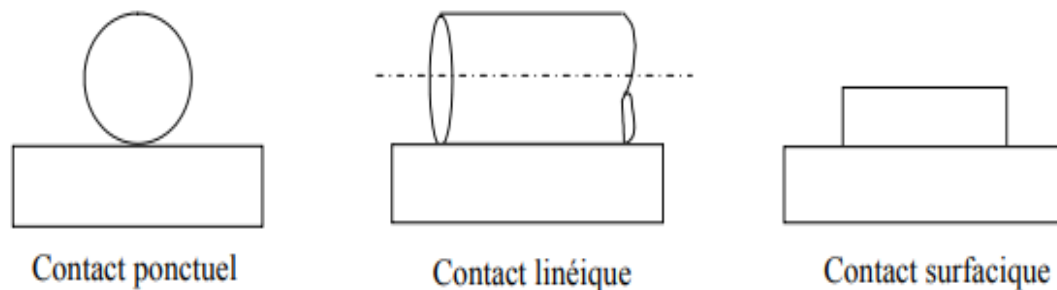


Figure I.3 : Schématisation des trois familles de contacts.

Les deux premières familles constituent le contact hertzien ou contacts concentrés (figure I.4). Le contact ponctuel est mis en œuvre dans des applications mécaniques telles que le contact roue/rail de chemin de fer, les contacts billes/bagues des roulements à billes, certains contacts came/poussoir ou came/linguet de moteurs thermiques, etc. le contact linéique est utilisé par exemple dans les roulements à rouleaux cylindriques ou coniques, ou dans les engrenages à denture droite à profil en développement de cercle. Ces deux premiers types de contacts sont virtuels car, dès que l'on applique un effort, une déformation élastique de la zone de contact se produit, induisant une aire de contact capable de supporter raisonnablement la charge appliquée. Les théories initiées par Hertz ont permis de modéliser ces contacts d'une manière très fidèle, en déterminant l'aire de contact et le champ de contraintes induit par les efforts appliqués.

On peut considérer comme contacts surfaciques le contact entre tourillon et coussinet de certains paliers (dans le cas où le jeu est faible), les emmanchements serrés, les joints d'étanchéité faciaux, les contacts curseurs/glissières, le contact garniture/disque de frein ou d'embrayage.


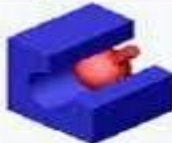
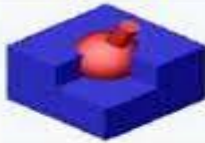
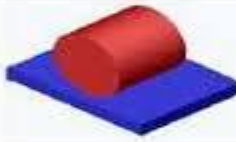
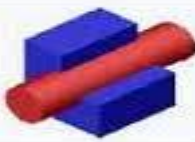

| | Plan | Cylindre | Sphère |
|----------|--|--|---|
| Sphère |  |  |  |
| Cylindre |  |  | |
| Plan |  | | |

Figure I.4 : Représentation des différentes familles de contact.

La géométrie du contact précise aussi les caractéristiques principales et les dimensions du contact : plans de courbure principaux et rayons de courbure principaux par exemple pour les contacts hertziens. Elle sera prise en compte dans la détermination du champ de contraintes généré par les efforts appliqués au contact.

I.5.1.1. Contact ponctuel ou linéique

Deux solides non conformes se touchent apparemment en un point, ou selon une ligne de contact. Si une force N est transmise de l'un à l'autre, on dit que la charge de contact est ponctuelle dans le premier cas (figure I.5), linéique dans le second (figure I.6).

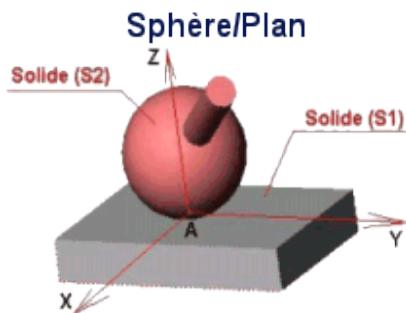


Figure I.5 : Contact ponctuel.

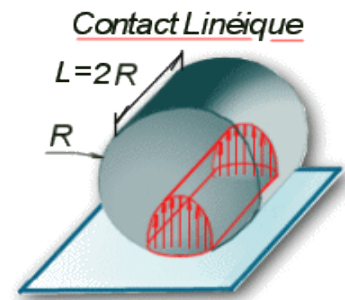


Figure I.6 : Contact linéique.

La charge de contact se répartit le long de la ligne de contact. Désignons par q la charge linéique répartie le long d'une ligne de contact de longueur l [7].

I.5.1.2. Contact cylindre - plan

Une approche similaire peut être appliquée au contact cylindre-plan. On considère un chargement linéique sur un massif semi-infini. Dans ce cas, le problème se résume à l'étude d'un contact bidimensionnel. Un modèle intégrant les déformations élastiques, élasto-plastiques mais aussi totalement plastique des aspérités.

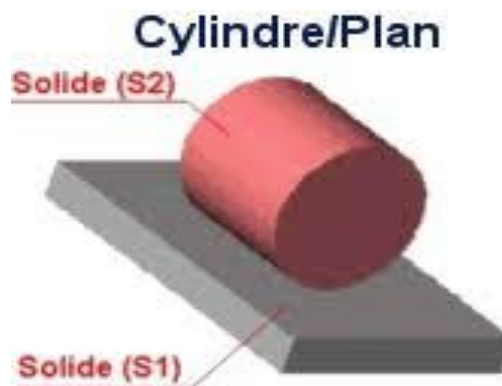


Figure I.7. Contact cylindre - plan.

I.5.1.3. Contact sphère - sphère

La théorie d'Hertz montre que lorsque deux solides de révolution sphérique sont mis en contact sous l'effet normal, l'aire de contact est un cercle de rayon (figure I.8). Les relations d'Hertz permettent d'établir différentes relations en fonction de l'effort normal, de la propriété élastique et de la géométrie de contact.

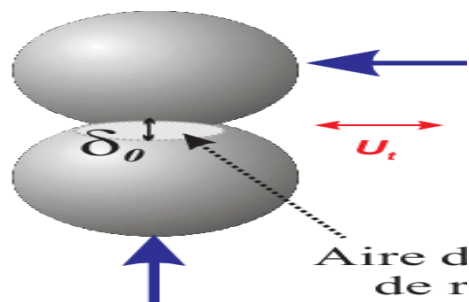


Figure I.8 : Contact sphère - sphère.

I.5.1.4. 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 I.9).

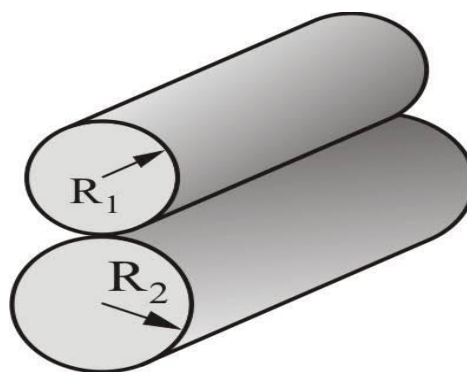


Figure I.9: Contact extérieur de deux cylindres parallèles [6].

I.5.1.5. Contact plan

Une pièce (2) supposée infiniment rigide est appliquée sur une plaque épaisse reposant elle-même sur une base rigide (figure I.10a). La pièce s'enfonce dans la surface de la plaque comme on peut l'observer facilement dans le cas d'un objet posé sur du sable, la pression de contact, maximale au milieu de d'appui, diminue vers le bord.

Le calcul de la distribution de la pression et des déformations est difficile, il a surtout été développé en mécanique des sols. Admettons pour simplifier (figure I. 10.b) que la pression soit uniformément répartie sur la surface d'appui d'aire A et qu'elle comprime une colonne imaginaire de même section.

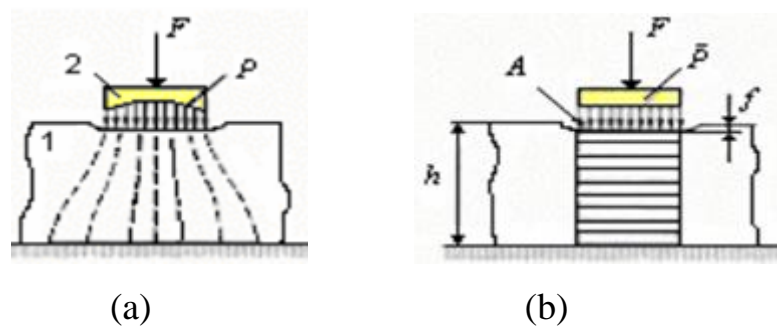


Figure I.10: (a) Enfoncement d'une pièce dans une plaque champ de force ; (b) modèle de calcul [7].

I.5.2. Surfaces de contact

I.5.2.1. Surface de contact nominale

Deux pièces conformes se touchent par une surface géométrique finie leur contact est dit surfacique. L'aire A contenue dans le contour de contact apparent est appelée surface de contact nominale ou apparente. La force normale d'appui étant N, on définit la pression de contact nominale ou apparente [7].

$$P=N/A \quad (I.1)$$

Ce serait la pression de contact qui régnerait entre les surfaces si elles étaient idéalement lisses et si les pièces étaient indéformables.

I.5.2.2. Surface de contact réelle

Agrandissons fortement la coupe de la surface de contact de deux corps (figure I.11). Même si les surfaces paraissent macro géométriquement parfaitement polies, elles présentent chacune des aspérités dont certaines touchent ponctuellement la surface opposée.

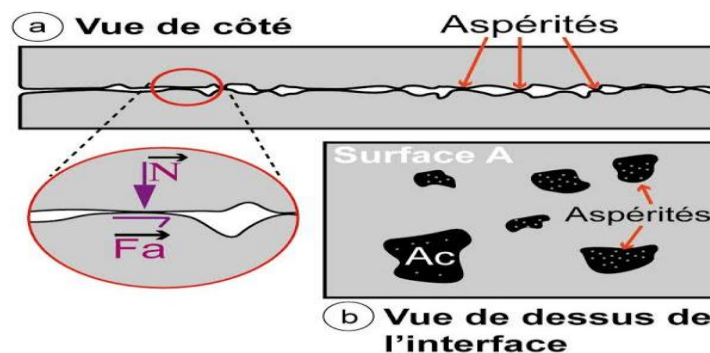


Figure I.11: Contact de deux surfaces [7].

L'aire de la surface de contact effective des aspérités est appelée surface de contact réelle A_r . Elle est naturellement plus petite que la surface apparente, c'est pourquoi la pression de contact réelle P_r est beaucoup plus forte que la pression nominale P .

