

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHESCIENTIFIQUE**

**Université M<sup>ed</sup> Boudiaf de M'sila  
Département de Génie Mécanique**

**MEMOIRE**

**Présenté par**

**ELHADI ABDELMALEK**

**En vue de l'obtention du diplôme de**

**MAGISTER**

**En Génie Mécanique  
Option : Construction Mécanique**

**Sujet**

**INFLUENCE DES PARAMETRES MECANQUES LORS DE  
L'ENDOMMAGEMENT PAR LES PHENOMENES  
TRIBOLOGIQUES DES COUPLES DES MATERIAUX XC48/XC55  
ET A60/XC55**

Devant le jury composé de :

<b>Pr. NECIB Brahim</b>	<b>Président</b>	<b>Université Mentouri, Constantine</b>
<b>Pr. BOUCHOUCHA Ali</b>	<b>Rapporteur</b>	<b>Université Mentouri, Constantine</b>
<b>Pr. MEZIANI Salim</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université Mentouri, Constantine</b>
<b>Mr. FARSI Chaouki</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université M<sup>ed</sup> Boudiaf, M'sila</b>
<b>Mr. TAIBI Amar</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université M<sup>ed</sup> Boudiaf, M'sila</b>

Soutenu le :    /    / 2006

يتعلق العمل بدراسة سلوك ثنائيين من المعادن عند الإحتكاك و التآكل، المستعملة في المجال الصناعي (مؤسسة أقال بالمسيلة). تتركز هذه الدراسة خاصة على التلامس الديناميكي الجاف للفولاذ A60 أو XC48 (مكون الأكره) المحتك على الفولاذ XC55 (مادة السكة الحديدية) المستعملة في تنقل أجهزة الرفع. تتآكل الأكره أثناء الاشتغال و تعويضها يكون مكلفا. و لهذا فإن دراستنا تهتم بظاهرة التآكل التي تتعرض لها الأكره مستعملين في ذلك جهاز المحكاك ذو النمط ساق و قرص المتوفر على مستوى مخبر الهندسة الميكانيكية بجامعة منتوري بقسنطينة . إن دراسة التآكل تكون بدلالة العوامل الميكانيكية التالية : القوة, السرعة, الزمن و القساوة. إن النتائج المتحصل عليها تبين أن العوامل تلعب دورا بارزا في تحديد مدة صلاحية اشتغال الثنائيين. مناقشتنا تتركز خصوصا على الملاحظات, التحليل و كذا الظواهر الناجمة بين السطوح نتيجة الاحتكاك. حل تقني مقترح للتقليل و بصفة محسوسة ظاهرة التآكل و بالتالي الزيادة في مدة الخدمة للثنائيين المدروسين.

## الكلمات المفاتيح

الخشونة، التلامس التحريكي، الإلتلاف، الإحتكاك، القساوة، التصليد، المراجعة، الأكسدة.

## Abstract

The Work consists in studying the behavior in friction and wear of the metal couples used in the industrial sector (Company ALGAL of M'sila). They are particularly the dry dynamic contacts A60 steel or XC48 (constituting the roller) rubbing against the steel XC55 (chechmate ériau of the rail) used for the displacement of the elevating lifting devices.

During operation, the roller wears and its replacement proves to be expensive. Consequently, our study consists in studying the wear of the roller, by using a tribometer of the pin-disc type available within the Laboratory of Mechanical Engineering at the University of Constantine.

Wear is studied according to the mechanical parameters: charge, speed, time and hardness. The results obtained show that the parameters play a major role in the determination of the lifespan of the couples. Our discussion is based especially on observations, analyses and interfacial phenomena resulting from friction.

A technical solution is proposed to decrease in a remarkable way wear and thus to increase the working life of the studied couples.

## Key-Words

Roughness, dynamic contact, damage, friction, microhardness, hardning, tempering, oxidation.

## Résumé

Le travail consiste à étudier le comportement en frottement et usure des couples métalliques utilisés dans le secteur industriel (Entreprise ALGAL de M'sila). Il s'agit particulièrement des contacts dynamiques secs de l'acier A60 ou XC48 (constituant le galet) frottant contre l'acier XC55 (matériau du rail) utilisés pour le déplacement des appareils de levage.

Durant le fonctionnement, le galet s'use et son remplacement s'avère onéreux. Par conséquent, notre étude consiste à étudier l'usure du galet, en utilisant un tribomètre de type pion-disque disponible au sein du Laboratoire de Génie Mécanique à l'Université de Constantine.

L'usure est étudiée en fonction des paramètres mécaniques : charge, vitesse, temps et dureté. Les résultats obtenus montrent que les paramètres jouent un rôle majeur dans la détermination de la durée de vie des couples. Notre discussion est basée surtout sur des observations, des analyses et des phénomènes interfaciaux résultants du frottement.

Une solution technique est proposée pour diminuer d'une façon remarquable l'usure et donc augmenter la durée de service des couples étudiés.

## Mots clés

Rugosité, contact dynamique, endommagement, frottement, microdureté, trempe, revenu, oxydation.

## TABLES DES MATIERES

INTRODUCTION.....	14
-------------------	----

### CHAPITRE I

#### GENERALITES SUR LE CONTACT DYNAMIQUE DES CORPS METALLIQUES

I.1. Introduction.....	17
I.2. Importance de la tribologie.....	17
I.3. Aspects scientifiques de la tribologie.....	18
I.4. Etude des surfaces.....	19
I.4.1. Structure d'une surface usinée.....	19
I.4.2. Types de surface.....	22
I.4.2.1. Surface d'un corps.....	22
I.4.2.2. Surface géométrique.....	22
I.4.2.3. Surface spécifiée.....	23
I.4.2.4. Surface réelle.....	23
I.4.2.5. Surface mesurée.....	23
I.4.3. Les ordres de défauts d'une surface géométrique.....	24
I.4.3.1. Défauts de forme.....	24
I.4.3.2. Défauts d'ondulation.....	24
I.4.3.3. Rugosité.....	25
I.4.4. Mesure des défauts.....	26
I.4.5. Caractérisation topographique des surfaces.....	27
I.4.5.1. Ligne de référence.....	28
I.4.5.2. Longueur de base.....	28
I.4.5.3. Longueur d'évaluation.....	28
I.4.5.4. Ligne de référence des moindres carrés.....	29

<b>I.5. Mesure de la rugosité</b> .....	29
I.5.1. Ecart quadratique moyen du profil.....	29
I.5.2. Ligne de référence arithmétique.....	29
I.5.3. Ecart arithmétique moyen du profil.....	30
<b>I.6. Mécanique du contact</b> .....	31
I.6.1. Géométrie des aspérités.....	32
I.6.2. Relations géométriques.....	32
I.6.3. Contact sur une aspérité.....	33
I.6.4. Déformation élastique de la surface de contact.....	33
I.6.5. Contact ponctuel.....	34
I.6.6. Contact extérieur entre deux sphères.....	35
I.6.7. Contact extérieur de deux cylindres parallèles.....	37
I.6.8. Contact du cylindre sur un plan.....	37
I.6.9. Contact plan.....	38
<b>I.7. Surfaces de contact</b> .....	39
I.7.1. Surface de contact nominale.....	39
I.7.2. Surface de contact réelle.....	40
I.7.3. Contact des aspérités.....	41
I.7.4. Surface de contact en présence d'une force de cisaillement.....	42

## CHAPITRE II

### PHENOMENES INTERFACIAUX ENGENDRES PAR LES PROCESSUS DE FROTTEMENT ET D'USURE

<b>II.1. Introduction</b> .....	44
<b>II.2. Frottement</b> .....	44
II.2.1. Définition.....	44
II.2.2. Force et coefficient de frottement.....	44
II.2.3. Comportement du coefficient de frottement.....	47
II.2.3.1. Vitesse de glissement.....	47
II.2.3.2. Chemin de glissement parcouru.....	48
II.2.3.3. Etat de surface.....	49

II.2.3.4. Nature des métaux.....	49
II.2.3.5. Charge normale appliquée.....	49
II.2.3.6. Température ambiante.....	50
II.2.4. Valeurs pratiques du coefficient de frottement.....	50
II.2.5. Modèles de frottement.....	52
II.2.5.1. Frottement de glissement.....	52
II.2.5.1.1. Adhérence.....	52
II.2.5.1.2. Labourage.....	54
II.2.5.1.3. Lois d'AMONTONS-COULOMB.....	55
II.2.5.1.4. La quantité de chaleur.....	57
II.2.5.1.5. L'énergie de frottement cumulée.....	57
II.2.5.1.6. La puissance moyenne de frottement.....	58
II.2.5.2. Matériaux utilisables pour le frottement.....	58
<b>II.3. Définition et modèles d'usure.....</b>	<b>59</b>
II.3.1. Définition de l'usure.....	59
II.3.2. Usure par adhérence.....	59
II.3.2.1. Quantification de l'usure adhésive.....	62
II.3.2.2. Dimensions des particules d'usure.....	63
II.3.2.3. Aspects métallurgiques de l'usure adhésive des aciers.....	64
II.3.2.4. Comment lutter l'usure adhésive.....	65
II.3.3. Usure abrasive.....	66
II.3.3.1. Définition de l'usure abrasive.....	66
II.3.3.2. Aspects tribologiques de l'usure abrasive.....	66
II.3.3.3. Quantification de l'usure abrasive.....	69
II.3.3.4. Influence de l'angle d'attaque sur l'usure abrasive.....	71
II.3.3.5. Aspect Métallurgique de l'usure abrasive des aciers.....	73
II.3.4. Usure par oxydation.....	74
II.3.4.1. Introduction.....	74
II.3.4.2. Oxydation du fer.....	75
II.3.4.2.1. L'oxyde ferreux FeO.....	75
II.3.4.2.2. La magnétite Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> .....	75
II.3.4.2.3. L'oxyde ferrique Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	75
II.3.4.3. Mécanismes de l'usure par oxydation.....	76

## CHAPITRE III

### DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET TECHNIQUES DE MESURE

<b>III.1. Introduction</b> .....	77
<b>III.2. Dispositif expérimental</b> .....	77
III.2.1. Présentation générale du tribomètre.....	77
III.2.2. Spécifications techniques.....	78
III.2.3. Connexion électrique du tribomètre.....	79
III.2.3.1. Unité de base.....	79
III.2.3.2. Moteur à courant continu.....	79
III.2.3.3. Capteur de vitesse du moteur.....	79
III.2.3.4. Réducteur.....	79
III.2.3.5. Boîtier d'affichage.....	80
III.2.3.6. Capteur d'usure.....	80
III.2.3.7. Cellule.....	80
III.2.3.8. Prises de connexion.....	80
<b>III.3. Identification des matériaux utilisés</b> .....	81
III.3.1. Matériaux du pion.....	81
III.3.2. Matériau du disque.....	82
III.3.3. Techniques d'identification des échantillons.....	82
III.3.3.1. Carbométrie.....	82
III.3.3.2. Spectrométrie.....	83
III.3.4. Composition chimique.....	84
III.3.5. Caractéristiques mécaniques.....	84
<b>III.4. Présentation du couple tribologique</b> .....	84
III.4.1. Disque.....	84
III.4.2. Pion.....	85

<b>III.5. Préparation des échantillons</b> .....	85
III.5.1. Usinage des échantillons.....	85
III.5.2. Traitements thermiques.....	86
III.5.2.1. Introduction.....	86
III.5.2.2. Cycle d'un traitement thermique.....	86
III.5.2.3. Traitements thermiques appliqués.....	87
III.5.2.4.1. Trempe.....	87
III.5.2.5.1. Revenu.....	88
III.5.3. Le polissage.....	88
<b>III.6. Essais et examens préalables avant frottement</b> .....	89
III.6.1 Essai de microdureté.....	89
III.6.1.1. Introduction.....	89
III.6.1.2. Principe de microdureté.....	89
III.6.1.3. Déroulement des essais.....	90
<b>III.7. Examen métallographique</b> .....	90
III.7.1. Introduction.....	90
III.7.2. Déroulement de l'essai.....	90
III.7.3. Observation microscopique avant traitements thermiques.....	91
III.7.4. Observation microscopique après traitements thermiques.....	96
<b>III.8. Enregistrement des profils de la rugosité</b> .....	97
<b>III.9. Moyens de mesure</b> .....	98
III.9.1. La charge normale.....	98
III.9.2. Vitesse linéaire de glissement.....	99
III.9.3. Force tangentielle de frottement.....	99
III.9.4. Coefficient de frottement.....	100
III.9.5. Mesure de l'usure du pion.....	100
III.10. Courbe d'étalonnage.....	100
III.11. La durée de l'essai d'usure.....	100

## CHAPITRE IV

### RESULTATS EXPERIMENTAUX

#### INFLUENCE DES PARAMETRES MECANQUES SUR FROTTEMENT ET USURE DES COUPLES UTILISES

<b>IV.1. Déroulement des essais</b> .....	101
<b>IV.2. Evolution du coefficient de frottement</b> .....	101
IV.2.1. Variation de $\mu$ en fonction de la charge normale.....	101
IV.2.2. Variation de $\mu$ en fonction de la vitesse de glissement.....	102
<b>IV.3 Variation de l'usure</b> .....	104
IV.3.1. Variation de l'usure en fonction de la charge normale.....	104
IV.3.2. Influence de la vitesse de glissement sur l'usure.....	105
IV.3.3. Effet de la dureté sur l'usure.....	106
IV.3.4 Variation de l'usure en fonction du temps.....	107

## CHAPITRE V

#### ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

V.1. Influence de la charge normale sur le frottement et l'usure.....	108
V.2. Effet de la vitesse sur le frottement et l'usure.....	109
V.3. Influence de la dureté sur l'usure.....	110
V.4. Influence du paramètre temps sur l'usure.....	110
V.5. Effet thermique sur le comportement tribologique des couples.....	110
V.6. Conséquences du frottement et de l'usure sur les surfaces frottantes.....	113
<b>Conclusion générale</b> .....	118
<b>Références bibliographiques</b> .....	120
<b>Annexe</b> .....	125

## LISTES DES FIGURES

Figure I.1 : Composition schématique des couches superposées d'une surface.....	20
Figure I.2 : Schéma de la surface d'un solide.....	21
Figure I.3 : Contraintes résiduelles et profondeur de la couche écrouie selon le procédé de finition.....	21
Figure I.4 : Comportement à l'écrouissage : (a) un aluminium ;(b) un acier G86400 ; (c) un alliage de cuivre.....	22
Figure I.5 : Profil d'une surface.....	23
Figure I.6 : Défauts de profil d'une surface.....	23
Figure I.7 : Période des défauts de forme d'une surface géométrique.....	24
Figure I.8 : Défauts d'ondulation.....	24
Figure I.9 : Période de défauts d'ondulation.....	25
Figure I.10 : Rugosité de troisième et quatrième ordre.....	25
Figure I.11 : Structure de surfaces : (a) stries régulières ; (b) stries orientées ; (c)aspérités irrégulières.....	25
Figure I.12 : Grandeurs de rugosité normalisées.....	26
Figure I.13 : Mesure des défauts de surface par un profilographe.....	26
Figure I.14 : Distorsion d'une surface.....	27
Figure I.15 : Ligne de référence.....	28
Figure I.16 : Longueur de base.....	28
Figure I.17: Ligne moyenne.....	29
Figure I.18: Ecart quadratique moyen.....	29
Figure I.19 : Ligne de référence arithmétique.....	30
Figure I.20 : Ecart arithmétique moyen du profil.....	30
Figure I.21 : Types de contact.....	31
Figure I.22 :Différentes situations des aspérités :(a) sphère ;(b) cylindres parallèles (c) cylindres croisés.....	31
Figure I.23 : Géométrie des aspérités.....	32
Figure I.24 : Rayon moyen d'une aspérité.....	32
Figure I.25 : Contact sur une aspérité.....	33
Figure I.26 : Déformation élastique de la surface de contact.....	33