I.5.3. Contact des aspérités

En considérant maintenant l'ensemble de la surface apparente de contact, on constate qu'à faible charge, les pièces ne se touchent que par les aspérités les plus élevées

Les aspérités s'écrasent et les pièces se rapprochent au fur et à mesure que la charge F augmente. En fin, la surface comprend des aspérités en état de déformation élastique et d'autre en état de déformation plastique (figure I.12).

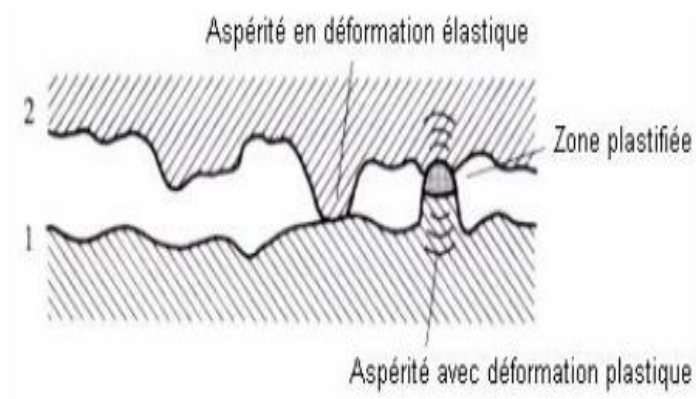


Figure I.12 : Surfaces en contact par leurs aspérités [7].

CHAPITRE II

FROTTEMENT DES SURFACES DE CONTACT DES COUPLES DE MATERIAUX

II.1. Introduction

Le frottement sec désigne un ensemble de phénomènes et de mécanismes qui intervient en absence de lubrifiant 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 s'activent dès la mise en contact des solides et dans certains cas divers contaminants surfaciques peuvent être présents [8].

Plusieurs recherches se sont intéressées par la suite à cette théorie et il a été observé que pour les matériaux ductiles, les aspérités se déforment plastiquement, produisant une croissance de l'aire réelle de contact limitée par les contraintes de cisaillement.

Les premières études sur le frottement sont dues à Léonard de Vinci et datent du début du 16^e siècle, d'Amontons (1699) et Coulomb (1781), le frottement était considéré comme un phénomène de nature exclusivement surfacique. Le modèle des jonctions adhésives, établi en 1950 par Bowden et Tabor [9], représente incontestablement une avancée majeure dans la compréhension des mécanismes du frottement, car il permet d'associer le frottement aux propriétés mécaniques et géométriques des surfaces en contact. C'est d'ailleurs sur la base de cette hypothèse des jonctions adhésives, que Greenwood-Williamson [10] a proposé en 1966 un modèle à aspérités qui, suite aux travaux d'Archard [11], fournit une justification de la proportionnalité entre la force de frottement et la charge normale.

L'interface est d'ailleurs parfois considérée comme un troisième matériau avec des propriétés mécaniques spécifiques. A cette complexité, des mécanismes en jeu s'ajoutent à la difficulté des mesures expérimentales. Ceci explique que, malgré les nombreuses études sur le sujet, le lien entre les mécanismes microscopiques et le comportement macroscopique ne soit pas encore clairement élucidé. Cependant, l'expérience permet d'établir certains faits concernant ce phénomène ; ils ont conduit à l'élaboration de lois simples connues sous le nom de lois de coulomb [12].

- la force de frottement est indépendante de l'aire apparente de contact,
- la force de frottement est proportionnelle à la force qui presse les deux surfaces l'une contre l'autre,
- la force de frottement cinétique est indépendante de la vitesse relative des deux surfaces.

II.2. Frottement

II.2.1. Définition

Le frottement peut être défini comme la force qui agit entre deux corps à leur surface de contact, de façon à freiner le déplacement de l'une par rapport à l'autre [13].

II.2.2. Force et coefficient de frottement

Par définition, le coefficient de frottement m est le rapport de la force tangentielle de frottement, lorsque les pièces glissent, à la force normale qui les applique l'une sur l'autre

$$\mu = F/N \quad (\text{II.1})$$

II.2.3. Importance du coefficient de frottement

Le coefficient de frottement est l'expression directe de l'énergie dépensée qui se dissipe sous forme de chaleur. Cette énergie est proportionnelle aux trois facteurs P , V et μ correspondant respectivement à la charge, à la vitesse et au coefficient de frottement. Le

réseau de contraintes mécaniques superficielles évolue dangereusement avec l'accroissement du coefficient de frottement, sauf, cas particuliers de l'utilisation positive du frottement, par exemple pour accroître les caractéristiques d'adhérence entre deux corps (mécanismes d'entraînement, assemblages frittés...) ou pour absorber de l'énergie (freinage).

II.2.4.Type de frottement

II.2.4.1. 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. On distingue plusieurs phénomènes susceptibles de s'opposer au glissement tel que :

II.2.4.1.1 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 [14].

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 [15] 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, la résistance au cisaillement

$$\tau = P/A_r \quad (\text{II.2})$$

Le coefficient de frottement peut alors s'exprimer par [9] :

$$\mu = \tau/H \quad (\text{II.3})$$

La valeur de τ correspond alors au moins dur des deux matériaux et H représente sa dureté.

II.2.4.1.2 Labourage

Une aspérité dure chargée par une force normale s'enfonce dans une surface tendre (figure II.1(a)). 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 (figure. II.1(b)). 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 (figure II.1(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.

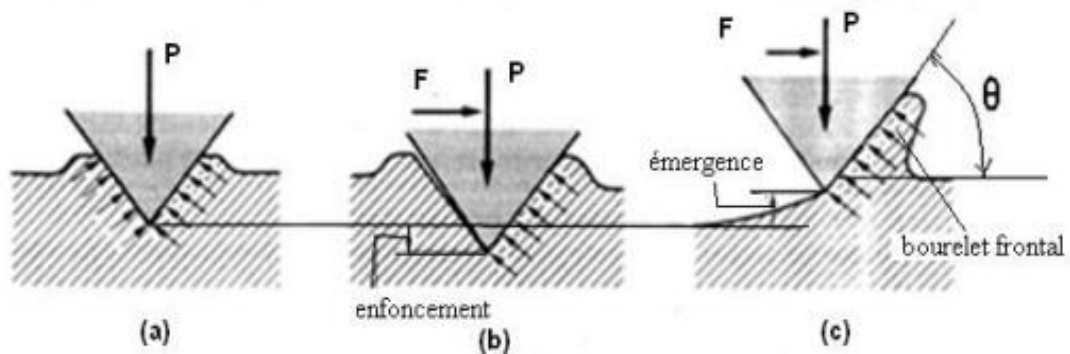


Figure II.1. Début du labourage d'une surface tendre par une aspérité dure: (a) enfoncement statique; (b) premier mouvement par une force tangentielle; (c) émergence au début du glissement.

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 (figure. II.2), des petits morceaux sont arrachés à la surface.

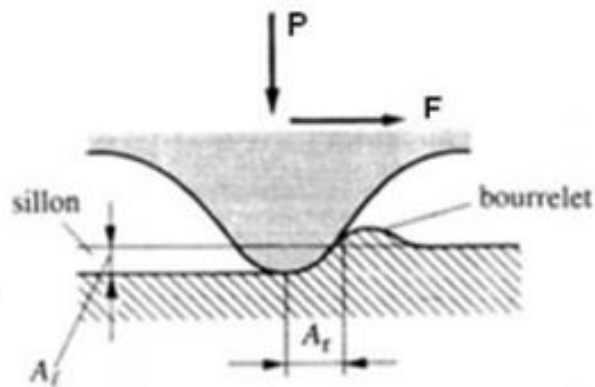


Figure II.2 : Sillon de labourage et bourellet frontal.

Après une certaine distance de glissement, des débris d'usure enfermés entre les corps s'incrusteront dans la surface la plus tendre (figure II.3). 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 [16].

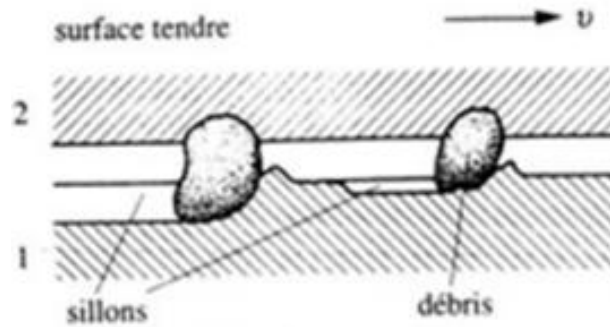


Figure II.3: Labourage par des débris d'usure.

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 [17]. E. Rabinowicz [18] a montré que lorsque les aspérités sont coniques, la composante du frottement liée au labourage est reliée à la tangente de la pente de l'aspérité telle que :

$$\mu = \frac{tg\theta}{\pi} \quad (\text{II.4})$$

En tenant compte de l'importance de la rainure, donc de la géométrie de l'aspérité, M. Braunovic a proposé la relation suivante [19]:

$$\mu = 2/\pi \left\{ \left(\frac{2r}{l} \right)^2 \sin^{-1} \left(\frac{w}{2r} \right) - \left[\left(\frac{2r}{l} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (\text{II.5})$$

Avec r le rayon des particules d'usure et l la largeur de la rainure.

II.2.4.2 Frottement par roulement

La force de frottement par roulement se manifeste lorsque deux corps roulent, sans glisser, l'un sur l'autre; la dissipation étant en ce cas due à l'élasticité imparfaite des matériaux.

Supposons une roue de rayon r soumise à une charge N roulant sans glisser sur un plan (figure II.4): il est possible d'observer que le matériau dont elle est constituée subit,

à l'approche du point de contact, une compression et, une fois le point de contact dépassé, un relâchement élastique.

Si le matériau dont la roue est constituée n'est pas parfaitement élastique, une part de l'énergie dépensée en compression n'est pas restituée lors de la phase suivante (phase de restitution) mais se dissipe sous la forme de chaleur pour compenser les résistances de frottement interne du matériau.

Si l'on raisonne en termes de forces, et non plus en termes d'énergies, on peut dire que la distribution de pression dans le contact n'est pas symétrique à la direction de la force N .

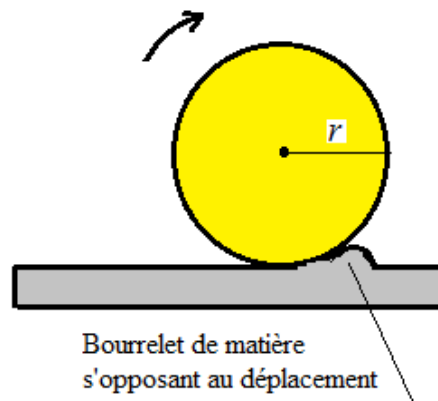


Figure II.4 : Frottement par roulement.

L'aire de contact est montrée sur la figure II.5, un microglissement se fait au niveau de cette surface.

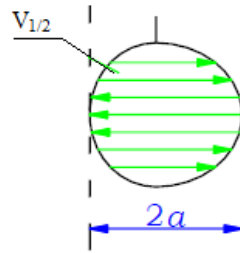


Figure II.5 : Aire de contact.

Le Frottement de roulement est déterminé par :

$$F_r = f_g \cdot a \cdot P / r \quad (\text{II.6})$$

$f_r = f_g \cdot a / r$: facteur de frottement de roulement.

II.2.4.3. Réduction du frottement de roulement

En roulement, il y a toujours du frottement de glissement (microglissement) qui résulte de l'adhérence, sinon, il n'y a pas de roulement.

- Utiliser des éléments roulants de grand rayon.
- Utiliser des matériaux avec un grand module de rigidité (module de Young).

CHAPITRE III

USURE DES SURFACES DE CONTACT DES COUPLES DE MATERIAUX

III.1.Introduction

L'usure est un problème difficile et sujet à discussion. Elle est souvent définie par la perte de matière ou de fonction d'un mécanisme suite à une détérioration due au frottement. 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.

III.2.Définition

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 [19].

III.3.Différents types d'usure

Il existe différents types d'usure, mais on peut citer cinq principaux, qui sont liés au frottement.

III.3.1. 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 III.1). Pour le transfert mécanique, plusieurs hypothèses ont été développées.

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 III.1 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.



Figure III.1: Tourillon avec diverses traces d'usure.

Les débris ont un effet de séparation des antagonistes, supportent les pressions. L'usure et le coefficient de frottement deviennent moindres [20].

Il faut différencier l'usure douce de l'usure sévère ou grippage. Le premier cas a lieu lorsqu'on a cisaillement de ces liaisons, tandis que le second apparaît lorsqu'il y a arrachement de matière de l'une des surfaces, d'où la formation d'un film de transfert, collé à la surface antagoniste

III.3.1.1. 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 (1953), 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 :

$$V = a K/3. NL/H \quad (\text{III .1})$$

V : Taux d'usure adhésive ou le volume arraché [mm³].

a: Coefficient caractérisant le type de frottement :

a =1 Pour le frottement sec ou à très faible vitesse.

a <1 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 [21].

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

III.3.2. Usure abrasive

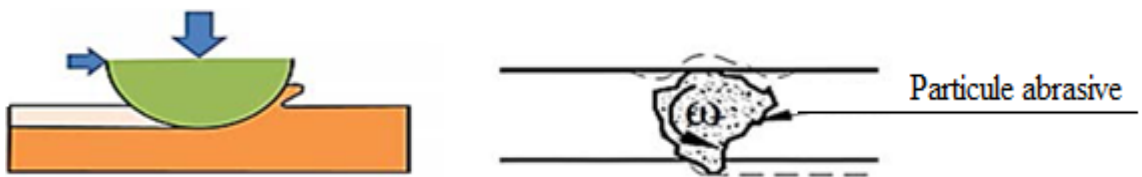
Elle se caractérise par la présence dans le contact d'un état de surface rugueux ou par pénétration dans le matériau le plus tendre de particules dures provenant des débris d'usure du contact ou de la pollution du milieu. Ce mécanisme de dégradation qui fait intervenir dans les premiers instants uniquement les corps antagonistes, devient rapidement une usure à trois corps (figure III.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) [22].

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 III.2b).



(a)



(b)

Figure.III.2 : a) Etat de surface présentant une usure par abrasion ; b) Mécanisme d'usure par abrasion [23]

III.3.2.1. Quantification de l'usure abrasive

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

$$V = \frac{kfl}{3H} \tag{III.2}$$

Avec

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

V : le volume enlevé du matériau par abrasion [m³]

H_a : La dureté de l'abrasif [N/mm²]

H : la dureté du matériau soumis à l'abrasion [N/mm²]

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

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:

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

$\frac{dV}{dl}$: 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 (III.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.

III.3.3. Usure corrosive (ou tribochimique ou tribocorrosive)

C'est un système à trois composantes, où interviennent la réactivité chimique entre les surfaces. On a une réactivité chimique avec le milieu environnant et une réactivité physico-chimique avec les débris. Ce type de dégradation résulte d'une seule ou de plusieurs réactions chimiques sous l'effet d'agent corrosif (environnement, lubrifiant) et des contraintes mécaniques pendant le frottement [23].

Suivant l'état structural superficiel, il se crée des oxydes réactionnels dépendant de l'environnement. Suite au frottement entre les surfaces, la rupture des aspérités qui s'oxydent, forme des débris en général très stables et très durs. Ces derniers jouent alors un rôle abrasif et viennent dégrader les surfaces antagonistes et donc entretenir l'usure. Par contre, il est possible de rencontrer une configuration moins agressive par la formation de films d'oxydes adhérents à la surface d'un des antagonistes et

suffisamment résistants au cisaillement pour jouer un rôle protecteur comme indique la figure III.3.



Figure III.3: Etat de surface présentant une usure par corrosion [24].

III.3.4. Usure par oxydation

La présence d'oxydants dans les atmosphères courantes tend à favoriser la formation d'un film d'oxyde favorable au glissement. Dans un contact métallique en frottement, la puissance mécanique dissipée à l'interface entraîne un échauffement qui favorise l'oxydation.

Si un alliage est oxydé, les produits de la réaction qui en résulte, se présentent sous forme de couches séparées ou comme une mixture hétérogène (figure III.4) [25]



Figure III.4 : Formation des couches d'oxydes superposées sur la surface du fer à 625 °C après 24 h.

III.3.5. Usure par fatigue

La fatigue est le phénomène de formation et de propagation de fissures (figure III.5) sous l'action répétée d'efforts alternés. L'usure par fatigue est lente est induite par le frottement de roulement ou de roulement avec glissement. Des charges trop fortes peuvent détériorer les surfaces.

On peut remarquer des déformations plastiques sur les métaux ductiles et des cassures sur les matériaux fragiles.

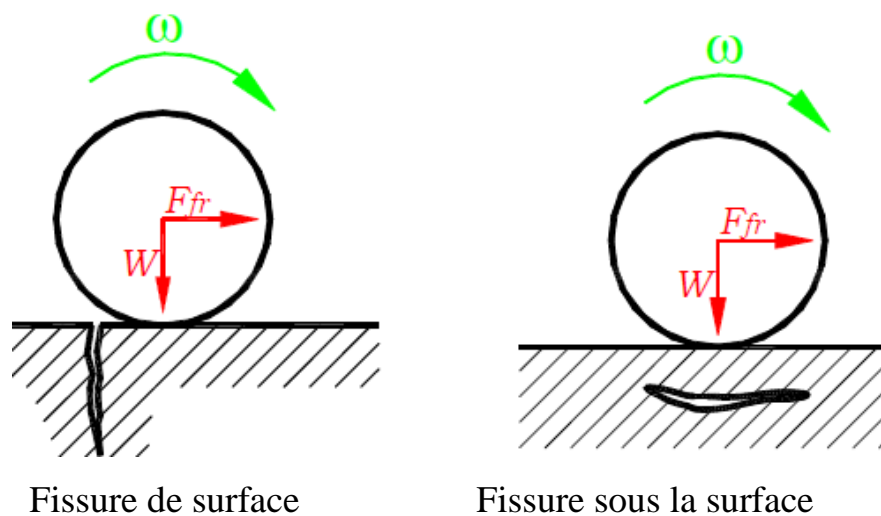


Figure III.5 : Fissures générées par fatigue.

III.3.5.1. Modification structurale du a la fatigue.

Dans un premier temps, il y a augmentation de la densité de dislocations en surface provoquant un écrouissage superficiel. Dans un deuxième temps, l'énergie de frottement transmise à la surface de ce matériau a pour effet de redistribuer cette densité de dislocations en un réseau plus stable par glissement ou montée de dislocations. Il existe alors un déséquilibre entre les contraintes internes. En surface, suite à une densité plus élevée de dislocations, des contraintes de compression sont générées alors qu'en sous-couches, la densité de dislocations étant moindre, des cavités se forment, favorisant la fissuration [26-27].

CHAPITRE IV

DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX UTILISES

IV.1. Introduction

L'une des causes de l'endommagement en service des pièces mécaniques provient du frottement et l'usure de surfaces.

Parmi les objectifs du présent travail, la compréhension de l'influence la dureté sur le comportement tribologique des aciers à étudier en tenant compte particulièrement l'étude de l'évolution du coefficient de frottement, l'usure ou la perte de masse du pion et l'état de surface après les tests tribologiques.

IV.2. Dispositif expérimental

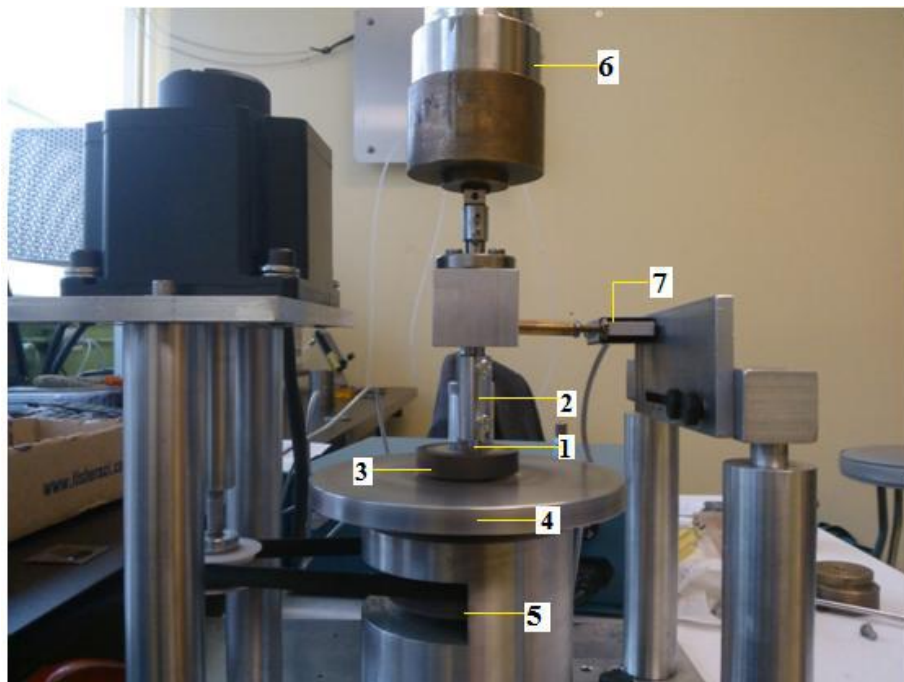
IV.2.1. Présentation générale du tribomètre

Le principe de base de la machine d'usure (tribomètre) par glissement comme l'indique la figure III.1. consiste à créer un certain frottement entre deux pièces, l'une d'entre elles étant en général immobile.