Figure I.27 : Contact ponctuel.....	34
Figure I.28 : Contact linéique.....	34
Figure I.29 : Aire de contact d'une bille sur un plan.....	34
Figure I.30 : Contact extérieur de deux sphères.....	35
Figure I.31 : Distribution des contraintes ; (a) contrainte maximale ; (b) pression moyenne.....	36
Figure I.32 : Contact extérieur de deux cylindres parallèles.....	37
Figure I.33 : Relation force-déformation d'un cylindre et d'une sphère sur un plan....	38
Figure I.34 : Enfoncement d'une pièce dans une plaque (a) champ de force ; (b) modèle de calcul.....	38
Figure I.35 : Aires de contact.....	40
Figure I.36 : Contact de deux surfaces.....	40
Figure I.37 : Contact des aspérités : (a) sur une aspérité ; (b) sur deux aspérités ; (c) sur trois aspérités ; (d) sur quatre aspérités.....	41
Figure I.38 : Surfaces en contact par leurs aspérités.....	42
Figure I.39 : Aire de contact d'une aspérité :(a) charge normale seule ;(b)avec force tangentielle.....	42
Figure II.1 : Force de frottement.....	45
Figure II.2 : Mouvement de glissement.....	45
Figure II.3 : Angle de frottement.....	46
Figure II.4 : Cône de frottement.....	47
Figure II.5 : Influence de la vitesse sur le coefficient de frottement.....	48
Figure II.6 : Evolution du frottement avec la distance de glissement.....	48
Figure II.7 : Variation du coefficient de frottement en fonction de la charge normale.	50
Figure II.8 : Optimisation du frottement.....	53
Figure II.9 : Début de labourage d'une surface tendre par une aspérité dure (a) enfoncement statique ;(b) premier mouvement par une force tangentielle (c) émergence au début de glissement.....	54
Figure II.10 : Labourage et déformation plastique d'une aspérité molle par une couche plus dure (a) dans les films d'oxyde ;(b) dans le matériau de base.....	55
Figure II.11 : différentes surfaces de contact d'un corps.....	56
Figure II.12 : Proportionnalité du frottement avec la force tangentielle.....	56
Figure II.13 : Broutage des surfaces.....	56
Figure II.14 : Empreinte d'usure adhésive sur frotteur sphérique.....	59
Figure II.15 : Transfert d'une particule (a) soudure d'une aspérité ; (b) arrachage	

d'une particule.....	60
Figure II.16 : Transfert métallique adhésif.....	60
Figure II.17 : Formation d'un fragment d'usure par adhérence.....	61
Figure II.18 : Schéma de principe de l'usure abrasive.....	66
Figure II.19 : Usure abrasive à deux corps.....	67
Figure II.20 : Usure abrasive à trois corps.....	67
Figure II.21 : Effet d'une aspérité (a) outil de coupe ;(b) sillon d'abrasion.....	68
Figure II.22 : Mécanisme de l'abrasion ;(a) par coupe ;(b) par déformation plastique	68
Figure II.23 : Modèle d'usure abrasive pour un unique cône rigide.....	70
Figure II.24 : Angle d'attaque $\alpha$ d'une particule.....	71
Figure II.25 : Section droite du sillon en fonction de l'angle d'attaque.....	72
Figure II.26 : La résistance à l'usure abrasive $\varepsilon$ en fonction de la dureté due par traitement thermique des aciers au carbone.....	73
Figure II.27 : Formation des couches d'oxydes superposées sur la surface du fer....	75
Figure III.1 : Tribomètre de type TE91.....	78
Figure III.2 : Schéma de connexion électrique du tribomètre TE91.....	81
Figure III.3 : Appareil pour le dosage rapide de carbone dans l'acier.....	83
Figure III.4 : Dessin de définition du disque.....	85
Figure III.5 : Dessin de définition du pion.....	85
Figure III.6 : Cycle d'un traitement thermique.....	86
Figure III.7 : Four électrique " NABER ".....	87
Figure III.8 : Températures de trempe et revenu suivant le diagramme Fe-C.....	88
Figure III.9 : Micrographie de l'acier XC48 non traité.....	93
Figure III.10 : Micrographie de l'acier A60 non traité.....	94
Figure III.11 : Micrographie de l'acier XC 55 non traité.....	95
Figure III.12 : Microstructure de l'acier XC48 trempé revenu.....	96
Figure III.13 : Microstructure de l'acier A60 trempé revenu.....	96
Figure III.14 : Microstructure de l'acier XC55 trempé revenu.....	97
Figure III.15 : Rugosimètre à stylet de type "MITUTOYO SurfTest - 4".....	97
Figure III.16 : Enregistrement des profils de la rugosité.....	98
Figure III.17 : Système de charges appliquées sur le bras.....	99
Figure III.18 : Courbe d'étalonnage.....	100
Figure VI.1 : Variation du coefficient de frottement $\mu$ en fonction de la charge.....	102
Figure VI.2 : Evolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement.....	103

Figure IV.3 : Evolution du coefficient de frottement de l'acier XC48 non traité avec XC55 en fonction du temps.....	103
Figure IV.4 : Effet de la charge normale sur l'usure du pion.....	104
Figure IV.5 : Variation de l'usure en fonction de la vitesse linéaire.....	105
Figure IV.6 : Effet de la dureté sur l'usure des pions.....	106
Figure IV.7 : Relation entre l'usure U et le temps t.....	107
Figure V.1 : Contact des aspérités en frottement (a) sous faible charge ; (b) sous forte charge.....	108
Figure V.2 : Forme de contact pion-disque.....	111
Figure V.3 : Piste d'usure d'un disque.....	114
Figure V.4 : Enregistrement des profils de la rugosité avant les essais.....	114
Figure V.5 : Enregistrement des profils de la rugosité après les essais.....	115
Figure V.6 : Vue microscopique (x100) de la face usée du pion : (a) XC48 non traité (b) A60 non traité.....	116
Figure V.7 : Surface usée du pion de l'acier XC48 à $N = 18$ [N] et $V=0,32$ m/s.....	116
Figure V.8 : Rayage par les grains de la poudre d'usure.....	117

## LISTE DES TABLEUX

Tableau I.1 : Impacts de la tribologie sur la société.....	18
Tableau I.2 : Valeurs types de rugosité arithmétique moyenne.....	30
Tableau II.1: Valeurs des coefficients de frottement de glissement.....	51
Tableau II.2: Valeurs du coefficient d'usure.....	63
Tableau II.3 : Série de mesure de $K_{abr}$ .....	70
Tableau III.1 : Composition chimique des échantillons.....	84
Tableau III.2 : Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés.....	84
Tableau V.1 : Valeurs de $r$ , $I$ , et $C_p$ des aciers utilisés.....	111
Tableau V.2 : Evolution de la température de contact .....	113

## Introduction générale

Dans l'industrie, il existe un très grand nombre d'applications qui font appel à des mécanismes dans lesquels deux corps se déplacent l'un par rapport à l'autre. Ces mécanismes sont souvent soumis à des phénomènes de frottement et d'usure qui touchent à titre d'exemple les pièces en mouvement tels que les roulements, les galets et les coussinets.

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

Il faut noter que 11% de la consommation énergétique totale des Etats-Unis est perdue à cause du frottement. Stefan Korcek (Ford) et Masami Nakada (Toyota) estiment que choisir des technologies adaptées implique nécessairement la tribologie.

N'est-il pas étonnant par exemple de constater que sur 100 roulements ou galets détruits, 9 seulement l'ont été par le processus d'usure « naturel ». En effet, les deux tiers des avaries sont dus à des défauts de lubrification et de montage. De fait, depuis le milieu des années 90, la réduction de la consommation des moteurs a été particulièrement flagrante. Quand les frottements sont réduits de vingt pour cent, la consommation de l'énergie du véhicule est réduite de sept pour cent.

La tribologie s'intéresse à l'étude et à l'interprétation scientifique des faits expérimentaux, elle traite de multiples aspects du frottement, de la lubrification et de l'usure, mais elle a un but très concret dans tous les domaines qui touchent à la technologie : rechercher et codifier les méthodes qui permettent de donner un bon comportement au contact mécanique.

Afin de réduire le frottement et par conséquent l'usure des systèmes mécaniques, des études ont été menées pour mettre au point des systèmes permettant de réduire ces nuisances.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'influence des paramètres mécaniques sur le comportement en frottement et usure des couples tournants XC48/XC55 et A60/XC55 et de discuter les résultats obtenus.

Bien qu'on a spécifié le galet qui se déplace sur un rail, un montant remarquable de l'usure par glissement est généralement observé dans ce domaine d'application industrielle.

Par ailleurs, l'usure par glissement dépend de plusieurs paramètres tribologiques qui sont interdépendants les uns des autres comme la charge normale, la vitesse linéaire de

glissement, la dureté du matériau qui est liée à la microstructure, etc. Ceci rend l'étude du frottement et d'usure au niveau du laboratoire assez spécifique, puisqu'il est difficile de reproduire, du point de vue expérimental, les mêmes conditions que celles retrouvées dans l'équipement industriel.

Il existe de nombreuses méthodes d'essais tribométriques qui permettent d'obtenir une caractérisation du frottement, de la lubrification et de l'usure. Parmi ces méthodes d'essais on peut citer les types les plus diffusés dans le monde et couramment utilisés pour les études fondamentales en utilisant des tribomètres du laboratoire : essai pion-disque, essai bloc sur cylindre, essai unidirectionnel ou essai à mouvement alterné sur plaque et l'essai des quatre sphères. Nos essais ont été réalisés sur le tribomètre de type pion-disque disponible au sein du Laboratoire de Mécanique de l'Université de Constantine.

Ce type de tribomètre a permis d'étudier en détail l'usure par glissement des aciers A60 et XC48 qui sont considérés comme pion sur l'acier XC55 en mode sec (non lubrifié), en faisant varier la force normale, la vitesse linéaire de glissement, le temps de fonctionnement et la dureté du matériau.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique relative au contact dynamique des corps métalliques, il traite les surfaces du point de vue structure, topographie, ainsi que la géométrie des aspérités des surfaces et les différents contacts entre les corps métalliques.

Dans le deuxième chapitre on présente étude bibliographique sur le processus de frottement et d'usure.

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

L'énumération des différentes conditions des essais telles que la force normale appliquée, la vitesse linéaire de glissement et la méthode de calcul du coefficient de frottement à partir de la force tangentielle, et enfin l'évolution de la courbe d'usure en fonction du temps.

Le quatrième chapitre regroupe l'essentiel des résultats obtenus sur l'étude du frottement et d'usure des couples étudiés en fonction des paramètres mécaniques dans une atmosphère ambiante.

Le cinquième est une discussion et analyse des résultats obtenus en utilisant particulièrement un microscope optique. De plus, une analyse thermomécanique du contact permet de mettre en évidence certains mécanismes et phénomènes qui régissent le

comportement tribologique des échantillons et de faire une comparaison entre les deux couples étudiés.

## CHAPITRE I

# GENERALITES SUR LE CONTACT DYNAMIQUE DES CORPS METALLIQUES

### I.1. Introduction

Le mot tribologie, construit à partir des racines grecques, signifie science du frottement, créé à l'instigation des Anglais en 1968, n'apparaît qu'en 1974 dans le dictionnaire français. La tribologie est la science et la technologie de surfaces solides en contact; elle traite des multiples aspects du frottement, de la lubrification, de l'usure et de l'adhérence [1].

D'après G. Salomon (1968) la tribologie est la science qui étudie les phénomènes susceptibles de se produire lorsque deux corps en contact sont animés de mouvements relatifs. Il recouvre, entre autre, tous les domaines du frottement proprement dit, de l'usure et de la lubrification [2].

On peut dire que, si la mécanique est la science du mouvement, la tribologie est la science qui permet le mouvement.

### 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.

Le tableau I.1 suivant montre que la tribologie trouve ses applications dans deux grands domaines: celui des systèmes mécaniques et celui de la mise en œuvre des matériaux.

<b>Systèmes mécaniques</b>	<b>Mise en œuvre des matériaux</b>
<p><b>Vivant: animal, homme</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Membranes biologiques</li> <li>- Prothèses biomécaniques</li> <li>- Cartilages</li> <li>- Dentisterie</li> </ul> <p><b>Organes de machines</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Paliers, roulements</li> <li>- Segments</li> <li>- Cames, engrenages, freins</li> <li>- Joints</li> <li>- Systèmes électriques</li> <li>- Systèmes magnétiques</li> </ul> <p><b>Terre</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Génie civil</li> <li>- Mouvements des sols</li> <li>- Tremblements de terre</li> <li>- Ecoulement des glaciers</li> <li>- Ski</li> </ul> <p><b>Maintenance</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fiabilité</li> <li>- Durée de vie</li> </ul>	<p><b>Types de matériaux</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Artificiels: métaux, polymères</li> <li>- Céramiques, Composites</li> <li>- Naturels</li> </ul> <p><b>Adhérence, collage</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Composites, textiles, fibres matrices</li> </ul> <p><b>Déformations plastiques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Laminage, filage, extrusion</li> <li>- Emboutissage, découpage</li> <li>- Outillages de coupe, polissage</li> </ul> <p><b>Lubrifiants</b></p> <p><b>Traitements des surfaces</b></p>

Tableau I.1 : Impacts de la tribologie sur la société [1].

### I.3. Aspects scientifiques de la tribologie

La tribologie est un domaine pluridisciplinaire, dans lequel interviennent, bien sur, 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.

Deux types de sciences en proposent une approche: la physique des surfaces et des solides et la physico-chimie.

##### **I.4.1. Structure d'une surface usinée**

Surface d'un solide le sépare du milieu ambiant, elle est caractérisée par sa structure physico-chimique et par sa géométrie.

Une surface usinée est une zone complexe qui recouvre la masse du solide comme une peau. Ses propriétés, différentes de celle du corps du solide, jouent un rôle fondamental dans le comportement tribologique d'un couple cinématique. Une surface possède également une épaisseur, qui s'étend de l'extérieur jusqu'à l'intérieur du solide. La figure I.1 illustre ce concept d'une façon schématique.

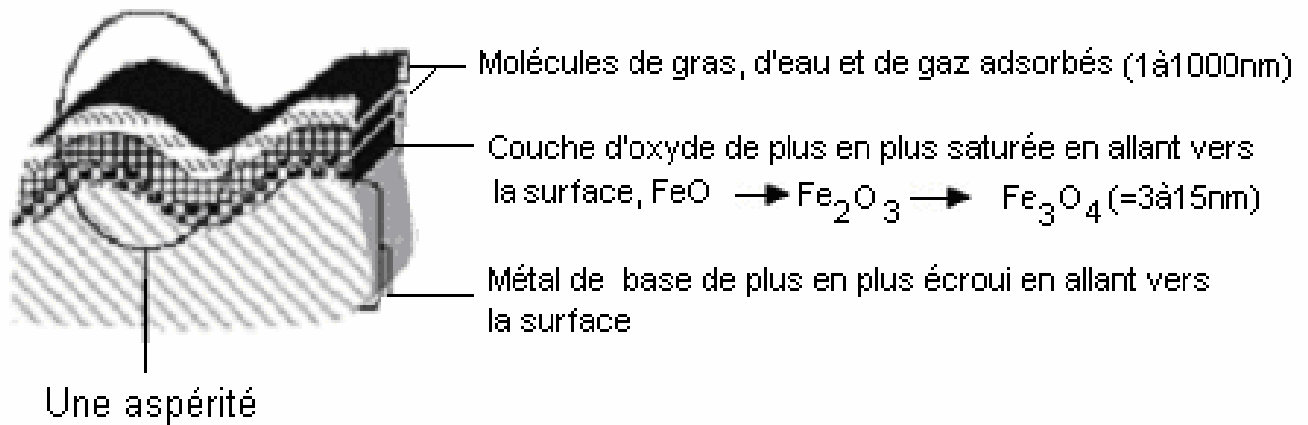


Figure I.1 : Composition schématique des couches superposées d'une surface [3].

A l'extérieur du solide (surface extérieure), les atomes possèdent des valences non saturées créant ainsi un champ de force électrostatique. On retrouve inévitablement une couche d'oxyde sur le solide. Même des matériaux nobles comme l'or ou le platine forment une couche d'oxyde sur leur surface dans l'atmosphère. L'épaisseur et les propriétés mécaniques de la couche d'oxyde varient selon le matériau et le temps d'exposition à l'atmosphère. Cette couche d'oxyde joue un rôle important dans le frottement et l'usure de la surface, sans celle-ci, tous les matériaux se soudent les uns aux autres et les pièces en mouvement relatif grippent.

Sur la couche d'oxyde se trouve une couche adsorbée: eau, hydrocarbure gazeux ou liquide, azote, oxygène et toutes sortes d'autres composants qui se trouvent dans l'environnement immédiat de la surface et peuvent réagir avec le métal pour former des oxydes ou y diffuser. L'adsorption d'huile ou de graisse joue un rôle intéressant en lubrification. La couche adsorbée est très tenace, elle isole le métal de tout contact direct.

Sur la couche écrouie existe souvent une couche métallique amorphe, ou de cristaux concassés, appelée couche de Bielby (1921) comme l'indique la figure I.2, elle est produite par la fusion du métal puis son autotrempage par la masse froide voisine lors des opérations de finition telles que rectification et polissage. Cette couche, épaisse de quelques dizaines d'angströms.

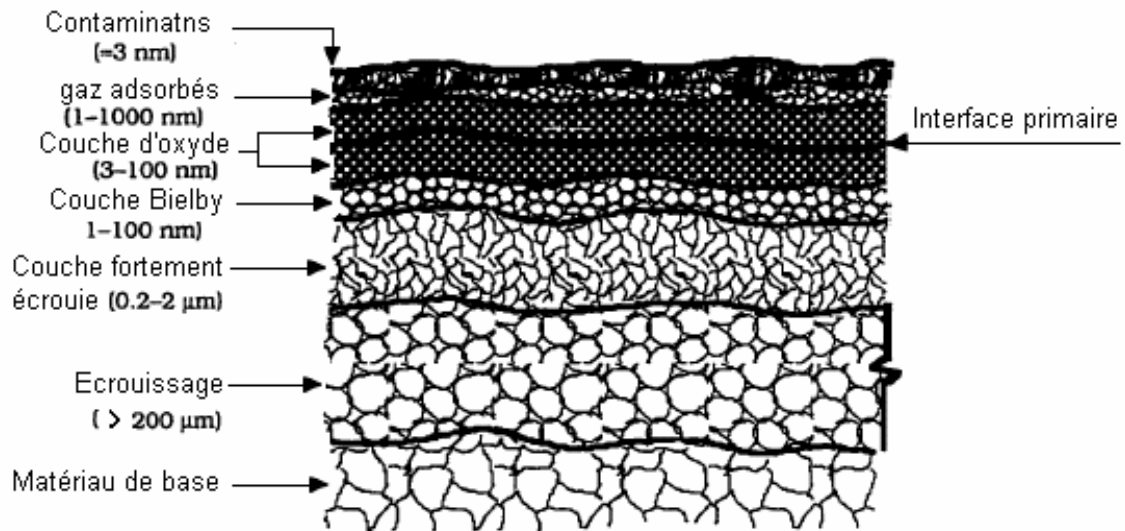


Figure I.2 : Schéma de la surface d'un solide [4].

En profondeur, en partant des aspérités, on trouve une couche de matériau plus ou moins écroûie. Le degré d'écroûissage et la profondeur de la couche écroûie dépendent du procédé de fabrication de la pièce, que ce soit par formage (forgeage, filage...), ou par enlèvement de copeaux (tournage, fraisage, brochage...).

La figure I.3 montre que les procédés de finition par électroérosion ou EDM « Electro Discharge Machining » ou par enlèvement chimique causent peu d'écroûissage et ont une influence sur une faible profondeur. La couche est le siège de contraintes résiduelles de compression.

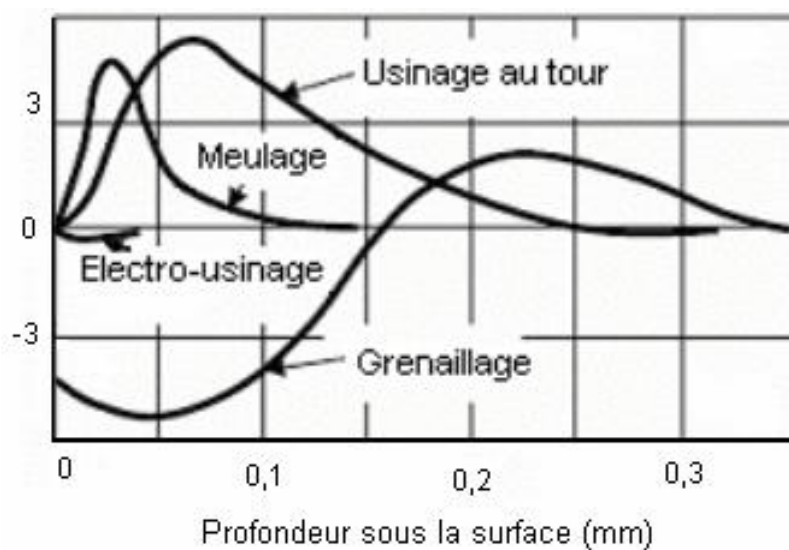


Figure I.3 : Contraintes résiduelles et profondeur de la couche écroûie selon le procédé de finition [3].

La dureté de la couche écrouie de son côté, et jusqu'à un certain point sa profondeur également, dépendent de la courbe  $\sigma$ - $\epsilon$  du matériau en question. La figure I.4 montre le comportement de trois matériaux typiques : (a) un aluminium qui durcit très peu à l'écrouissage; (b) un acier à haute teneur en carbone qui durcit moyennement à l'écrouissage; et (c) un alliage cuivreux qui durcit rapidement avec les déformations plastiques.

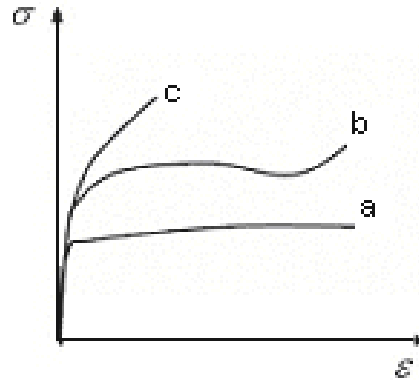


Figure I.4 : Comportement à l'écrouissage : (a) un aluminium ;(b) un acier G86400  
(c) un alliage de cuivre [3].

Les gaz ou les liquides ambiants sont adsorbés et peuvent réagir avec le métal pour former des oxydes ou y diffuser. L'adsorption d'huile ou de graisse joue un rôle important en lubrification. La couche adsorbée est très tenace, elle isole le métal de base de tout contact direct. La surface est en contaminée par des particules de poussière et un film moléculaire de substance environnante.

## I.4.2. Types de surface

La normalisation précise les termes (types) de surface à utiliser :

### 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, comme indique la figure I.5.

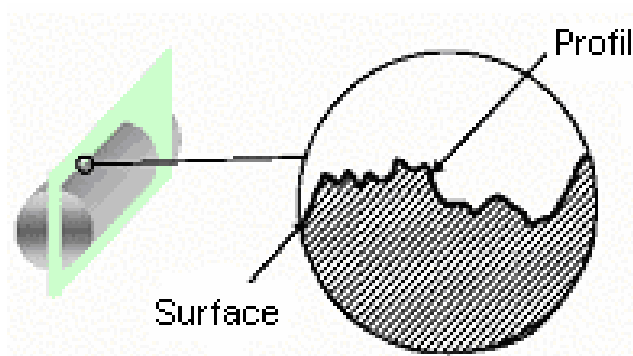


Figure I.5 : Profil d'une surface.

Le profil agrandi de la surface montre les défauts indiqués sur la figure I.6.

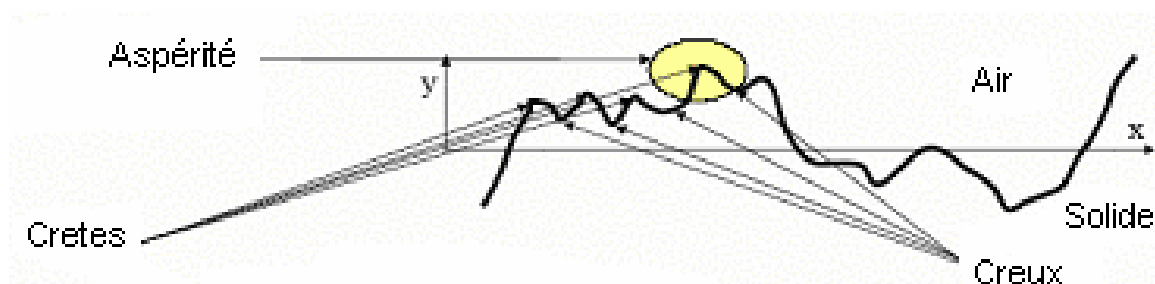


Figure I.6 : Défauts de profil d'une surface [5].

### I.4.3. Les ordres de défauts d'une surface géométrique

On sait que les cotes dimensionnelles des pièces sont sujettes à tolérances, mais les surfaces proprement dites sont aussi affectées par des irrégularités qui jouent un grand rôle dans le fonctionnement des mécanismes. On a classé les irrégularités selon l'échelle qu'il faut choisir pour les observer.

#### I.4.3.1. Défauts de forme

Les défauts de forme ou erreurs macrogéométriques, dites de premier ordre, proviennent des déformations de la pièce et de la machine-outil lors de l'usinage, telles que: les défauts de planéité, cylindricité, parallélisme, perpendicularité. La période  $x$  des défauts de forme est de plusieurs ordres de grandeur plus grande que leur amplitude  $y$  (figure I.7). Les défauts de forme se rapportent à la surface géométrique. On les mesure avec les instruments de métrologie comme le pied à coulisse ou le micromètre.

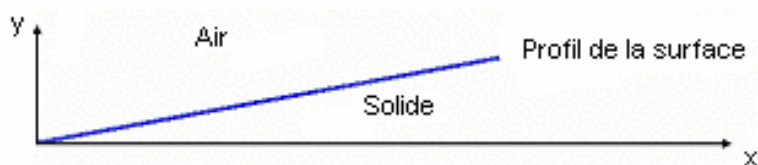


Figure I.7 : Période des défauts de forme d'une surface géométrique.

#### I.4.3.2. Défauts d'ondulation

Les irrégularités du deuxième ordre (figure.I.8) consistent en ondulations régulières engendrées par des vibrations de la pièce ou de la machine-outils, les ondulations sont apparentes à l'œil nu.

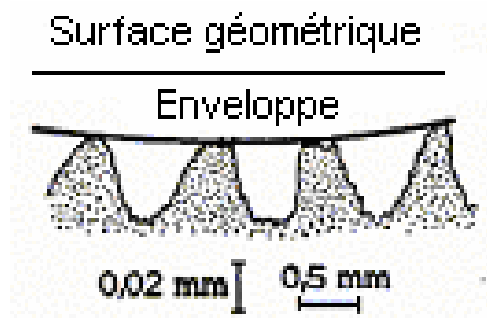


Figure I.8 : Défauts d'ondulation [6].

La période  $x$  des défauts d'ondulation (figure I.9) et de quelques ordres de grandeur plus grande que leur amplitude  $y$  soit de 0,1 à 50  $\mu\text{m}$ .

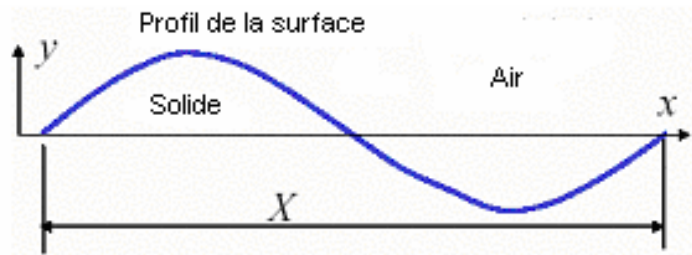


Figure I.9 : Période de défauts d'ondulation.

### I.4.3.3. Rugosité

A plus petite échelle, visible seulement à la loupe ou au microscope, on rencontre la rugosité. Elle résulte de stries ou sillons 3<sup>ième</sup> ordre (figure I.10) défauts périodiques de pas  $A_R$  voisin de 0.1 mm et une période  $A_w$ . Ces stries formées par l'avance progressive de l'outil (tournage, rabotage).

Le 4<sup>ième</sup> ordre ou les aspérités se forment lors de l'arrachage de la matière par les outils.

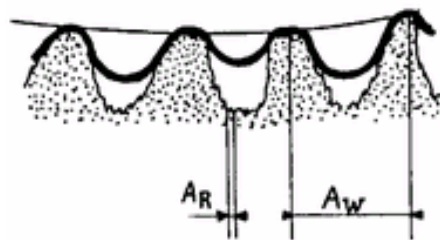


Figure I.10 : Rugosité de 3<sup>ième</sup> et 4<sup>ième</sup> ordre [6].

Le 5<sup>ième</sup> et 6<sup>ième</sup> ordre correspondent respectivement aux structures cristallines et moléculaires. Une surface réelle résulte de la superposition de la rugosité et des défauts de forme (figure I.11).

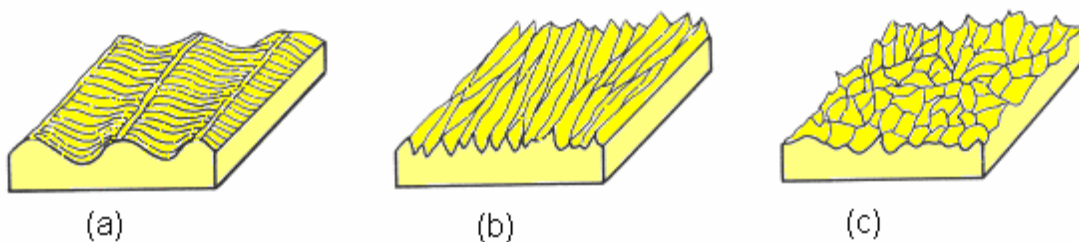


Figure I.11 : Structure de surfaces (a) stries régulières ; (b) stries orientées ; (c) aspérités irrégulières [7].

Vu son importance fonctionnelle, on exprime la rugosité par des grandeurs normalisées (figure I.12).

- Rugosité moyenne  $R_a$
- Rugosité quadratique moyenne  $R_q$

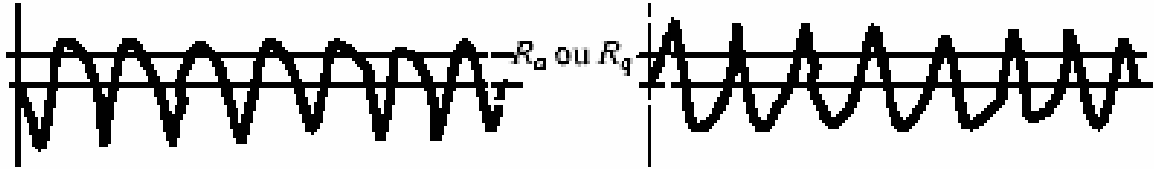


Figure I.12 : Grandeurs de rugosité normalisées [3].