L'usure est alors caractérisée par la quantité de matériau perdue lors de ce frottement. La méthode la plus souvent utilisée est celle d'une tige qui s'appelle pion frottant sur un disque. Une force déterminée est appliquée sur le pion qui génère ainsi des sillons circulaires à la surface du disque.

Le pion (1) utilisé est immobile, de forme cylindrique. Il est logé dans un cylindre creux(2). Il est chargé contre un disque par des masses de poids variable. Le disque (3) est animé d'un mouvement rotatif continu, fixé sur un support (4) qui tourne à des vitesses de rotation variables. La transmission de la puissance du moteur électrique au disque se fait à l'aide d'un réducteur de vitesses(5). La force normale qui appui le pion sur le disque tournant est effectuée à l'aide des masses mortes (6) reposant sur un support au-dessus du pion (capacité maximale 40N).

La force de frottement produite dans le contact dynamique entre le pion et le disque est enregistrée d'un capteur de force (7). A partir des valeurs de la force de frottement, du rayon moyen de la piste de frottement du disque et la valeur de la force normale appliquée sur le pion, nous pouvons obtenir l'évolution instantanée du coefficient de frottement. L'acquisition des données se fait en continue grâce à une console d'acquisition branché sur un PC.



(1) Pion; (2) Porte-pion; (3) Disque; (4) Support; (5) Réducteur de vitesse; (6) Masses mortes de la charge normale; (7) Cellule de charge pour la force de frottement.

Figure IV.1: Système de pion-disque.

Le contact glissant entre couple pion-disque et sous l'effet de la force normale d'application, crée une usure de la surface apparaissant sous forme de piste circulaire autour de l'axe de rotation du disque (Fig. IV.2).

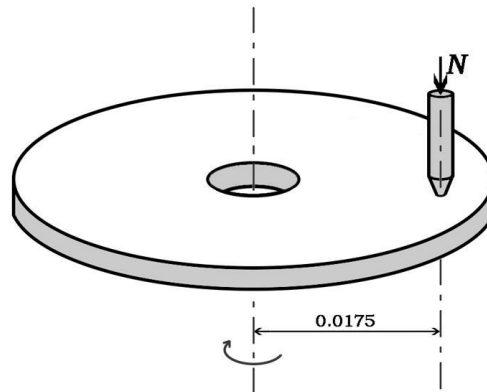


Figure IV.2 : Couple pion – disque.

IV.3. Identification des matériaux utilisés

IV.3.1. Matériaux du pion

Les deux matériaux utilisés sont de fabrication locale, utilisés réellement pour la fabrication des galets. Ces deux matériaux sont :

IV.3.1.1. Acier C45

C'est un acier de construction mécanique non allié pour traitement thermique défini essentiellement par sa composition chimique (0.45 à 0.51% de carbone). Il est largement utilisé dans la fabrication des bielles, essieux, tiges de piston, vilebrequins, arbres moyens, galets des ponts roulants, pièces d'armes ...etc. Il est employé lorsque les caractéristiques mécaniques demandées sont sévères et nécessitent des transformations de structure par traitements thermiques. Le pourcentage de carbone doit être connu avec précision [28,29].

IV.3.1.2. Acier 42CrMo4

Cet alliage ferreux est parmi les matériaux les plus utilisés et les plus étudiés. Est un acier pour trempe et revenu, qui présente un bon compromis entre dureté et résilience à l'état trempé et revenu.

IV.3.2. Matériau du disque

Le matériau du disque est l'acier C55, utilisé pour la fabrication des pièces soumises aux chocs et nécessitant une très bonne résistance tels que rails, axes, clavettes, lames de scie vis sans fin, canon de fusil...etc. [30]

IV.3.3. Composition chimique

Le tableau IV.1 donne la composition chimique des échantillons suivant la norme EN 10277-2.

| Elément | C | Cr | Mo | Mn | Si | P | S |
|---------|-------------|-----------|-------------|-------------|-------------|---------|---------|
| C45 | 0,42 - 0,50 | ≤ 0,40 | ≤ 0,10 | 0,50 - 0,80 | ≤ 0,40 | ≤ 0,045 | ≤ 0,045 |
| 42CrMo4 | 0,38 - 0,43 | 0,80- 1,1 | 0,15 - 0,25 | 0,75 - 1,0 | 0,15 - 0,30 | ≤ 0,035 | ≤ 0,040 |
| C55 | 0,50 - 0,60 | | 0,60 - 0,90 | ≤ 0,040 | ≤ 0,050 | ≤ 0,035 | ≤ 0,035 |

Tableau IV.1: Composition chimique (pds%) des échantillons.

IV.4. Présentation des couples tribologiques

IV.4.1. Disque

Le disque est de diamètre 50 mm et d'une épaisseur de 10 mm, il possède un trou lamé au centre, pour sa fixation à l'aide d'une vis sur le support du tribomètre (figure IV.3).

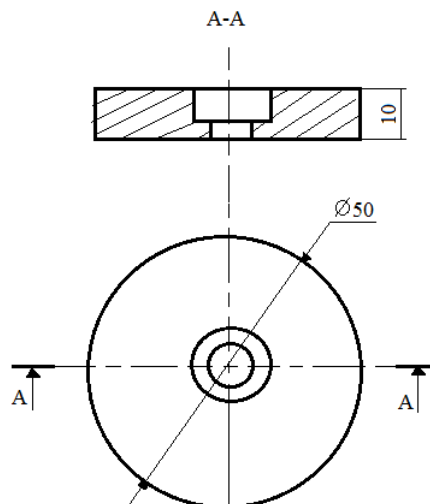


Figure IV.3 : Dessin de définition du disque.

IV.4.2. Pion

Il s'agit d'une tige de longueur de 25 mm et de diamètre égale 6 mm, en bout conique avec une surface de contact plane de 2 mm de diamètre (figure IV.4).

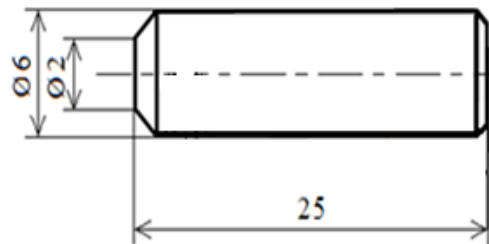


Figure IV.4 : Géométrie du pion.

IV.5. Préparation des échantillons

IV.5.1. Usinage des échantillons

Les échantillons ont été réalisés à partir des barres laminées. La barre de chaque type d'acier d'échantillon est découpée sous la forme et les dimensions voulues à l'aide d'une scie mécanique, puis elle ont été passés par le poste d'usinage (tournage).

IV.5.2. Traitements thermiques appliqués

IV.5.2.1. Introduction

Techniquement, un traitement thermique est défini par la variation de la température du métal en fonction du temps.

D'une façon générale, les traitements thermiques ne modifient pas la composition chimique de l'alliage, mais ils permettent de modifier (en général améliorer) les caractéristiques des matériaux suivantes :

- . Résistance à l'usure.
- . Résistance à la corrosion.
- . Résistances mécaniques, telles que la dureté (H), la résistance à la traction (R_m), la résilience (K) et l'allongement (A).

Les traitements thermiques appliqués sur les échantillons sont la trempe puis le revenu.

On a mis les échantillons dans un four électrique de type NABER dont la température maximale est 1100 °C (figure IV.5).



Figure IV.5 : Four électrique "Nabertherm".

La trempe et le revenu permettent de modifier et d'ajuster les propriétés mécaniques de l'acier, notamment la dureté.

Le durcissement des matériaux se déroulait en trois étapes: l'austénitisation, la trempe et le revenu. L'austénitisation consiste d'abord à chauffer les matériaux puis de les maintenir pendant 20 minutes à la température 830°C dans leur domaine austénitique pour l'homogénéisation de la structure. La trempe consiste en un refroidissement rapide des matériaux austénitisés pour formation de la martensite. Elle a été effectuée à l'eau,

en ajoutant environ 10 % de chlorure de sodium pour les pions C45 et l'huile pour les pions en acier 42CrMo4 et les disques en acier C55.

Le taux de martensite après trempe est majoritaire. Un revenu a été effectué pour supprimer les tensions internes qui ont pris naissance au moment de refroidissement brutal et diminuer la fragilité du métal. Le processus opératoire du revenu est le chauffage des disques à la température 350°C pour avoir une dureté 52 ± 1 HRC et les pions à des températures différentes : 250 °C, 350 °C, 450 °C et 550 °C puis de les maintenir pendant 20 minutes à ces températures et en fin, un refroidissement lent à l'air pour obtenir des duretés : 50HRC, 45HRC, 40HRC et 35HRC.

IV.5.3. Le polissage

Le polissage dans notre cas est obtenu manuellement à l'aide d'une Polisseuse de type Knuth-rotor-2 (figure IV.6), vise à rendre les surfaces uniformes. Il consiste à abraser la surface sous une charge constante, à l'aide de papiers revêtus de carbure de silicium (SiC) à indice de granulation progressif jusqu'à 1000, montés sur des tourets de polissage dont la vitesse est de 300 tr/min, équipés d'un système d'arrosage à l'eau courante pour éviter l'échauffement des échantillons.

La diminution de la taille des grains d'abrasif d'un papier à l'autre permet d'affiner progressivement l'état de polissage et de diminuer la rugosité moyenne compte tenu de la différence de dureté existant entre le carbure et la matrice métallique, la surface à polir se couvre de rayures de plus en plus fines.



Figure IV.6 : Polisseuse de type Knuth-rotor-2.

IV.6. Essai de microdureté

IV.6.1. Introduction

Cet essai consiste à mesurer l’empreinte faite dans une partie de surface du matériau destiné, ceci est utile pour estimer la résistance à l’usure et étudier la structure du matériau.

IV.6.2. Principe de micro dureté

Du point de vue scientifique, on peut distinguer les essais de dureté des essais de micro dureté par le fait que les premiers intéressent un nombre quelques fois très important de grains de métal, alors que les seconds sont consacrés en principe à définir des propriétés à l’intérieur des grains soit de la matrice, soit de ses divers constituants [31].

L’obtention de différentes valeurs de la dureté des échantillons s’est faite à l’aide d’un microduromètre portatif muni par un afficheur digital, comme indique figure IV.7.



Figure IV.7 : Microduromètre.

IV.7. Observation microscopique

Les caractéristiques des endommagements observées sur la face usée des échantillons sont réalisées par un microscope optique de type Métallurgique Microscope (figure IV.8).



Figure IV.8 : Microscope optique de type Métallurgique Microscope

IV.8. Enregistrements des profils de la rugosité

Le disque et le pion ont été polis au papier émeri type 1000 avant chaque essai. A l'aide d'un rugosimètre à stylet de type "MITUTOYO SurfTest - 4" (figure IV.9). L'afficheur a donné une moyenne de rugosité $R_a = 0,06\mu\text{m}$ avant les tests tribologiques.