#### I.4.4. Mesure des défauts

Le profil d'une surface est le résultat de la superposition de trois types de défauts précédents. Les défauts de forme sont facilement mesurés avec les instruments de métrologie classiques comme le micromètre ou le pied à coulisse parce que leur période en  $x$  est grande. La période des défauts d'ondulation et de rugosité étant plus petite, un palpeur capable de les détecter doit aussi être petit. L'appareil le plus utilisé pour cette tâche est le profilographe, dont un schéma est donné à la figure I.13. Cet appareil comprend un stylet durci (diamant), qui se déplace sur la surface à très basse vitesse (1mm/s). Le stylet est terminé par une petite pointe ( $\approx 0.5$  micromètre de rayon), qui agit un peut comme un filtre à haute fréquence, les contours plus petits que le rayon de la pointe du palpeur ne sont pas enregistrés [5,28].

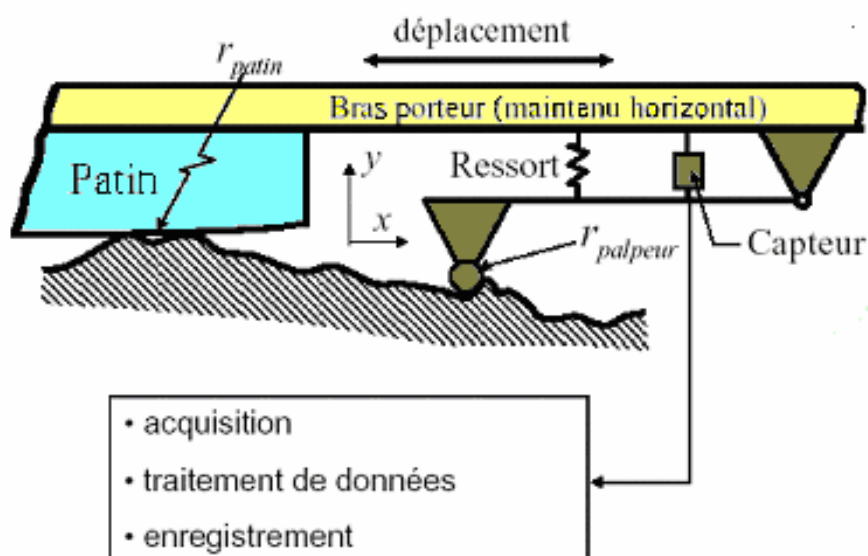


Figure I.13 : Mesure des défauts de surface par un profilographe [5].

Le déplacement du stylet sur le profil est transformé en signal électrique par le capteur, numérisé et ensuite traité à l'aide d'un ordinateur par des techniques statistiques. La méthode du profil par contact mécanique d'un palpeur introduit des erreurs de résolution, de distorsion et d'endommagement de la surface.

La distorsion causée par une amplification différente selon  $x$  et  $y$  fait apparaître les pentes du profil beaucoup plus abruptes (quasi verticales), qu'en réalité (figure I.14).

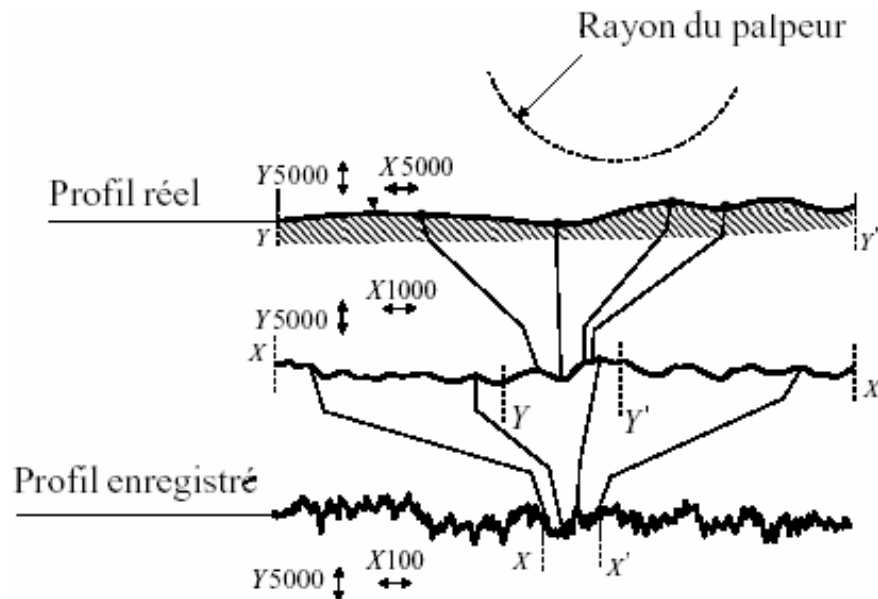


Figure I.14 : Distorsion d'une surface [5].

Une première limitation du profilographe provient du rayon et de la forme du palpeur, qui ne peut pas détecter des creux profonds et étroits.

Certains appareils spécialisés utilisent un palpeur d'un rayon aussi petit que 0,1 micromètre. Une seconde limitation du profilographe provient de la pression que le ressort exerce sur le palpeur. Ceci cause une distorsion ou endommage la surface en empêchant de détecter les crêtes les plus hautes.

Des appareils optiques enregistrent sans contact les défauts de surface par interférométrie, donc sans distorsion ni endommagement.

#### I.4.5. 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 par :

### I.4.5.1. Ligne de référence

Ligne par rapport à laquelle les paramètres statistiques qui caractérisent le profil d'une surface sont déterminés (figure I.15).

Les paramètres essentiels qui caractérisent le profil d'une surface sont la hauteur des irrégularités. Les irrégularités sont les crêtes et les creux du profil (aspérités).

Les crêtes et les creux sont définis comme les endroits du profil où la pente devient nulle. La hauteur des irrégularités est mesurée perpendiculairement à la ligne de référence.

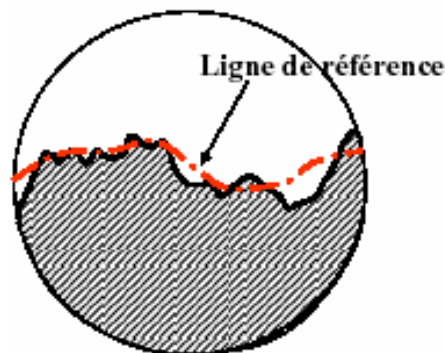


Figure I.15 : Ligne de référence.

### I.4.5.2. Longueur de base ( $l_i$ )

Longueur sur la ligne de référence utilisée pour séparer les irrégularités constituant la rugosité de surface (figure I.16). Plus la longueur de base est courte, plus les irrégularités de rugosité sont fines.

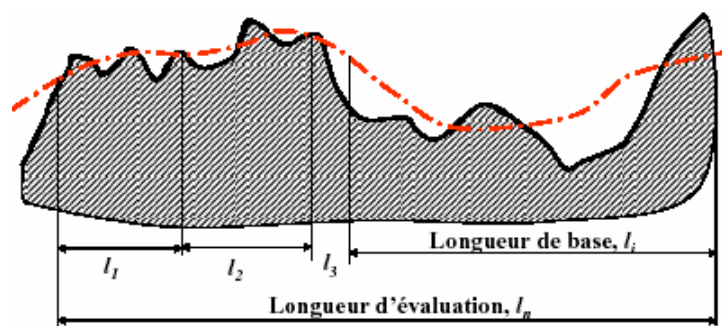


Figure I.16 : Longueur de base [5].

### I.4.5.3. Longueur d'évaluation ( $l_n$ )

Longueur utilisée pour déterminer les valeurs de paramètres de rugosité d'une surface (figure I.16). La longueur d'évaluation peut contenir plusieurs fois la longueur de base.

#### I.4.5.4. Ligne de référence des moindres carrés (ligne moyenne)

Ligne de référence divisant le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base (figure I.17), la somme des carrés des écarts des crêtes et des creux mesurés à partir de cette ligne soit minimale.

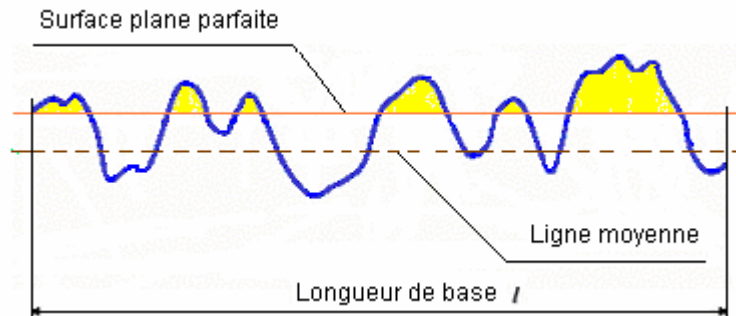


Figure I.17: Ligne moyenne [5,28].

### I.5. Mesure de la rugosité

#### I.5.1. 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 I.18).

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

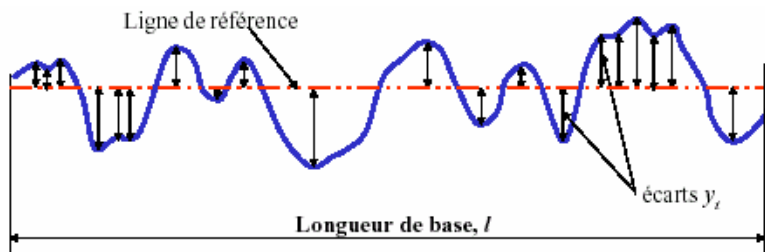


Figure I.18: Ecart quadratique moyen [5].

#### I.5.2. Ligne de référence arithmétique (ligne centrale)

Ligne de référence divisant le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base (figure I.19) les sommes des aires des solides et des vides compris entre celle-ci et le profil soient identiques.

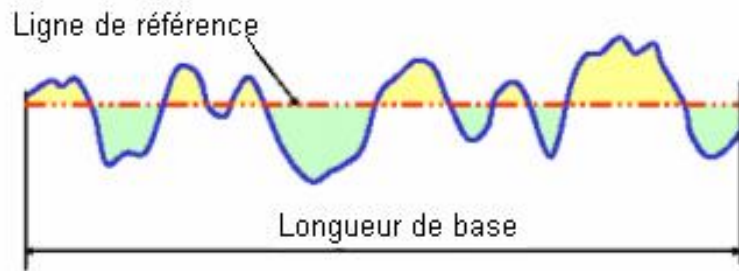


Figure I.19 : Ligne de référence arithmétique [5,29].

### I.5.3. 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 I.20).

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i| \quad (I.2)$$

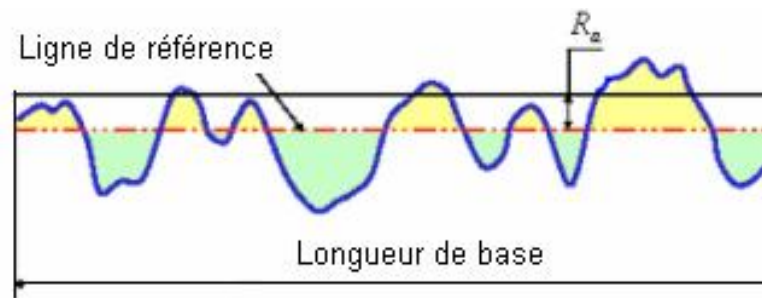


Figure I.20 : Ecart arithmétique moyen du profil  $R_a$  [5,].

Le tableau I.2 donne quelques valeurs types de rugosité  $R_a$  obtenues avec divers procédés de fabrication métallique.

Procédé de finition	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]
Verre solidifié en flottaison sur un métal fondu	0,001
Verre et métal très finement polis	0,0015 à 0,0020
Polissage et pièces moulées	0,01 à 0,10
Meulage commercial	0,025 à 0,25
Usinage de bonne qualité	0,25 à 2,50
Surfaces laminées et tréfilées	1,0 à 10

Tableau I.2 : Valeurs types de rugosité arithmétique moyenne [5].

## I.6. Mécanique du contact

Dans cette section, on considère le contact statique de deux corps chargés par une force normale unique. Les buts de ces études sont les suivants: il s'agit de calculer l'aire de contact entre deux solides, la pression de contact entre les solides et la distribution des contraintes à l'intérieur des solides, en utilisant les lois de la mécanique des milieux continus.

Les types de contact entre les surfaces varient avec la géométrie des solides en contact (plan/ plan, cylindre/ plan, sphère /plan). Ils se ramènent aux trois types suivants: Contact surfacique, contact linéaire et contact ponctuel (figure I.21).

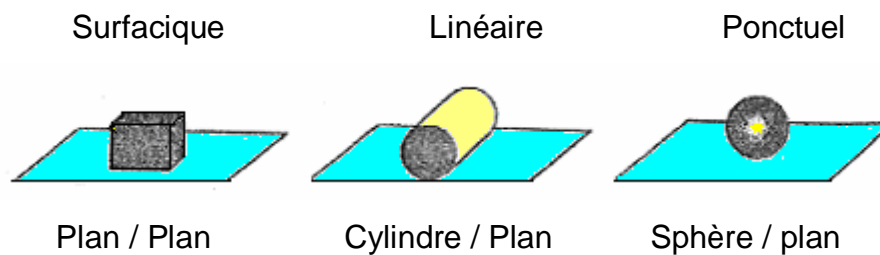


Figure I. 21 : Types de contact [1].

Les surfaces en contact se touchent par le sommet de leurs aspérités. Si les aspérités sont représentées idéalement par des sphères ou des cylindres, on aura alors les situations possibles schématisées dans la figure I.22.

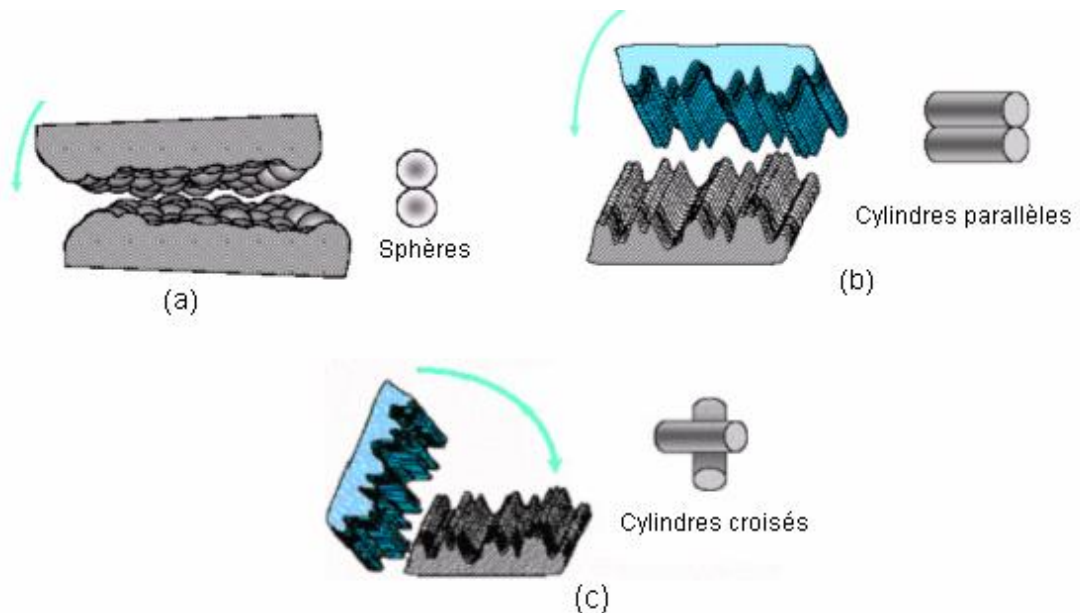


Figure I.22 : Différentes situations des aspérités :(a) sphère ;(b) cylindres parallèles (c) cylindres croises [5].

### I.6.1. Géométrie des aspérités

En ramenant les facteurs d'amplification en x et y à la même valeur, le sommet des aspérités est arrondi et peut être supposé lisse (figure I.23).