Figure IV.9 : Rugosimètre à stylet de type "MITUTOYO SurfTest - 4".

IV.9. Analyse chimique de la piste d'usure

L'analyse chimique de la piste d'usure du disque est effectuée par un analyseur portatif (figure IV.10) qui dure environ 30 secondes de bombardement pour afficher le résultat de cette analyse, soit qualitativement ou bien quantitativement.



Figure IV.10 : Analyseur chimique portatif.

IV.10. Mesure de la perte en masse (usure du pion)

L'usure est déterminée par la mesure de la perte en masse. Avant chaque essai, le pion est bien nettoyé puis pesé à l'aide d'une microbalance sensible de précision 0,1mg (figure IV.11). Après l'expérience, il est renettoyé est pesé une deuxième fois. L'usure du pion est :

$$U = \Delta m = m_i - m_f$$

m_i : la masse initiale du pion.

m_f : la masse finale du pion.

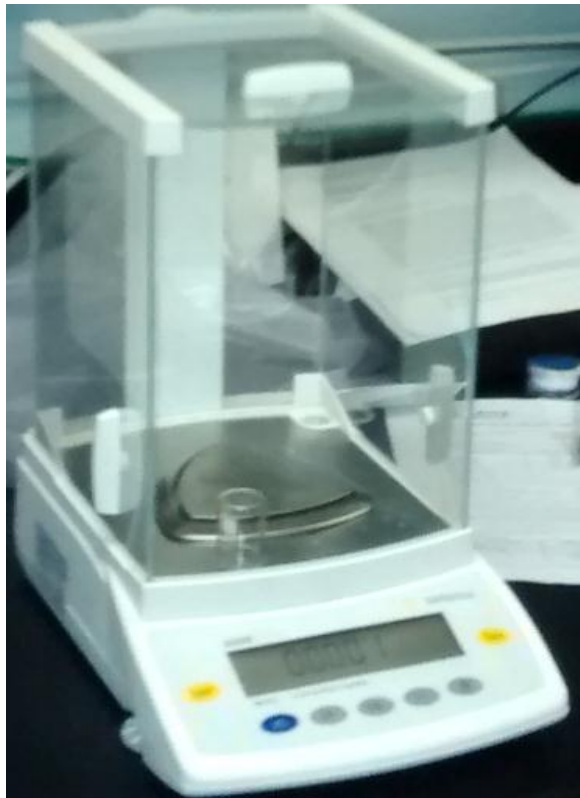


Figure IV. 11 : Microbalance de précision 0,1mg.

CHAPITRE V

PRESENTATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET
DISCUSSION

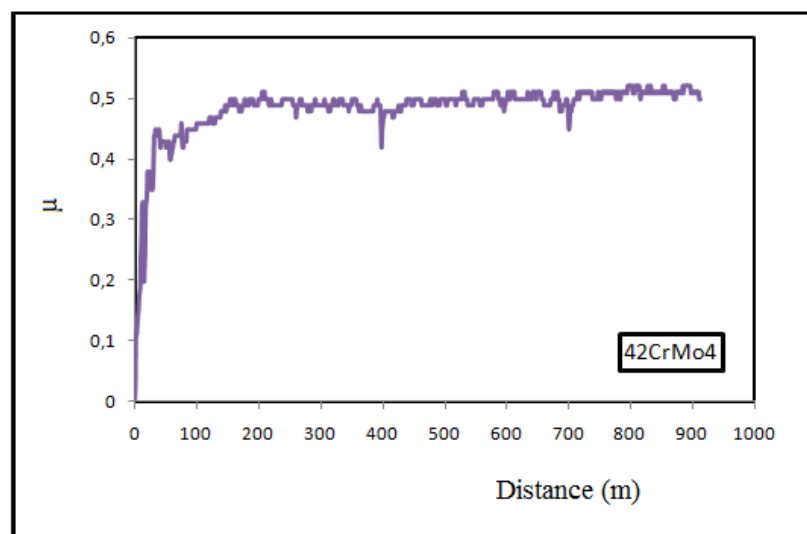
V.1. Introduction

Nous présentons les résultats expérimentaux obtenus à partir des essais de frottement effectués pour les différents couples pion-disque.

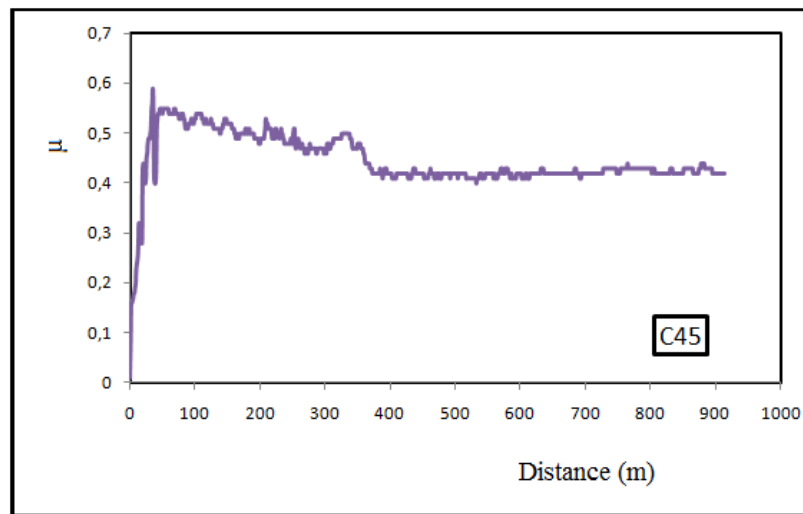
Dans tous les essais, on a fixé le temps (30mn pour chaque test) et le matériau du disque ayant pour dureté **moyenne 52 HRC**. La charge normale appliquée est constante (25N), ainsi que pour la vitesse linéaire de glissement (0,5m/s).

V.2. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la distance de glissement

La variation du coefficient de frottement en fonction de la distance de glissement est illustrée par la figure V.1 Le coefficient de frottement connaît une période de rodage pendant la première centaine de mètres suivie d'un régime de frottement relativement stable.



(a)



(b)

Figure V.1 : Evolution du coefficient de frottement en fonction de la distance de glissement à la dureté 40HRC des pions pour:(a) Couple 42CrMo4/C55 ; (b) Couple C45/C55.

V.3. Variation du coefficient de frottement μ en fonction de la dureté du pion

Le tableau V.1 regroupe les valeurs du coefficient de frottement des couples C45/C55 et 42CrMo4/C55.

| | 42CrMo4/C55 | C45/C55 |
|--------------|-------------|---------|
| Dureté (HRC) | M | μ |
| 35 | 0,41 | 0,73 |
| 40 | 0,51 | 0,4 |
| 45 | 0,43 | 0,7 |
| 50 | 0,52 | 0,57 |

Tableau V.1 : Valeurs du coefficient de frottement des couples C45/C55 et 42CrMo4/C55 en fonction de la dureté.

La figure V.2 illustre la variation du coefficient de frottement mesuré à l'état stationnaire en fonction de la dureté du pion pour les couples 42CrMo4/C55 et C45/C55. Les courbes de coefficient de frottement présentent des fluctuations. Les coefficients de frottement du couple 42CrMo4/C55 sont généralement faibles par rapport au couple C45/C55. La variation du coefficient de frottement n'est pas significative par rapport à la dureté du matériau du pion.

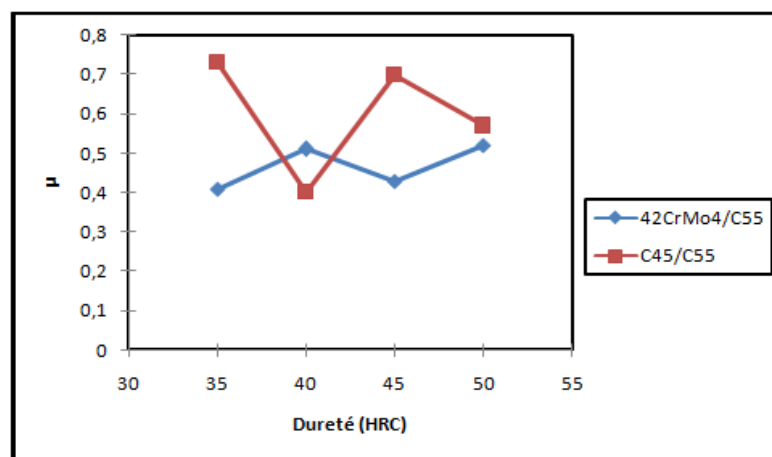


Figure V.2: Variation du coefficient de frottement μ en fonction de la dureté du pion.

V.4. Variation de l'usure en fonction de la dureté du pion

Le tableau V.2 rassemble les résultats de la perte en masse des pions en fonction de leurs duretés pour les deux couples.

| | C45 | 42CrMo4 |
|--------|----------------------|----------------------|
| Dureté | Usure (10^{-3} g) | Usure (10^{-3} g) |
| 35 | 5,3 | 5,5 |
| 40 | 3,5 | 4,1 |
| 45 | 2,7 | 3,1 |
| 50 | 0,9 | 1,8 |

Tableau V.2 : Résultats de la perte en masse des pions en fonction de la dureté.

La figure V.3 indique la variation de l'usure du pion en fonction de sa dureté. On remarque que l'usure diminue avec l'augmentation de la dureté du pion. Elle est maximale avec la plus faible dureté 35HRC et minimale avec la grande dureté 50HRC. Les deux courbes ont la même allure et leurs valeurs, en général, sont rapprochées sauf pour la dureté 50HRC.

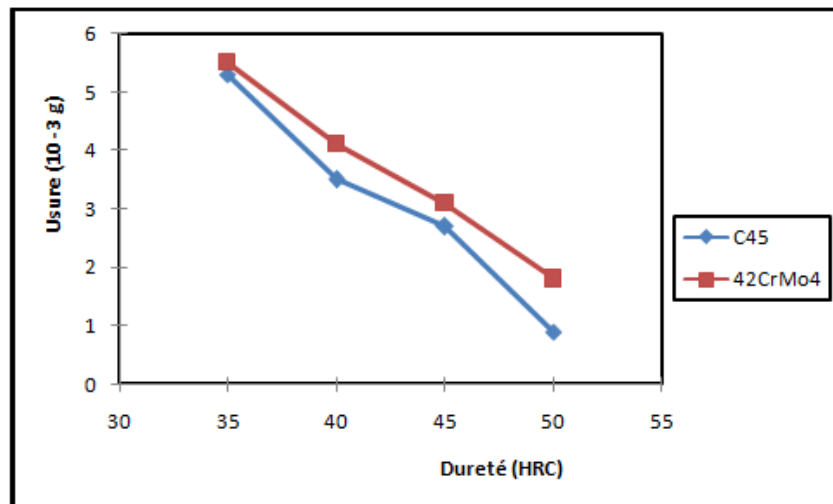


Figure V.3: Variation de l'usure du pion en fonction de sa dureté.

V.5.Mesure de l'état de surface

Le tableau V.3 suivant contient les valeurs de la rugosité arithmétique moyenne R_a de la piste d'usure du disque.

| | C45 | 42CrMo4 |
|--------------|-------------------------|-------------------------|
| Dureté (HRC) | R_a (μm) | R_a (μm) |
| 35 | 1,06 | 0,43 |
| 40 | 0,59 | 0,23 |
| 45 | 0,26 | 0,29 |
| 50 | 0,22 | 0,46 |

Tableau V.3 : Valeurs de la rugosité arithmétique moyenne R_a de la piste d'usure du disque en fonction de la dureté.

La courbe illustrée sur la figure V.4 montre la variation de la rugosité arithmétique moyenne R_a de la piste d'usure du disque en fonction de la dureté du pion.

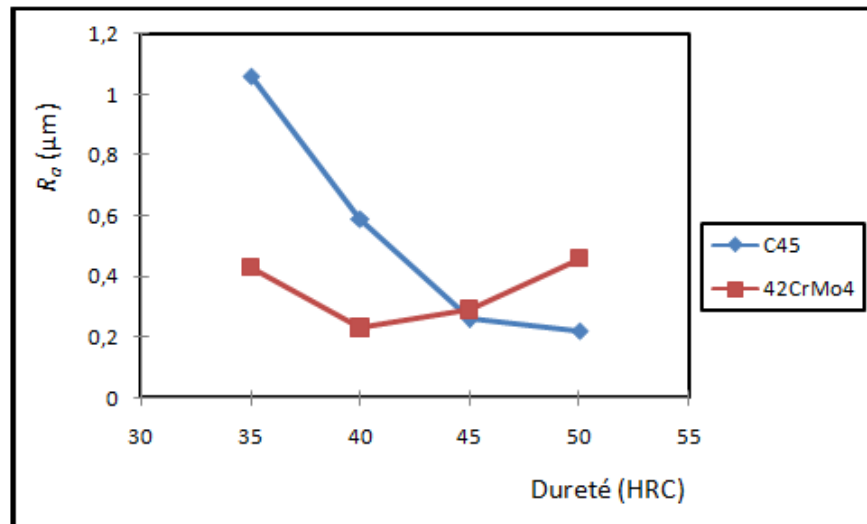


Figure V.4: Variation de R_a de la piste d'usure du disque en fonction de la dureté du pion.

V.6. Discussion des résultats obtenus

V.6.1. Influence de la distance de glissement sur le coefficient de frottement

L'augmentation du coefficient de frottement enregistrée au début de l'essai est justifiée par la déformation plastique qui est due par l'écrasement des aspérités d'une surface contre l'autre et cisaillement des particules d'usure qui jouent un rôle abrasif.

L'augmentation de la surface réelle de contact A_r durant la période du régime établi diminue la pression réelle et les surfaces antagonistes deviennent lisses, le coefficient de frottement du couple tend vers une valeur stable inférieure à celle des premiers instants de frottement.

Les légères fluctuations enregistrées durant le régime établi sont probablement dues aux vibrations du système, aux battements de la surface du disque en contact avec le pion ou de quelques particules emprisonnées.

V.6.2. Variation du coefficient de frottement μ en fonction de la dureté du pion

Les valeurs moyennes du coefficient de frottement, mesurées à l'état stationnaire par rapport à la charge normale appliquée (25N) sont comprises dans l'intervalle [0,4 ; 0,8]. Une certaine fluctuation observée au niveau de la variation du coefficient de frottement en fonction de la dureté pour chaque courbe, ce qui signifie qu'aucune tendance n'a été remarquée.

L'augmentation du coefficient de frottement du couple C45 / C55 par rapport au couple 42CrMo4 / C55 se traduit par une augmentation de la surface de contact liée à une plastification des surfaces (figure V.5) qui concerne au premier lieu la notion de résistance à la déformation (limite élastique R_e) [32,33]. La diminution du coefficient de frottement est associée à l'élimination du contact métal-métal et résulte d'un contact oxyde-oxyde [34].

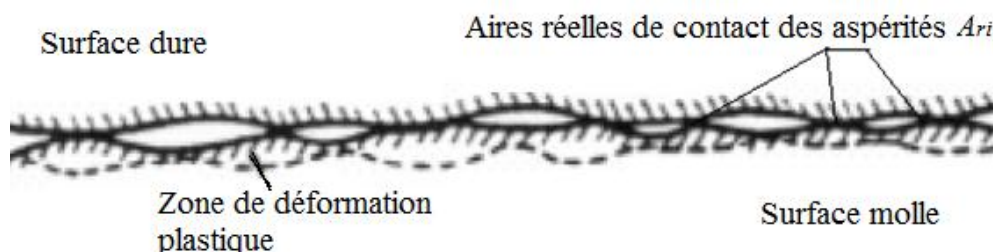


Figure V.5 : Contact des aspérités en frottement [35].

La perte de masse (l'usure du pion) croît avec la diminution de la dureté des pions, ceci se traduit par un accroissement de la surface réelle de contact et ensuite par une augmentation de la densité de jonctions et de la température à l'interface, ce qui facilite la formation des débris d'usure.

L'accroissement de la dureté limite les points de contact entre les surfaces antagonistes et réduit le taux d'usure. L'augmentation de la dureté du pion est basée sur sa microstructure et son pourcentage de cémentite. Les structures martensitiques obtenues après traitement thermique (trempe et revenu) des aciers montrent que, plus la dureté

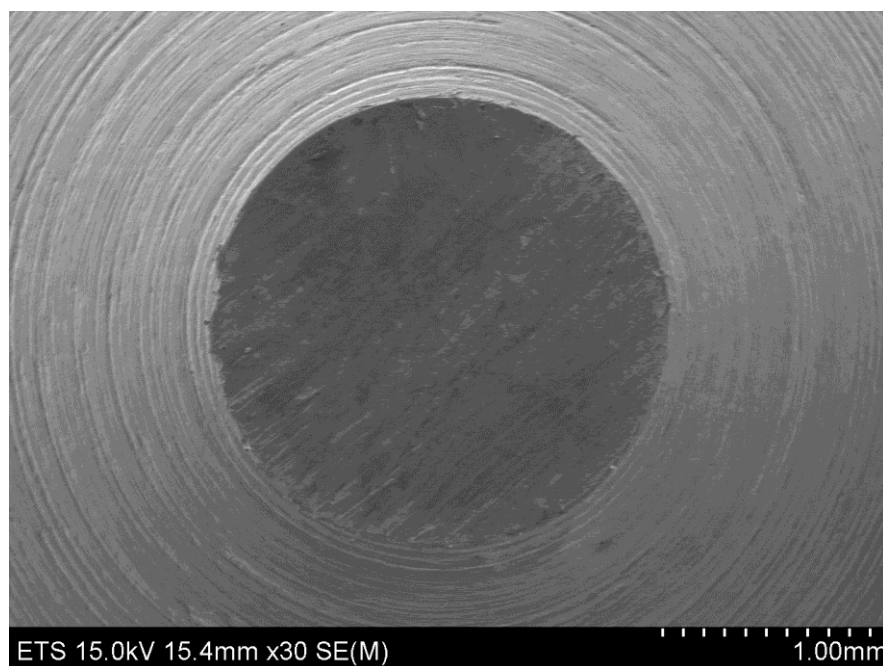
augmente plus les grains de l'acier sont fins. La résistance à l'usure croît proportionnellement avec la teneur en cémentite.

Les états de surfaces des échantillons avant les essais sont polis à une rugosité moyenne $0,06\mu\text{m}$. Après tous les essais effectués sont devenus rugueux, la rugosité moyenne R_a varie entre $0,22\mu\text{m}$ à $1,06\mu\text{m}$.

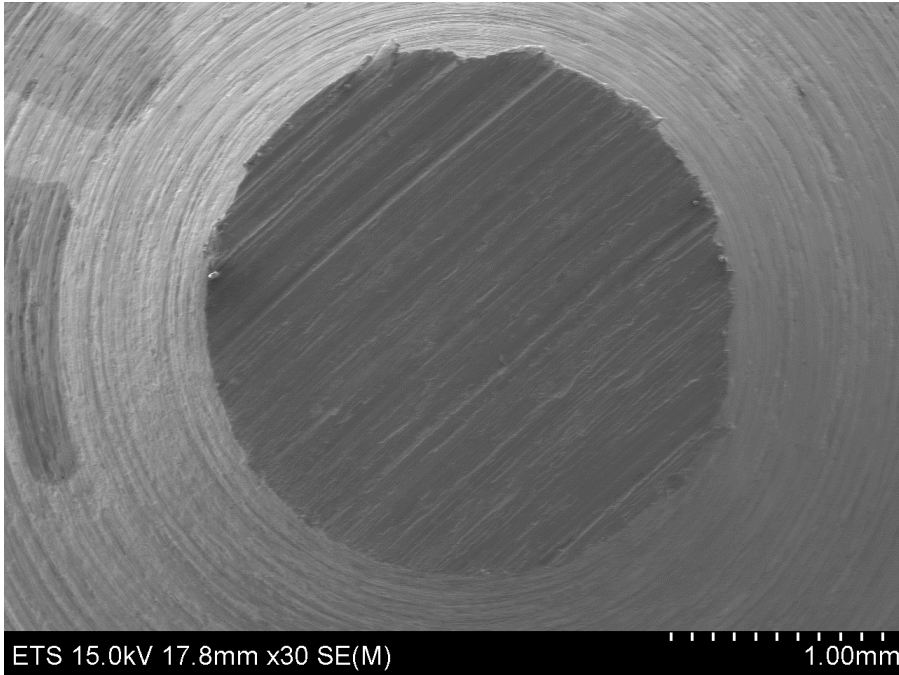
On remarque que la dureté n'a aucune influence sur l'état de surface de la piste d'usure des disques.

Les caractéristiques des endommagements observées au microscope optique sur la face usée du pion (figure V.6) et sur la piste de frottement du disque (figures V.7 et V.8) suggèrent que dans la majorité des cas, l'usure se développe simultanément par adhésion et abrasion.

La présence d'un mélange de zones métalliques et de zones recouvertes d'oxydes avec arrachement de matière. Des sillons sont formés par le labourage, ils sont continus, parallèles et bien orientés dans le sens du glissement, notamment avec les faibles duretés, avec la présence des petites particules d'usure.