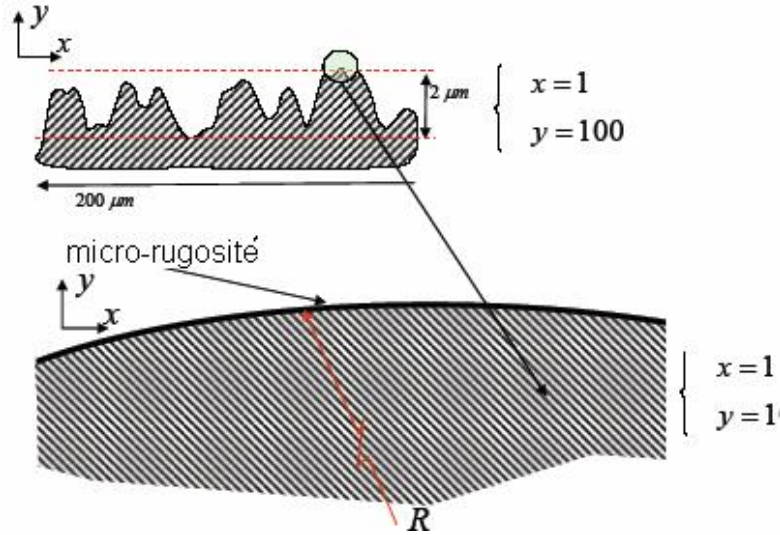


Figure I.23: Géométrie des aspérités [5].

### I.6.2. Relations géométriques

Le rayon moyen  $r_m$  peut être relié au paramètre  $R_a$  (figure I.24) par la relation empirique :

$$r_m \approx \frac{S_m^2}{4p^2 R_a} \quad (1.3)$$

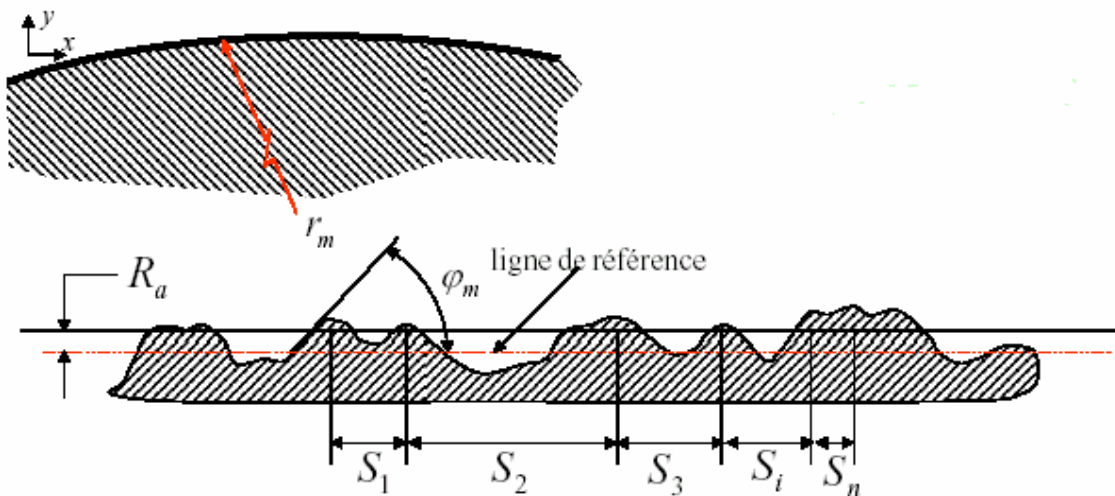


Figure I.24 : Rayon moyen d'une aspérité [5].

### I. 6.3. Contact sur une aspérité

Quand deux solides sont en contact, ils se touchent par le sommet de leurs aspérités. Ils feront d'abord contact par une aspérité. Au début du contact,  $N=0$  et les deux aspérités vont tout simplement s'effleurer et se touchent par un point ou une ligne (figure I.25).

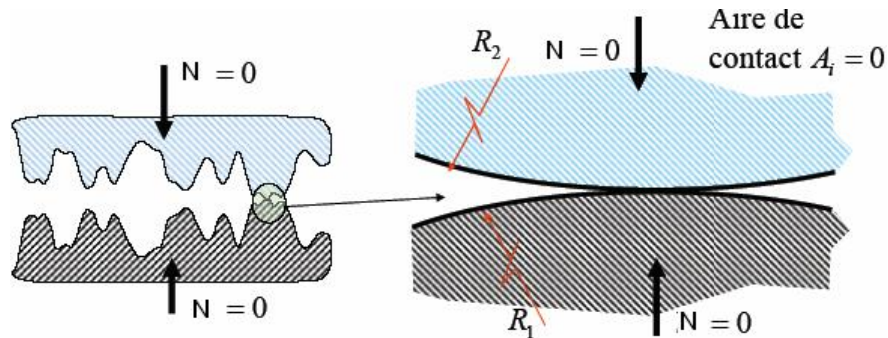


Figure I.25 : Contact sur une aspérité [5].

### I.6.4. Déformation élastique de la surface de contact

La déformation élastique repose sur les hypothèses suivantes :

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

Les dimensions de l'aire de contact, par exemple le rayon  $a$ , sont petites par rapport au rayon de courbure des surfaces ( $a \ll R$ ) (figure I.26).

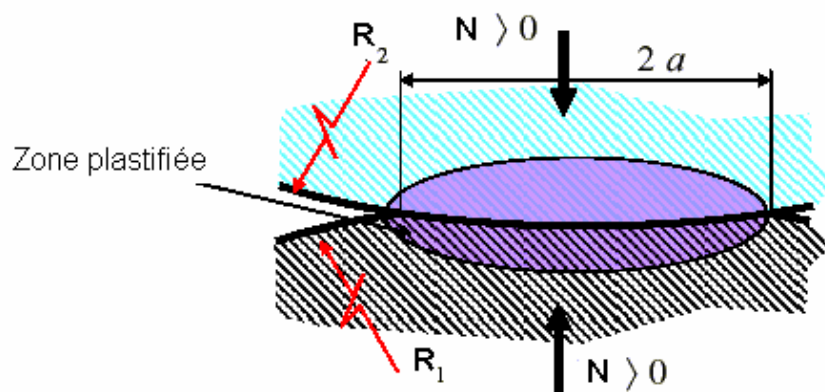


Figure I.26 : Déformation élastique de la surface de contact [8].

### I.6.5. 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.27), linéique dans le second (figure I.28).

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].

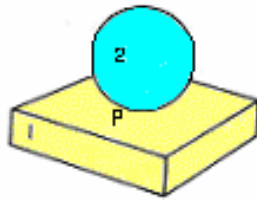


Figure I.27 : Contact ponctuel.

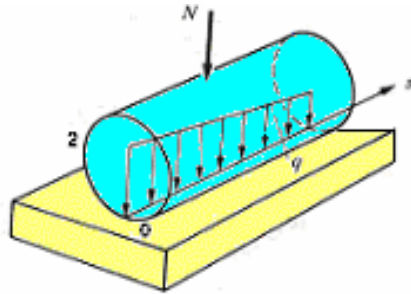


Figure I.28 : Contact linéique.

on a :

$$N = \int_0^l q(s) ds \quad (1.4)$$

La distribution  $q(s)$  dépend des déformations locales.

L'aire de contact étant  $A$ , la pression de contact est :

$$P = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{N}{A} = \infty \quad (1.5)$$

C'est un résultat évidemment absurde. En réalité, les solides se déforment au voisinage du contact de manière à former une surface d'aire finie (figure I.29).

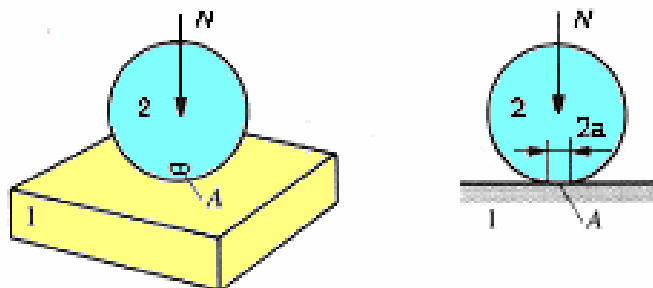


Figure I.29 : Aire de contact d'une bille sur un plan.

### I.6.6. Contact extérieur entre deux sphères

Soit  $R_1$  et  $R_2$  le rayon de deux sphères (figure I.30),  $E_1$  et  $E_2$  les modules d'élasticité et  $n_1, n_2$  les coefficients de poisson de leur matériau.

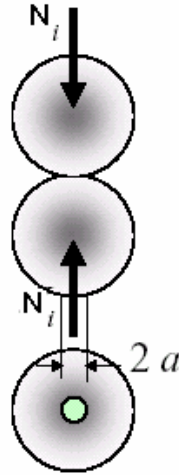


Figure I.30 : Contact extérieur de deux sphères.

La surface de contact est un cercle de rayon

$$a = \sqrt[3]{\frac{3N}{2E} \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)}} \quad (1.6)$$

On a posé pour alléger l'écriture, le module d'élasticité réduit :

$$E = 2 \left( \frac{1 - m_1^2}{E_1} + \frac{1 - m_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (1.7)$$

Les centres de sphères chargées par une force  $F$  se rapprochent de:

$$f = \sqrt[3]{\frac{9}{16} \left( \frac{1 - m_1^2}{E_1} + \frac{1 - m_2^2}{E_2} \right)^2 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) F^2} \quad (1.8)$$

Pour des matériaux dont le coefficient de poisson vaut 0.3 :

$$f = 1,231 \sqrt[3]{\frac{F^2}{RE^2}} \quad (1.9)$$

Avec le rayon réduit :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (I.10)$$

Dans le cas particulier d'une bille de rayon  $R_1$  sur un plan,  $R_2 = \infty$  et  $R = R_1$ .

On tire la force en fonction de la déformation :

$$F = \frac{E\sqrt{R}}{1.365} f^{\frac{3}{2}} \quad (I.11)$$

La pression hertzienne, au centre du cercle de contact:

$$P_0 = \frac{3F}{2\pi a^2} = 0,3644 \sqrt[3]{E^2 F \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^2} \quad (I.12)$$

$P_0$  est aussi la contrainte maximale  $s_{zz}$  comme indique la (figure I.31a).

On utilise aussi souvent le concept de pression moyenne  $s_m$  sur la surface de rayon  $a$  (figure I.31b).

$$s_m = \frac{F}{\pi \cdot a^2} = \frac{2}{3} s_{zz} \quad (I.13)$$

Dans le cas du contact d'une sphère de rayon  $R$  et d'un plan de rayon infini, la pression est :

$$P_0 = 0,3644 \sqrt[3]{\frac{E^2 F}{R^2}} \quad (I.14)$$

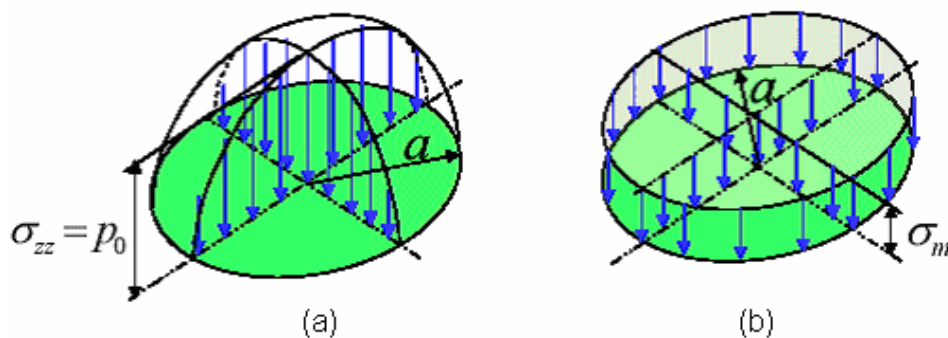


Figure I.31 : Distribution des contraintes: (a) contrainte maximale ;(b) pression moyenne [5].

### I.6.7. 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.32).

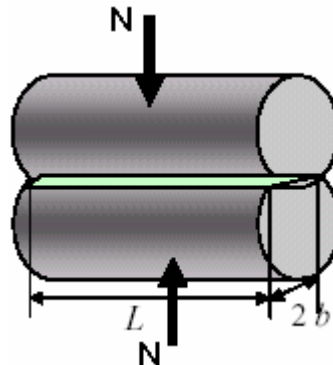


Figure I.32 : Contact extérieur de deux cylindres parallèles [5].

$$b = \sqrt{\frac{8F}{p \cdot l \cdot E \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}} \quad (I.15)$$

L'aire de contact  $A = 2bL$

La pression hertzienne sur l'axe du rectangle de contact vaut :

$$P_0 = 0,3979 \sqrt{\frac{F}{l} E \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)} \quad (I.16)$$

$P_0 = s_{zz}$  (la contrainte maximale)

La contrainte moyenne est :  $s_m = \frac{F}{2bL} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{F' p \cdot E}{R}}$  (I.17)

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

$F' = \frac{F}{L}$  est la charge par unité de longueur reprise par l'aspérité.

### I.6.8. Contact du cylindre sur un plan

La déformation ne peut pas se calculer par la théorie de Hertz. Palmegreen donne un résultat empirique pour de l'acier [7] :

$$f = 1,53 \times 10^{-10} \frac{F^{0,9}}{b^{0,8}} \quad [m] \quad (I.18)$$

Où  $F$  est la charge exprimée en [N] et  $b$  la longueur de la ligne de contact en [m].

La figure I.33 représente la relation entre force et déformation d'un cylindre et d'une sphère sur un plan.

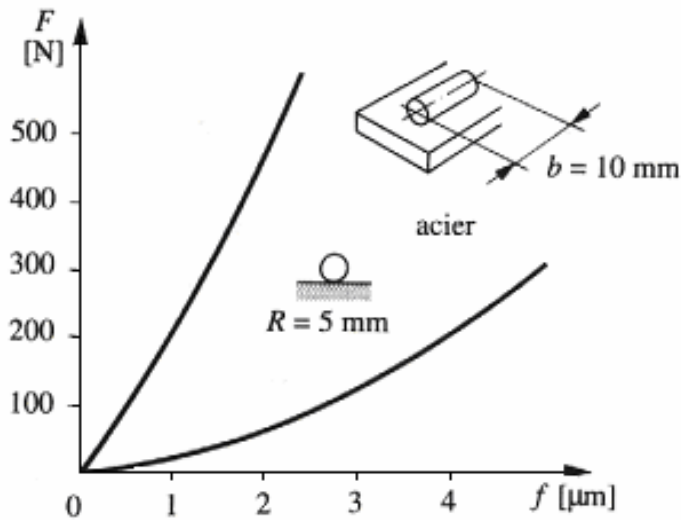


Figure I.33 : Relation force-déformation d'un cylindre et d'une sphère sur un plan [7].

### I.6.9. Contact plan

Une pièce (2) supposée infiniment rigide est appliquée sur une plaque épaisse reposant elle-même sur une base rigide (figure I.34a). 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 la surface d'appui, diminue vers le bord.

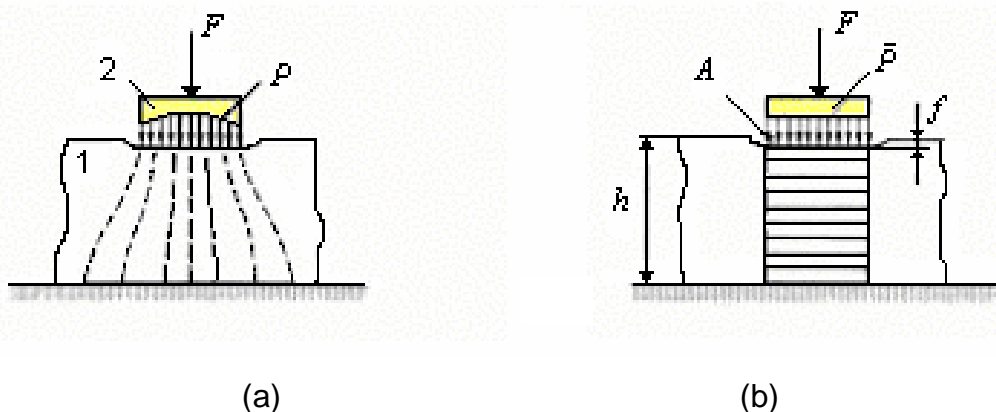


Figure I.34 : Enfoncement d'une pièce dans une plaque  
(a) champ de force ; (b) modèle de calcul [7].

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.34b) que la pression

soit uniformément répartie sur la surface d'appui d'aire  $A$  et qu'elle comprime une colonne imaginaire de même section.

La déformation de la colonne est donnée par la loi de Hooke:

$$f_0 = \frac{h}{EA} F = \frac{\bar{P}}{E} h \quad (1.19)$$

L'enfoncement réel  $f$  est plus petit que la déformation théorique parce que la colonne est encastrée dans la plaque. On écrit :

$$f = y \frac{h}{EA} F = y \frac{\bar{P}}{E} h = y \cdot f_0 \quad (1.20)$$

Le facteur de correction  $y$  est plus petit que l'unité, il dépend de la forme de la surface d'appui, des propositions géométriques et du coefficient de Poisson.

Dans le cas d'une surface circulaire de diamètre  $D$  et d'un métal avec  $m=0,3$ .

On a par exemple :  $D = 20h \quad y = 0,55 \quad D = 2h \quad y = 0,65$

On voit toute l'importance de l'effet d'encastrement. La rigidité de la plaque vis-à-vis de l'écrasement vaut :

$$K = \frac{EA}{y \cdot h} \quad (1.21)$$

## **I.7.Surfaces de contact**

### **I.7.1. Surface de contact nominale**

Deux pièces conformes se touchent par une surface géométrique finie (figure I.35) 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].

$$P = \frac{N}{A} \quad (1.22)$$

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

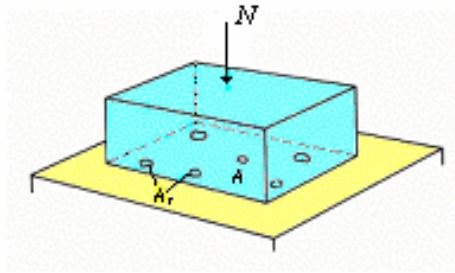


Figure I.35 : Aires de contact.

### I.7.2. Surface de contact réelle

Agrandissons fortement la coupe de la surface de contact de deux corps (figure I.36). Même si les surfaces paraissent macrogéométriquement parfaitement polies, elles présentent chacune des aspérités dont certaines touchent ponctuellement la surface opposée.

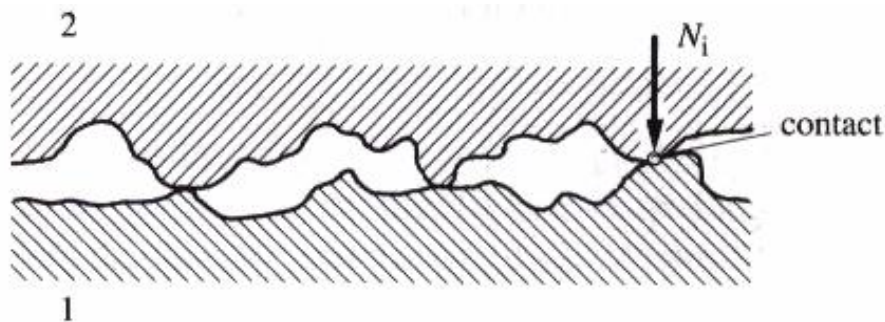


Figure I.36 : Contact de deux surfaces [7].

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  $P$ .

Une aspérité progressivement chargée par une force  $N_i$  subit tout d'abord une déformation élastique. En admettant que l'extrémité de l'aspérité soit sphérique, le matériau subit une déformation plastique et l'aspérité s'écrase en augmentant l'aire de contact. La pression de contact ne peut pas dépasser la pression de plastification  $P_e$  tant que l'aspérité n'est pas complètement aplatie. La surface de contact de l'aspérité est :

$$A_{ri} = \frac{N_i}{P_e} \quad (1.23)$$

En état de déformation plastique, l'aire de contact d'une aspérité croit proportionnellement à la charge. La pression de plastification est en relation avec la limite élastique  $R_e$  du matériau. Pour les métaux et une aspérité sphérique on a :

$$P_e \approx 3R_e \quad (1.24)$$

On notera que, même si la pointe d'une aspérité est déformée plastiquement, la charge est transmise au corps de la pièce par une zone plus massive où les déformations restent le plus souvent dans le domaine élastique.

### 1.7.3. 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 comme indique la figure 1.37.

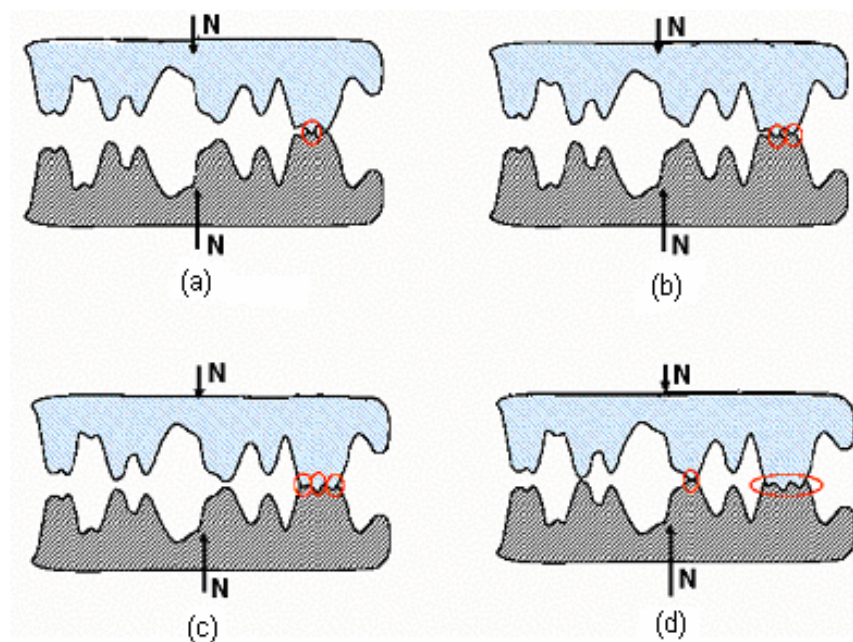


Figure 1.37 : Contact des aspérités : (a) sur une aspérité ;(b) sur deux aspérités ;  
(c) sur trois aspérités ; (d) sur quatre aspérités [5].

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 1.38).

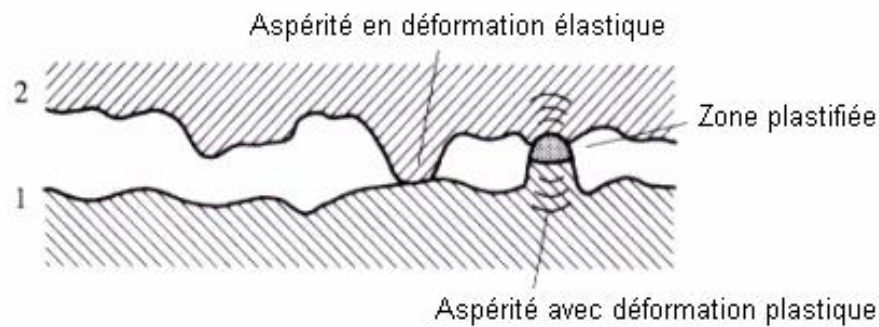


Figure I.38 : Surfaces en contact par leurs aspérités [7].

Des expériences ont prouvé que l'augmentation de la surface de contact réelle avec la charge est due à l'accroissement du nombre de points de contact autrement dit, à l'agrandissement des aspérités déjà écrasées.

On peut raisonner comme si toutes les aspérités en contact se trouvaient en état de sollicitation plastique. Comme  $N = \sum N_i$ , l'aire de contact réelle est :

$$A_r = \frac{N}{P_e} \quad (1.25)$$

En exprimant la charge à partir de la pression apparente  $N = AP$

Calculons le rapport de la surface de contact réelle à la surface nominale

$$\frac{A_r}{A} = \frac{P}{P_e} \quad (1.26)$$

#### I.7.4. Surface de contact en présence d'une force de cisaillement

Supposons qu'une aspérité chargée par une force normale  $N_i$  soit plastifiée (pression d'écrasement plastique  $P_e$ ), elle est en contact par une surface d'aire (figure I.39a).

$$A_{r,i} = \frac{N_i}{P_e}$$

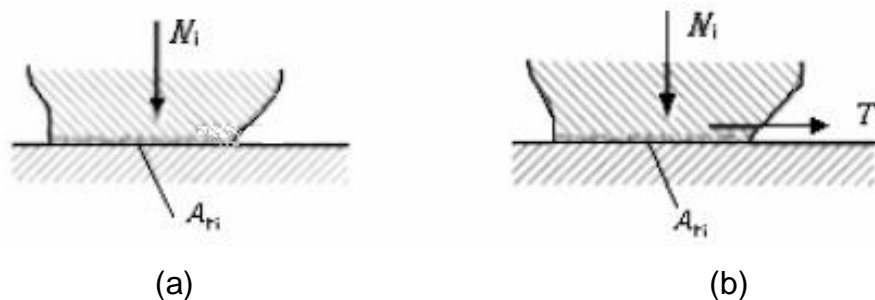


Figure I.39 : Aire de contact d'une aspérité : (a) charge normale seule ;(b) avec force tangentielle [7].

L'application d'une force tangentielle  $T_i$  provoque une déformation latérale qui accroît la surface de contact jusqu'à la valeur  $A_{ri.T}$  (figure I.39b). Les sollicitations de la nouvelle surface de contact sont :

- . Contrainte de compression

$$P_{ri} = \frac{N_i}{A_{ri.T}}$$

- . Contrainte de cisaillement

$$t_{ri} = \frac{T_i}{A_{ri.T}}$$

Selon la théorie de Von Mises pour l'écoulement plastique des matériaux, la plastification intervient lorsqu'une relation de la forme suivante est satisfaite :

$$P_{ri}^2 + Ct_{ri}^2 = R_{lim}^2$$

Où  $C$  est une constante et  $R_{lim}$  une limite caractéristique du matériau. Si  $T_i = 0$ , la plastification intervient lorsque  $P_{ri} \approx P_e$ , donc  $R_{lim} = P_e$  et :

$$P_{ri}^2 + Ct_{ri}^2 = P_e^2 \quad (1.27)$$

En introduisant l'expression des contraintes, cette équation fournit l'aire de la surface de contact avec des charges normales et tangentielles :

$$A_{ri.T} = \sqrt{\left(\frac{N_i}{P_e}\right)^2 + C\left(\frac{T_i}{P_e}\right)^2}$$

On sait que :  $A_{ri} = \frac{N_i}{P_e}$

donc

$$A_{ri.T} = A_{ri} \sqrt{1 + C\left(\frac{T_i}{N_i}\right)^2} \quad (1.28)$$

La constante  $C$  a été déterminée empiriquement, est comprise entre 12 et 27. On voit que la surface de contact d'une aspérité augmente lorsqu'elle est sollicitée par une force tangentielle.



## CHAPITRE II

# PHENOMENES INTERFACIAUX ENGENDRES PAR LES PROCESSUS DE FROTTEMENT ET D'USURE

### II.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. Nous tenons en compte comme évident les effets positifs. Rares sont les phénomènes qui sont conscients de l'importance du frottement dans la vie quotidienne. C'est le cas pour des opérations comme démarrer, arrêter, faire tourner une voiture, fixer des pièces, tenir un objet dans la main...etc.

Avec le frottement, il existe l'usure, qui est un vaste domaine couvert par la tribologie. L'usure des surfaces frottantes qui en résulte se traduit, le plus souvent en cours de fonctionnement, par une élévation de température, des modifications géométriques et dimensionnelles, des transformations physico-chimiques ou encore par des enlèvements de matière. Par ses aspects, le frottement et l'usure sont des phénomènes complexes dont l'étude nécessite de multiples approches.

On est toujours intéressé à réduire, voire supprimer l'usure afin de prolonger la durée de fonctionnement et la fiabilité des machines et des mécanismes.

Ce n'est, toutefois, que depuis peu de temps que des études spécifiques et approfondies sur l'usure sont entreprises. En effet, l'usure est toujours liée au frottement.

### 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 [9].

#### II.2.2. Force et coefficient de frottement

Une pièce (2) est appliquée contre une pièce plane (1) par une force  $N$  normale au point de contact (figure II.1). 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.

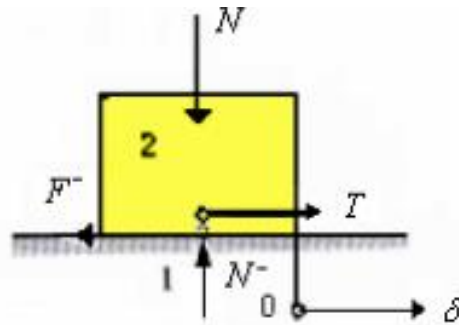


Figure II.1 : Force de frottement.

En observant le déplacement  $d$  du solide (2) à partir de sa position où  $T = 0$ , on observe d'abord un très petit mouvement qu'on appelle micro glissement lorsque  $T$  croît (figure II.2). Pour une certaine valeur  $T_0 = F_0$ , la pièce se met en mouvement, en supprimant la force tangentielle  $T$ , la pièce ralentit, puis s'arrête [7].

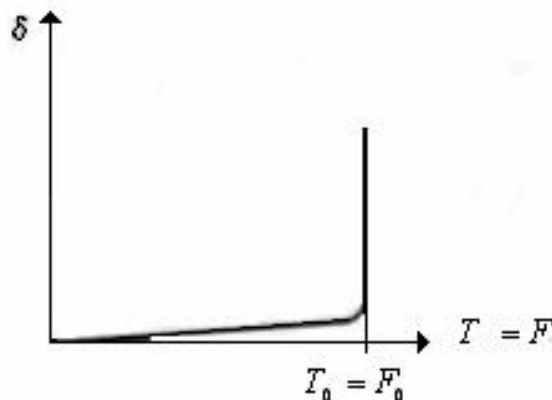


Figure II.2 : Mouvement de glissement [7].

Ces observations montrent qu'il existe un phénomène dans la surface de contact des pièces qui s'oppose à leur glissement relatif, c'est le frottement. On peut en donner la définition suivante : le frottement est un phénomène à la surface d'un corps qui empêche son glissement sur un autre corps (frottement statique) ou qui dissipe de l'énergie mécanique en cas de glissement (frottement dynamique).

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.

$$m = \frac{F}{N} \tag{II.1}$$

Où  $F = T$  est la force nécessaire à un glissement permanent et  $N$  la charge s'exerçant sur le solide (2) lors du déplacement. La formule II.1 est la loi d'AMONTONS qui est la seule formule actuellement disponible en frottement sec. La figure II.3 Représente la pièce (2) isolée. A l'équilibre statique :

- La réaction normale de la pièce (1) est égale et opposée à l'action de (2),  $N^- = -N$  ;
- La force de frottement est égale et opposée à la force tangentielle exercée sur (2),  $F^- = -T$  ;
- La réaction résultante de la pièce (1) est égale et opposée à la réaction de (2) ,  $R^- = -R$  .

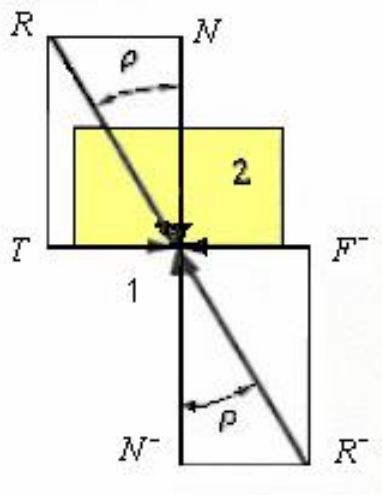


Figure II.3 : Angle de frottement [7].