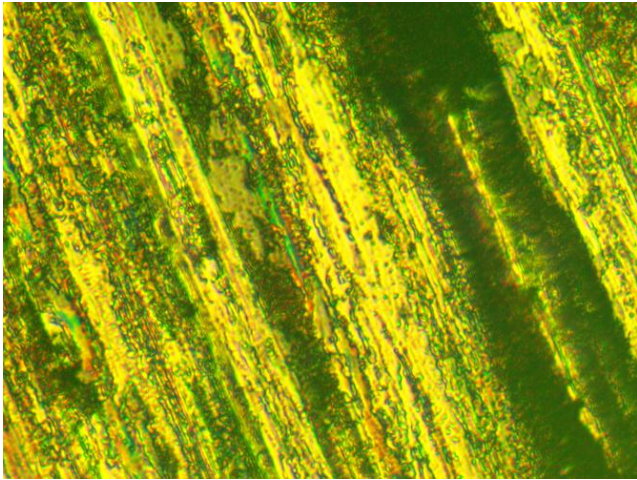


(a)

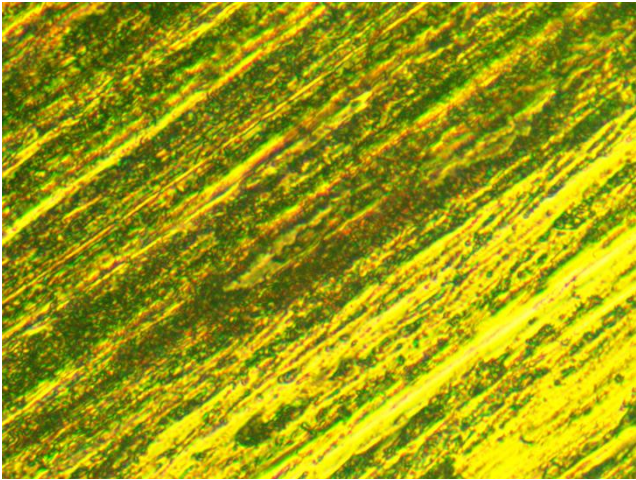


(b)

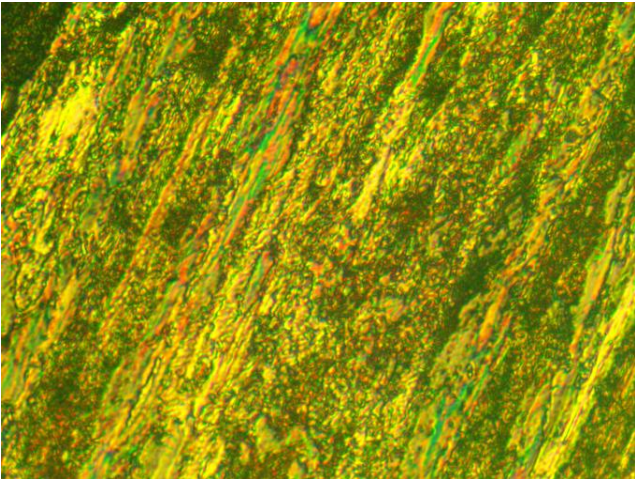
Figure V. 6 : Vue microscopique de la face usée du pion (40HRC) : (a) 42CrMo4 ;
(b) C45.



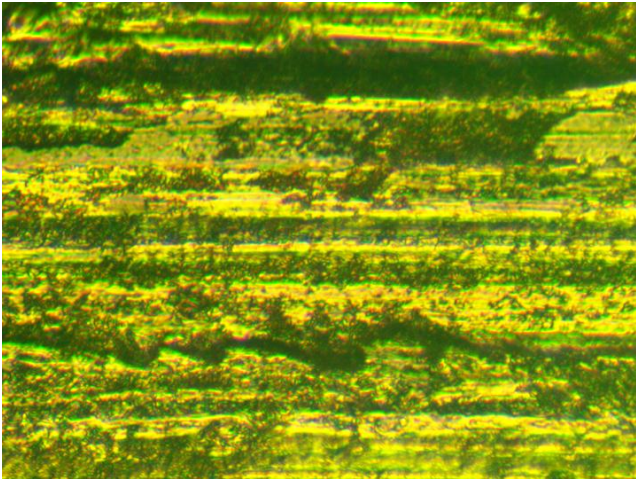
35HRC



40HRC

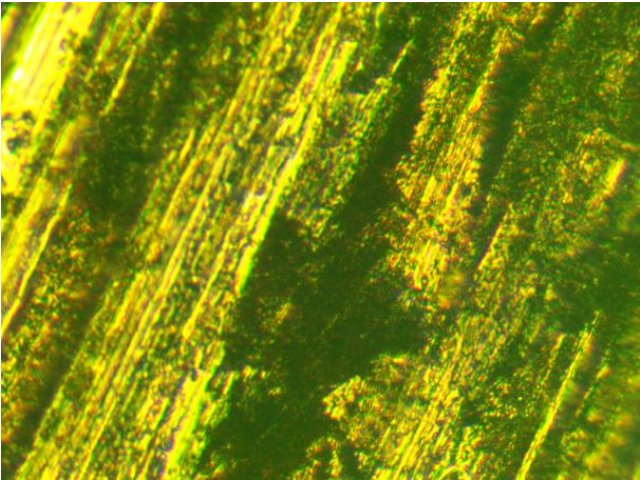


45HRC

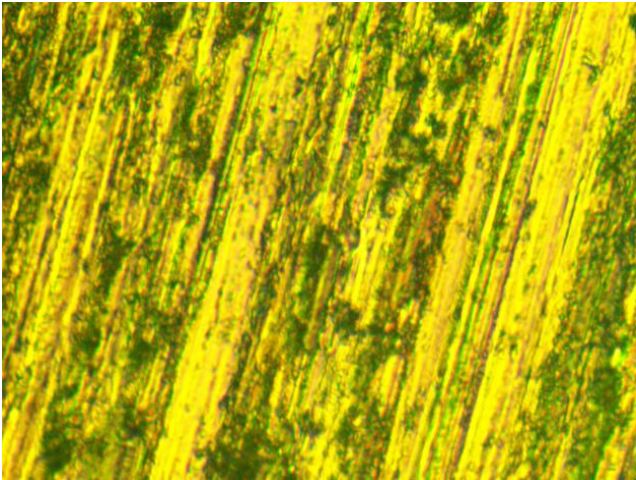


50HRC

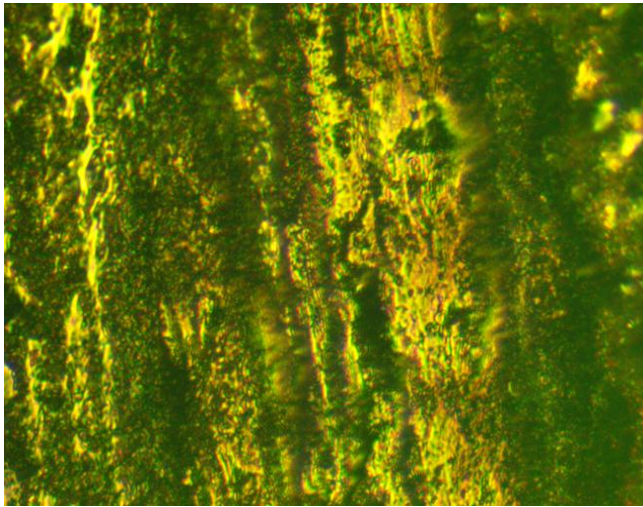
Figure V.7: Vue microscopique de la face usée du disque correspond au pion 42CrMo4.



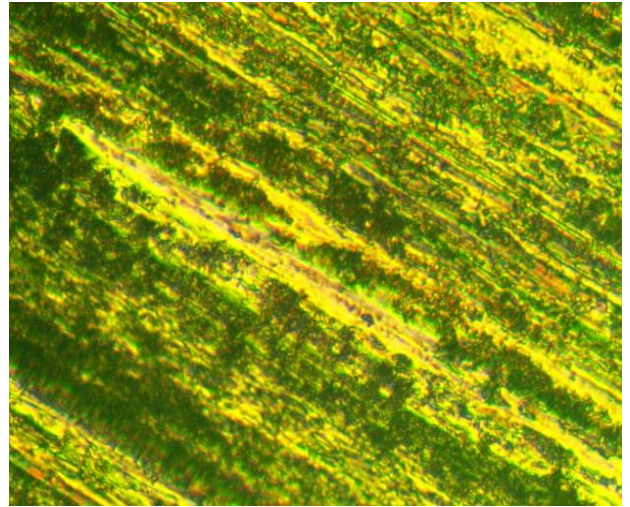
35HRC



40HRC



45HRC



50HRC

Figure V.7: Vue microscopique de la face usée du disque correspond au pion C45.

Des analyses chimiques (figure 5 b et d) ont été effectuées sur différentes zones dans la piste d'usure du disque pour mettre en évidence le processus de transfert des particules en chrome du pion en 42CrMo4 (le moins dur) sur la surface du disque (la plus dure) qui jouent un rôle important dans le frottement et l'usure des couples, notamment l'usure adhésive [36].



Thermo Fisher Scientific
900 Middlesex Turnpike
Billerica, MA 01821

Certificate of Verification

XL3t-62240

Reading No 1222
Mode General Metals
Duration 30.46
Units %
Sigma Value 2
Sequence Final
Alloy1 Iron/CS : *2.89
Alloy2 No Match : *3.43
Flags
SAMPLE PIECE 08 FA P4
HEAT
LOT
BATCH
MISC
NOTE

| | % | ± | Error |
|----|--------|---|-------|
| Ag | < LOD | : | 0.025 |
| Pd | < LOD | : | 0.015 |
| Ru | < LOD | : | 0.005 |
| Mo | 0.018 | ± | 0.003 |
| Nb | < LOD | : | 0.003 |
| Pb | < LOD | : | 0.011 |
| Zn | < LOD | : | 0.017 |
| Cu | 0.105 | ± | 0.025 |
| Ni | 0.086 | ± | 0.039 |
| Co | < LOD | : | 0.225 |
| Fe | 97.831 | ± | 0.303 |
| Mn | 0.716 | ± | 0.053 |
| Cr | *0.183 | ± | 0.022 |
| Ti | < LOD | : | 0.077 |
| Sn | < LOD | : | 0.018 |
| Zr | < LOD | : | 0.003 |
| Bi | < LOD | : | 0.004 |
| Se | < LOD | : | 0.006 |
| W | < LOD | : | 0.056 |
| V | < LOD | : | 0.045 |
| S | 0.052 | ± | 0.007 |
| P | < LOD | : | 0.020 |
| Si | 0.547 | ± | 0.050 |
| Mg | < LOD | : | 0.002 |
| Sb | < LOD | : | 0.020 |
| Al | < LOD | : | 0.531 |