L'angle de frottement indique l'inclinaison de la résultante par rapport à la normale à la surface, il vaut :

$$r = \arctan \frac{T}{N} = \arctan \frac{F}{N} \quad (II.2)$$

$$r = \arctan \frac{F}{N} \quad (II.3)$$

Où

$$m = \tan r \quad (II.4)$$

Le coefficient de frottement  $m$  n'est pas une propriété du matériau mais de l'ensemble du système tribologique. C'est-à-dire que, par exemple, un couple graphite-graphite a un coefficient de frottement de 0,1 environ dans une atmosphère normalement humide alors que ce coefficient est supérieur à 0,5 si l'atmosphère ambiante est très sèche.

Nous constatons que, la résultante  $R$  d'après la figure II.4 est toujours inclinée du même angle de frottement  $r$  par rapport à la normale, c'est-à-dire qu'elle se trouve toujours

sur un cône d'axe normal au plan et de demi angle au sommet  $r$ , que nous appelons cône de frottement.

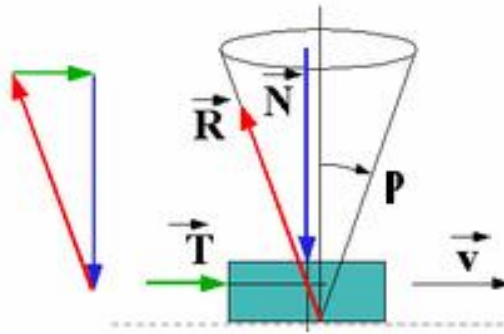


Figure II.4 : Cône de frottement.

Retenons que :

. S'il y a un glissement, la force de contact est sur le cône de frottement.

Le coefficient de frottement correspond à une égalité  $m = \frac{F}{N} = \tan r$  (le cône dans ce cas s'appelle cône d'adhérence).

. S'il n'y a pas de glissement, la force de contact est dans ou à la limite sur le cône.

Le coefficient d'adhérence correspond à une inégalité  $m_0 = \tan r_0 \geq \frac{F}{N}$

### II.2.3. Comportement du coefficient de frottement

Les principaux paramètres qui influencent sur le comportement du coefficient de frottement et par conséquent sa valeur sont :

#### II.2.3.1. Vitesse de glissement

La valeur du coefficient de frottement est généralement différente à l'arrêt que lorsque les corps glissent l'un sur l'autre on distingue :

- Le coefficient de frottement statique (à l'arrêt)  $m_0$ .
- Le coefficient de frottement dynamique (avec glissement)  $m$ .

Dans le cas de métaux secs, le coefficient de frottement dynamique est généralement plus petit qu'à l'arrêt (figure II.5, courbe (1)) il atteint rapidement la valeur dynamique lorsque la vitesse dépasse quelques cm/s. A très grande vitesse, plus de 150m/s, le coefficient de frottement des métaux diminue fortement, il peut tomber jusqu'à 0.02, parce que le métal fond dans les zones de contact et forme un film lubrifiant.

Certains matériaux non métalliques présentent au contraire une augmentation du frottement avec la vitesse, courbe (2) de la figure II.5.

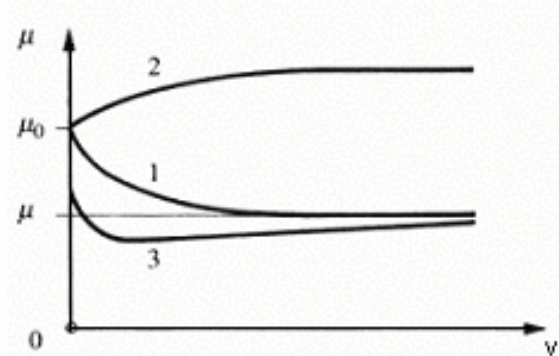


Figure II.5 : Influence de la vitesse sur le coefficient de frottement [7].

La différence entre le coefficient de frottement dynamique et le frottement statique est plus marquée avec les polymères qu'avec les métaux.

Si les surfaces sont abondamment lubrifiées en régime de frottement mixte, courbe(3) de la même figure, le coefficient de frottement statique est plus bas qu'en régime sec et diminue relativement moins avec le glissement, puis il augmente lentement du fait du cisaillement du liquide ou de la graisse.

On est habituellement intéressé par le frottement à des petites valeurs de vitesse 0,5m/s pour éviter l'échauffement et l'usure.

### II.2.3.2. Chemin de glissement parcouru

La figure II.6 représente l'allure de l'évolution du coefficient de frottement dynamique de surfaces techniques sèches avec le chemin de glissement, SUH distingue six stades :

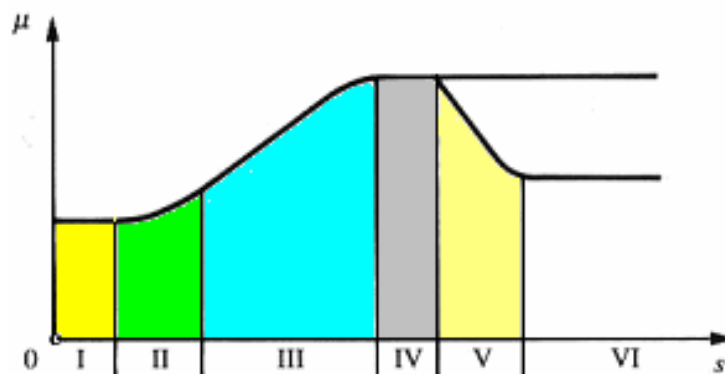


Figure II.6 : Evolution du frottement avec la distance de glissement [7].

**I** : Les surfaces sont initialement propres, le frottement résulte principalement de phénomènes de labourage et de déformation.

**II** : Le frottement commence à croître lentement à cause de petits arrachages de matière. Avec des surfaces lubrifiées, le stade **I** persiste longtemps et le stade **II** peut faire défaut.

**III** : Le coefficient de frottement croît parce que les débris d'usure entre les surfaces s'incruster dans l'une ou l'autre des surfaces en provoquant un intense labourage.

**IV** : Le coefficient de frottement se stabilise lorsque le nombre de nouveaux débris d'usure est égal au nombre de débris qui quittent la surface.

**V** : On observe parfois qu'un matériau dur se polit lorsqu'il frotte contre une surface tendre. Le coefficient de frottement diminue parce que le labourage est moins intense.

**VI** : Si les deux surfaces se polissent et que les débris d'usure sont enlevés ou assez profondément incrustés dans la surface tendre pour ne pas rayer la surface dure, le coefficient de frottement prend une valeur constante de fin de rodage.

Ces stades dépendent des matériaux, des conditions expérimentales, de la contamination des surfaces et des conditions ambiantes.

### **II.2.3.3. Etat de surface**

Le coefficient de frottement est relativement grand lorsque les surfaces sont très rugueuses.

### **II.2.3.4. Nature des métaux**

Le frottement diminue lorsqu'un des matériaux du couple tribologique est tendre, car l'effort de labourage est faible. C'est pourquoi on revêt les surfaces d'une fine couche d'un matériau tendre ou d'un film d'oxyde.

### **II.2.3.5. Charge normale appliquée**

La figure II.7 donne un exemple de la variation du coefficient de frottement  $m$  en fonction de la charge normale appliquée  $N$  pour du cuivre glissant sur du cuivre dans l'air et sans lubrification pour un essai pion-disque.

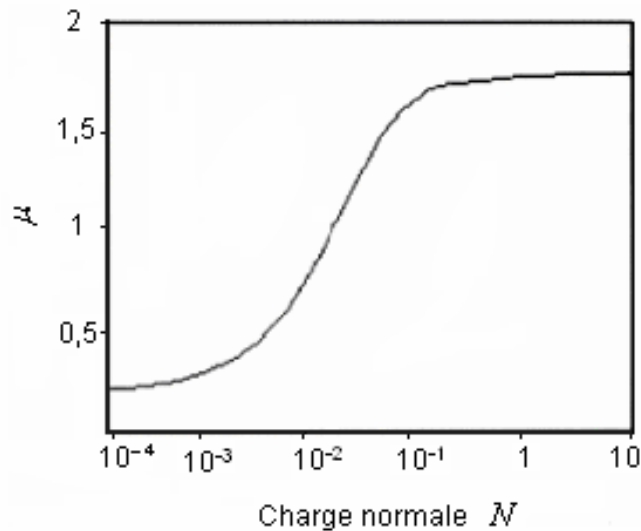


Figure II.7 : Variation du coefficient de frottement  $m$  en fonction de la charge normale  $N$  [7].

Avec l'augmentation de la charge appliquée, le film d'oxyde (1à10nm) qui joue un rôle critique dans le contact glissant est progressivement détruit, entraînant une augmentation progressive du coefficient de frottement qui se stabilise à une valeur correspondant au contact métal-métal.

#### II.2.3.6. Température ambiante

Le coefficient de frottement des métaux diminue souvent légèrement lorsque la température des pièces s'élève; puis, au-delà de 500°C à 800 °C, il augmente fortement. Ce comportement peut s'expliquer par le fait que la dureté du métal tombe rapidement, les points de contact tendent vers une plastification étendue.

Le coefficient de frottement des céramiques croît fortement (400 à 600 °C), puis diminue au-delà.

#### II.2.4. Valeurs pratiques du coefficient de frottement

L'étude théorique des mécanismes du frottement sec et mixte ne permet pas de prédire avec exactitude la valeur réelle du coefficient de frottement dans les couples cinématiques et dans les assemblages. Mais la compréhension du phénomène est précieuse pour choisir correctement les matériaux et savoir comment agir pour obtenir les caractéristiques de frottement souhaitées. Le coefficient de frottement d'un métal glissant sur un autre sans lubrification dans l'air varie de  $m=0,5$  à  $m=1,5$ . A l'exception de l'or ( $m=2$ ), les autres métaux s'oxydent dans l'air en formant un film d'oxyde de l'ordre de 1 à 10 nm d'épaisseur. Ce film

d'oxyde favorise un coefficient de frottement faible, pour de faibles pressions. C'est le cas du cuivre en friction sur lui-même dont le coefficient de frottement  $m=0,4$  pour une charge normale  $N < 10^{-2}$  N [WHITEHEAD, 1950]. Pour une charge  $N > 10^{-1}$  N, ce coefficient se stabilise à  $m \approx 1,8$ . Cet accroissement est dû à la rupture du film d'oxyde. Il y a transfert de métal et usure. Dans le cas d'un alliage métallique tel que l'acier (0,4% masse de carbone), la valeur du coefficient de frottement est relativement élevée ( $m \approx 1$ ) pour de faibles charges ( $N < 10^{-3}$  N). La valeur de  $m$  s'abaisse pour une charge  $N > 10^{-2}$  N ( $m \leq 0,5$ ). Cette transition est attribuée à l'incrustation du film d'oxydes de fer sous l'effet de la charge élevée assurant le maintien du contact entre films d'oxydes [BOWDEN, TABOR, 1950]. La fonte grise et les bronzes au plomb glissant sur un acier normal donnent des valeurs faibles du coefficient de frottement ( $m=0,2 - 0,4$ ).

Le tableau II.1 suivant donne des valeurs des coefficients de frottement de glissement pour quelques combinaisons de matériaux [3].

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

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

Si les deux corps sont des solides, la force de frottement est appelée frottement solide qui peut être du type glissement, roulement et glissement pivotement. Si l'un des deux corps est un fluide, la force est un frottement fluide.

Le frottement entre deux corps solides peut se faire sans lubrifiant (frottement sec), ou avec un lubrifiant gazeux, liquide ou solide, s'interposant entre les surfaces en contact.

## **II.2.5. Modèles de frottement**

### **II.2.5.1. 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.2.5.1.1. Adhérence**

L'adhérence a été longtemps employée par l'Ecole Anglaise pour expliquer les phénomènes de frottement. On trouve parmi les chercheurs, Desaguliers (1924), Tomlinson (1929), Hardy (1936) et plus récemment Bowden et Tabor (1950).

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) [7,28].

L'adhérence est favorisée par le contact qui existe entre les métaux lorsque les aspérités sont écrasées plastiquement. En séparant un métal dur pressé contre un métal mou, on constate que des particules de ce dernier sont arrachées et adhèrent à la surface du premier. Donc il y a transfert du métal mou sur le métal dur. On observe que l'adhérence est réduite avec l'augmentation de la dureté ou de la rugosité des corps en contact [7,29].

L'adhérence ne se manifeste habituellement pas, il n'est pas forcément d'exercer une force de traction afin de séparer deux solides qui ont été pressés modérément l'un contre l'autre parce que :

- 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, 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. Elle dépend notamment de la nature de la liaison, de la vitesse de séparation, de la géométrie du contact et des propriétés rhéologiques de l'interface.

On calcule la valeur de la force nécessaire pour provoquer le glissement des aspérités pressées contre une surface. Les aspérités sont en état de déformation plastique, la résistance au cisaillement est  $t_f$  [7].

La condition de glissement plastique s'écrit :

$$P_r^2 + Ct_f^2 = Ct_e^2 \quad (II.5)$$

$P_r$  : Pression de contact.

$t_f$  : Contrainte de cisaillement du matériau le moins résistant.

$C$  : Constante est comprise entre 12 et 27.

$t_e$  : La limite de cisaillement plastique de l'aspérité.

L'équation précédente fournit :

$$P_r = \sqrt{C(t_e^2 - t_f^2)} \quad (II.6)$$

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

$$N = P_r A_r \quad (II.7)$$

la force de cisaillement du film

$$T = t_f \cdot A_r \quad (II.8)$$

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

$$N = A_r \cdot H \quad (II.9)$$

$H$  : La dureté du matériau le plus mou.

Le coefficient de frottement 
$$m = \frac{T}{N} = \frac{t_f \cdot A_r}{A_r \cdot H} = \frac{t_f}{H} \quad (II.10)$$

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

L'application de la relation  $T = A_r t_f$  est évidente, si l'on veut avoir une force de frottement minimale, il est nécessaire de minimiser l'aire de contact réelle et la contrainte de cisaillement (figure II.8a).

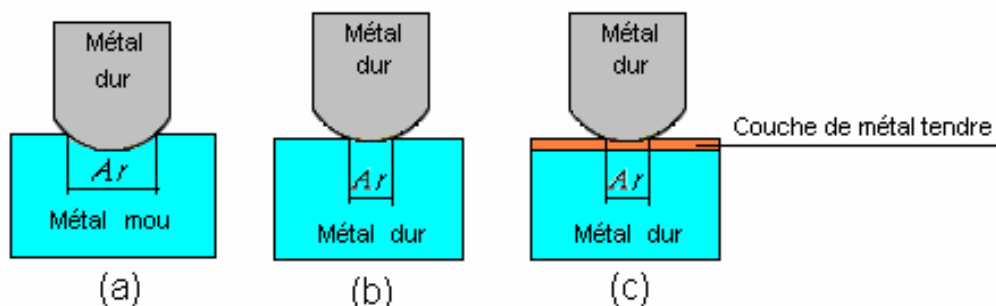


Figure II.8 : Optimisation du frottement [1].

Pour minimiser l'aire de contact, on utilise les métaux durs, comme les aciers trempés (figure II.8b).

Pour minimiser le cisaillement, on recouvre le contact d'un film mince réalisé avec un métal tendre comme le plomb ou l'argent (figure II.8c).

### II.2.5.1.2. Labourage

Une aspérité dure chargée par une force normale s'enfonce dans une surface tendre (figure II.9 a). L'application d'une force tangentielle repousse la matière tendre de sorte que l'aspérité ne porte que sur le flan opposé à la force (figure II.9 b). Au début du glissement, la matière de la base est repoussée et forme devant l'aspérité le bourrelet frontal (figure II.9 c), l'aspérité remonte au-dessus de sa position initiale.