(a)



Thermo Fisher Scientific
 900 Middlesex Turnpike
 Billerica, MA 01821

Certificate of Verification

XL3t-62240

Reading No 1230
 Mode General Metals
 Duration 30.36
 Units %
 Sigma Value 2
 Sequence Final
 Alloy1 TS-O6 : *3.22
 Alloy2 Iron/CS : *3.44
 Flags
 SAMPLE PIECE 04 FA P2
 HEAT
 LOT
 BATCH
 MISC
 NOTE

| | % | ± | Error |
|----|--------|---|-------|
| Ag | < LOD | : | 0.024 |
| Pd | < LOD | : | 0.014 |
| Ru | < LOD | : | 0.005 |
| Mo | *0.021 | ± | 0.003 |
| Nb | < LOD | : | 0.002 |
| Pb | 0.027 | ± | 0.008 |
| Zn | < LOD | : | 0.018 |
| Cu | 0.092 | ± | 0.023 |
| Ni | < LOD | : | 0.087 |
| Co | < LOD | : | 0.215 |
| Fe | 98.004 | ± | 0.294 |
| Mn | 0.740 | ± | 0.051 |
| Cr | 0.176 | ± | 0.020 |
| Ti | < LOD | : | 0.072 |
| Sn | < LOD | : | 0.017 |
| Zr | < LOD | : | 0.002 |
| Bi | < LOD | : | 0.004 |
| Se | < LOD | : | 0.006 |
| W | < LOD | : | 0.049 |
| V | < LOD | : | 0.043 |
| S | 0.022 | ± | 0.007 |
| P | < LOD | : | 0.022 |
| Si | 0.607 | ± | 0.053 |
| Mg | < LOD | : | 0.002 |
| Sb | < LOD | : | 0.020 |
| Al | < LOD | : | 0.517 |

(b)

Figure V.9: Taux des éléments chimiques détectés sur la face usée du disque pour le couple 42CrMo4/C55 à la dureté : (a)35HRC; (b) 40HRC.

Les grains sont souvent très durs parce qu'ils sont formés de matière fortement écrouie et autotrempeée, ils agissent comme de grosses aspérités et raient la surface opposée (figure V.7). Généralement, on distingue deux types de grains :

Les grains actifs de taille plus petite participent au processus d'usure abrasive. Ils se présentent sous forme de poudre constituée d'un mélange de métal et des oxydes. Ils restent à l'interface, diminuent l'effet antigrippant des couches oxydées et accélèrent l'enlèvement des pellicules d'oxyde superficielles tendant ainsi à augmenter l'usure pendant le glissement.

Par ailleurs, l'aire de la surface réelle de contact des éléments de surface diminue, lorsque l'épaisseur des couches d'oxydes croît et les contacts qui s'établissent sont plus fragiles, surtout lorsqu'ils s'effectuent à travers un grain. La rupture se fait au niveau de l'interface grain-métal.

Les grains arrachés s'oxydent plus ou moins vite en fonction de la température, ils s'usent et leur taille diminue. C'est à ce moment que commence la phase d'usure abrasive stable.

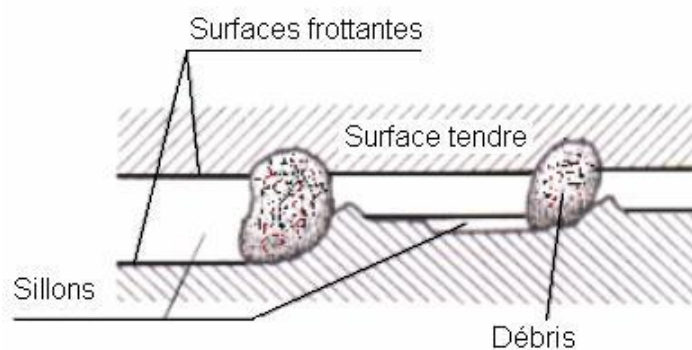


Figure V.10 : Rayage par les grains de la poudre d'usure.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail présenté dans ce mémoire est principalement de nature expérimentale, consiste à étudier le comportement au frottement et à l'usure à sec de couples d'aciers non alliés et faiblement alliés en fonction de la dureté des pions. Il a permis de donner des réponses à certaines questions relatives au frottement et à l'usure des pions en acier C45 et 42CrMo4 frottant contre un disque en acier C55. On a essayé de mettre en évidence les phénomènes tribologiques associés.

En général, les tests tribologiques effectués montrent que le coefficient de frottement est assez grand au démarrage du mouvement, il diminue avec la distance de glissement puis il se stabilise.

Le coefficient de frottement et l'état de surface des surfaces de contact après l'usure ne varient pas de manière significative avec la variation de la dureté du matériau du pion.

L'allure des courbes du taux d'usure et les comportements tribologiques des pions et des disques sont presque identiques à cause de l'appartenance des pions à la même famille (aciers au carbone traitables).

Le taux d'usure des pions augmente lorsque la dureté du pion diminue.

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, autrement dit, optimiser les conditions de fonctionnement du couple, tels que le choix de la dureté du pion.

Il est important de mentionner que ce travail n'est qu'une étude sur le chemin de la compréhension des mécanismes tribologiques intervenant sur ces couples de matériaux, il ne doit être considéré que comme une contribution dans le domaine tribologique des matériaux métalliques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] O. Barrau. Etude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [2] G.L. Etude des mécanismes d'endommagement des outils carbure wc-co par la caractérisation de l'interface outil-copeau application a l'usinage sec de l'alliage d'aluminium aéronautique AA2024 T351. PhD thesis, ENSAM-Bordeaux, 2004. N° d'ordre : 2004-41.
- [3] Gérald Zambelli, Léo Vincent, Matériaux et contacts, pressepolytechniques et universitaire romandes CH-1015 lausanne, 1998.
- [4] J. Denape, N. Laraqi, Aspect thermique du frottement : mise en évidence expérimentale et élément de modélisation, Méc. Ind , Vol. 1pp. 563-579.2000.
- [5] F.Robbe-Valoire, B. Baffoni, R. PROGRI, Load transmission by elastic,elato-plastic or fullyplastic deformation of rough interface asperities, Mechanics of Materials, Vol. 33, pp. 617-633. 2001.
- [6] Drouin et aL "Manuel éléments de machines" Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal, 1986.
- [7] Georges Spinnler"Conception des machines". Principe et application, 1 Statique 1997.
- [8] J.R. Barber, Bounds on the electrical resistance between contacting elastic rough bodies,Proc. R. Soc. Lond. A pp.459, 53-66. 2003.

- [9] E. P. Bowden and D. Tabor, *The friction and lubrication of solids I*, Clarendon Press, Oxford. 1950.
- [10] J.A Greenwood, J.B.P Williamson, *Contact of nominally flat surfaces*, Proc. R. Soc. Lond.A 295, pp.300-319. 1966.
- [11] J.F Archard, *Elastic deformation and the laws of friction*, Proc. R. Soc. Lond. A 243, pp.190-205. 1957.
- [12] C. A. Coulomb, *Téorie de machines Simples. Mémoire de mathématique et de Physique del'académie Royale*, Paris, pp. 161-342, 1785.
- [13] Jean Dhers "usure, avaries et corrosion". *Facteur de destruction des matériels industriels*. Ed 1978.
- [14] R.D. Malucci. *Characteristics of films developed in fretting experiments on tin plated contacts*, IEEE Trans Components Packag Technol 24(3). pp. 399 407, 2001.
- [15] G.T. Flowers, X. Fei, M.J. Bozack, R.D. Malucci, *Ieee Trans Components Packag Technol*;27:65, 2004.
- [16] M. Braunovic, *Overheating of flexible tinned copper connectors*.Ieee Trans Components Packag Technol 24(03).pp. 384-388, 2001.
- [17] Y.W. Park, T. S. N. Sankara , K.Y. Lee, *Effet of fretting amplitude and frequency on the fretting corrosion behavior of tin plated contact*, Surf Coat Technol 201(6). pp. 2181-2192, 2006.
- [18] Y.W. Park, T. S. N. Sankara , K.Y. Lee. *Effect of temperature on the fretting corrosion of tin plated copper alloy contacts*, Wear 262(3-4). pp. 320-330, 2007.

- [19] P. Kapsa, M. Cartier, Usure des contacts mécaniques – Manifestations de l'usure, Techniques de l'Ingénieur BM5067, p. 1-13, 2001.
- [20] F. P. Bowden, D. Tabor, Friction and Lubrication of Solids, Part II. Oxford: Clarendon press, 1964, 544 p.
- [21] T. Mang, K. Bobzin, T. Bartels, Industrial Tribology, Weinheim, Germany, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2011.
- [22] J. M. Georges, Frottement, usure et lubrification. Paris : Eyrolles et Cnrs Editions, Sciences et techniques de l'ingénieur, 424. (2000).
- [23] Notions de tribologie, http://58consmecha.free.fr/Cours%20a%20Pdf/contact_tribologie.pdf
- [24] P. Dumon "Revêtements par soudage et projection thermique" Tome 1 Usure – Produit et procédés, Institut de Soudage, 1991.
- [25] A. Bouchoucha "Contribution à l'étude du comportement en frottement et usure du cuivre dans un contact dynamique cuivre-acier traversé par un courant électrique". Thèse de Docteur Ingénieur, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 1988.
- [26] J. Lemaître, J. L. Chaboche, Mécanique des matériaux solides. 2nd ed. Paris : Dunod Bordas (1988) 544.
- [27] H. C. Menges, K. C. Ludema. Wear models and predictive equations: their form and content. Wear 181-183(1995)443-457.
- [28] R. Butin, M. Pinot "Fabrications mécaniques". Technologie, tome 1, 1981.

- [29] Cetim / Cermo "Catalogue tribologique de matériaux pour glissière".
Première édition, Nov. 1985.
- [30] J. Lignon, R. Maillebauu "Métaux ferreux" Etude des matériaux. 1, 1983.
- [31] P. Grostabussiat Sophie "Conséquences mécaniques des transformations structurales dans les alliages ferreux".Thèse de doctorat, INSA Lyon, Déc., 2000.
- [32] Persson B. N. J, « Sliding friction» surface Science Report, 1999; 83-119.
- [33] Gras R, The tribology of extreme conditions: adhesion and friction of metals at high temperatures» Europ. Journal Mech. Eng, 1992; 37: 243-257.
- [34] Glascott J., Stott F. H., Wood G. C, The transition from severe to mild sliding wear for Fe-12%Cr-base alloys at low temperatures» Wear, 1984; 97:155-178.
- [35] Rabinowics E, Friction and Wear of Materials, Willy, NY, 1966.
- [36] G. Bucca, A. Collina. "A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph–catenary system", Wear, 266, 46–59, 2009.