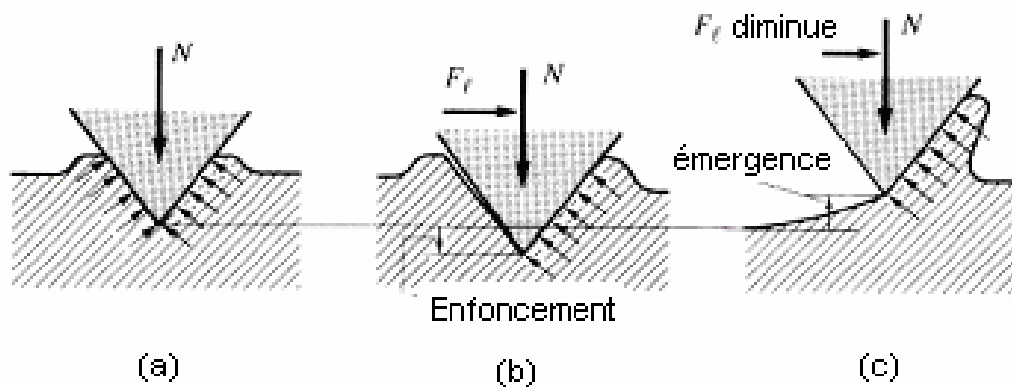


Figure II.9 : Début de labourage d'une surface tendre par une aspérité dure :(a) enfoncement statique ;(b) premier mouvement par une force tangentielle ;(c) émergence au début de glissement [7].

Les aspérités qui sont en contact se déforment, les autres se rapprochent et quelques-unes peuvent s'enchâsser. Lorsque le mouvement relatif débute, les aspérités enchâssées sont alors en interférence et doivent se déformer plastiquement pour que le mouvement se poursuive. Cet effet est à l'origine de la composante de déformation plastique  $F_{fd}$  de la force totale de frottement de glissement  $F_{fg}$  comme l'indique la figure II.10.

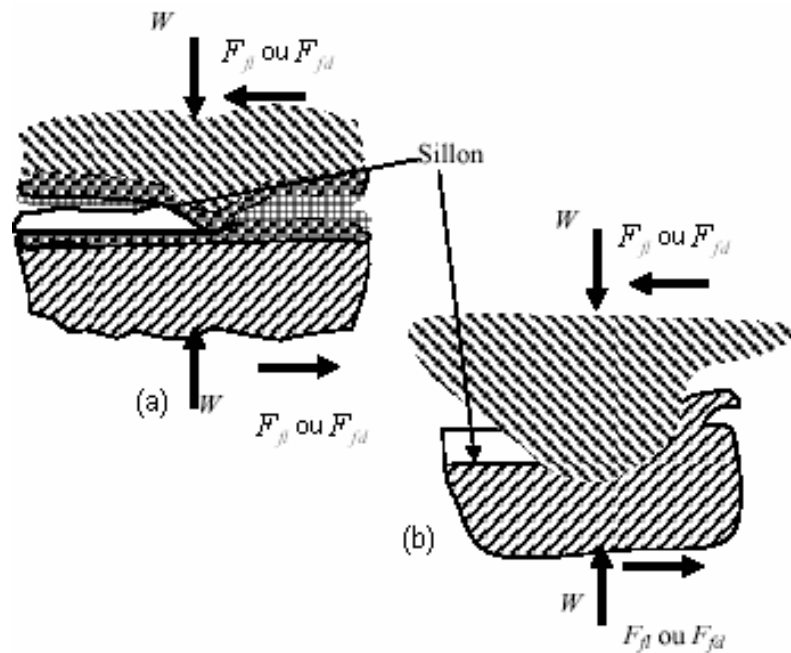


Figure II.10 : Laborage et déformation plastique d'une aspérité molle par une couche plus dure (a) dans les films d'oxyde ;(b) dans le matériau de base [3].

Dans cette analyse, on remarque les points suivants :

- Les aspérités sont soumises à des efforts de compression et de cisaillement qui s'écrivent comme suit :

$$d = \frac{W}{A_r} \text{ et } t = \frac{F_{fg}}{A_r} \quad (\text{II.11})$$

Où :  $W$  est la force qui presse les deux solides l'un sur l'autre et  $A_r$  est l'aire réelle de contact.

$$F_{fg} = F_{fa} + F_{fl} + F_{fd} \quad (\text{II.12})$$

$F_{fg}$  est la force de frottement globale de glissement,  $F_{fa}$  est la force de frottement de l'adhérence,  $F_{fl}$  est la force de frottement de labourage et  $F_{fd}$  est la force de frottement de déformation plastique.

- Tant que le mouvement persiste, le matériau des aspérités est soumis au bris en cisaillement donc :

$$t = S_{us,surface} \Rightarrow F_{fg} = A_r S_{us,surface} \quad (\text{II.13})$$

Où  $S_{us}$  est la limite finale en cisaillement.

### II.2.5.1.3. Lois d'AMONTONS-COULOMB

Sont Valables en frottement sec et en lubrification limite.

- Le frottement est indépendant de la surface de contact apparente entre les corps solides, comme l'indique la figure II.11 [10,28].

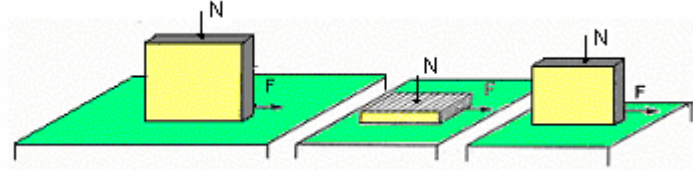


Figure II.11 : Différentes surfaces de contact d'un corps.

- Le frottement est proportionnel à la force tangentielle (figure II.12).

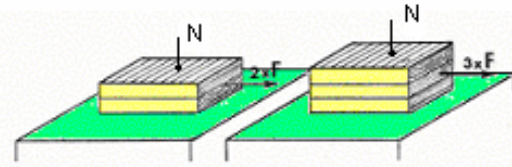


Figure II.12 : Proportionnalité du frottement avec la force tangentielle.

- Le frottement statique, force à vaincre pour provoquer le glissement.

- Le frottement dynamique (cinétique), force à vaincre pour maintenir le glissement.

Cette distinction est à la base de l'explication du phénomène de broutage ou "Stick-Slip", c'est-à-dire : arrêt-glissade ou colle-glisse (figure II.13). Le glissement intermittent est dû à une phase d'adhésion entre les surfaces (Stick), due au frottement statique plus élevé; suivie d'un rapide glissement (Slip), dû au frottement cinétique plus faible. Si l'une ou l'autre des surfaces peut se déformer élastiquement, elles se déplacent, ensemble jusqu'à ce que la ou les forces de rappel élastique soient suffisantes pour provoquer le glissement relatif.

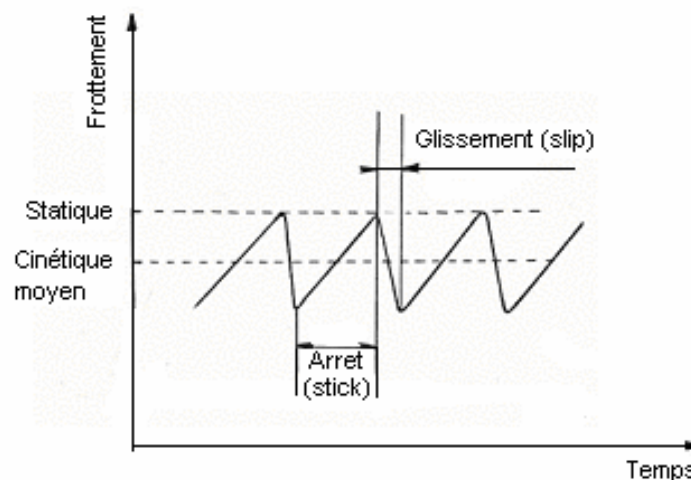


Figure II.13 : Broutage des surfaces [10].

Le stick-slip est un phénomène de broutement qui apparaît en frottement dynamique.

Ce broutement se traduit par un coefficient de frottement fluctuant rapidement en fonction du temps autour d'une valeur moyenne que l'on appelle coefficient de frottement. L'amplitude et la fréquence de ces fluctuations caractérisent le stick-slip que nous avons évalué de façon qualitative dans les essais [38].

#### II.2.5.1.4. La quantité de chaleur

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

$$q = \frac{m.N.V}{A_a} \quad \left[ \frac{\text{joule}}{\text{m}^2} \right] \quad \text{ou} \quad \left[ \frac{\text{watt}}{\text{m}^2} \right] \quad (\text{II.14})$$

Avec  $\mu$  le coefficient de frottement,  $N$  la charge normale appliquée sur le frotteur,  $V$  la vitesse de glissement et  $A_a$  l'aire apparente du contact [1].

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

$$q = m.pV = t.V \quad (\text{II.15})$$

#### II.2.5.1.5. L'énergie de frottement cumulée

Diverses méthodes de calcul de l'énergie dissipée dans différents contacts tribologiques sont proposées dans la littérature [11]. Les influences de divers paramètres des essais de frottement, par exemple mode de glissement, charge normale et combinaison de matériaux ont été examinées. En fait, l'augmentation de la température locale résulte d'une dissipation de l'énergie de frottement dans la zone de contact. Mohbacher [12] a introduit le concept d'énergie dissipée cumulée,  $E_d$  l'appliquant à des conditions de contact glissant.  $E_d$  étant proportionnelle à la force tangentielle, à la longueur du déplacement d'un cycle et au nombre de cycles accomplis, en fonction des cycles de déplacement :

$$E_d = \sum F_T d \quad (\text{II.16})$$

$F_T$  est la force tangentielle [N] ;

$d$  est le déplacement linéaire au cours d'un cycle [m].

### II.2.5.1.6. La puissance moyenne de frottement $P_f$

Sera mesurée par le rapport entre l'énergie de frottement  $E_f$  et la durée  $t$  de l'essai :

$$P_f = \frac{E_d}{t} \quad (\text{II.17})$$

### II.2.5.2. Matériaux utilisables pour le frottement

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

- Propriétés mécaniques : dureté, limite d'élasticité, résistance à la compression, au fluage, à la fatigue, résilience, aptitude au vieillissement et amortissement des vibrations et des chocs.
- Propriétés physico-chimiques : masse volumique, température limite d'utilisation, coefficient de dilatation, conductivité thermique, conductivité électrique, résistance à l'oxydation et à la corrosion et aptitude aux traitements.
- Facilité du rodage, résistance à l'abrasion, à l'adhésion et aux propriétés anti-usure grippage, à la corrosion de contact, à l'érosion, à la cavitation et à la corrosion par les lubrifiants.
- Propriétés techniques : facilité de mise en œuvre, conformabilité, absorption de particules abrasives, auto-réparation par comblement des rayures, dureté minimale de l'antagoniste, comportement en cas de lubrification déficiente ou d'incident ;
- Comportement face à l'augmentation du jeu, facilité de réparation ou d'échange, aptitude au soudage sur un support,
- Propriétés d'environnement : caractéristiques du milieu, moyens et possibilités lubrification, problèmes de pollution ou contamination ;
- Propriétés « socio-économiques » : coût de revient, disponibilité sous des formes diverses, facilité d'approvisionnement, dépendance des fournisseurs, évolution prévisible des techniques.



## II.3. Définition et modèles d'usure

### II.3.1. Définition de l'usure

L'usure est la perte de matériaux sur la surface de contact entre deux solides en mouvement relatif. 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'usure d'un mécanisme ne ressort pas uniquement du rôle joué par le lubrifiant, mais relève aussi de nombreux autres facteurs tels que la technologie de l'ensemble et de chaque pièce prise séparément, de leur métallurgie et en particulier des traitements de surface, de leurs tolérances de fabrication des conditions d'utilisation, d'environnement climatique telles que la température ambiante, l'humidité de l'air, la corrosivité (air marin, SO<sub>2</sub>) ou l'abrasivité de l'atmosphère (poussière).

On classe les modèles d'usure selon les principaux mécanismes qui les génèrent: l'adhérence, l'abrasion, l'érosion, la fatigue et le fretting.

### II.3.2. Usure par adhérence (usure adhésive)

L'usure adhésive est le modèle le plus fondamental, elle est due au cisaillement par frottement des microsoudures ou jonctions qui se forment entre deux aspérités en contact direct métal-métal, elle est accompagnée d'un échauffement au moins local des surfaces métalliques, qui, à l'observation visuelle, se traduit par l'aspect des empreintes d'usure, sur éprouvettes de frottement sphériques (figure II.14) [13,27].

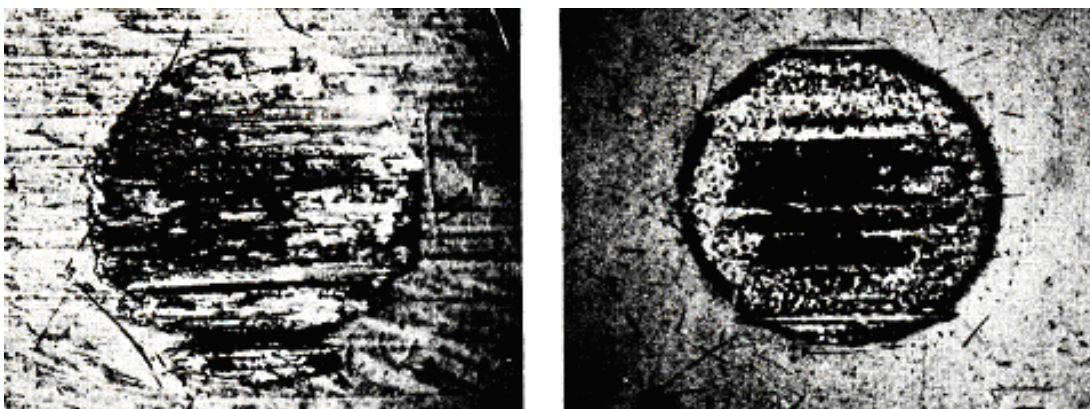


Figure II.14 : Empreinte d'usure adhésive sur frotteur sphérique.

Le glissement n'est possible que par :

- . Cisaillement du corps le plus tendre lorsque la soudure est résistante (figure II.15a) ; des particules du corps le plus tendre (1) sont transférées sur le corps le plus dur (2) (figure II.15b), la substance du corps (1) finit par frotter sur elle-même.
- . Cisaillement des micro-soudures lorsqu'elles sont moins résistantes que les corps, il n'y a pas de matière arrachée.

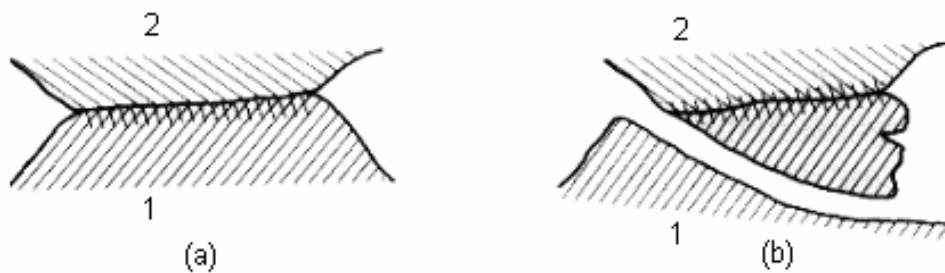


Figure II.15 : Transfert d'une particule (a) soudure d'une aspérité ;(b) arrachage d'une particule [7].

La figure II.16 est un exemple de transfert métallique adhésif : une coupe métallographique, pratiquée dans la première gorge d'un segment de moteur Diesel, représente un fragment d'alliage léger de piston (métal le plus tendre) transféré, après cisaillement d'une jonction adhésive, sur la surface dure du flan intérieur du segment en fonte à graphite lamellaire.

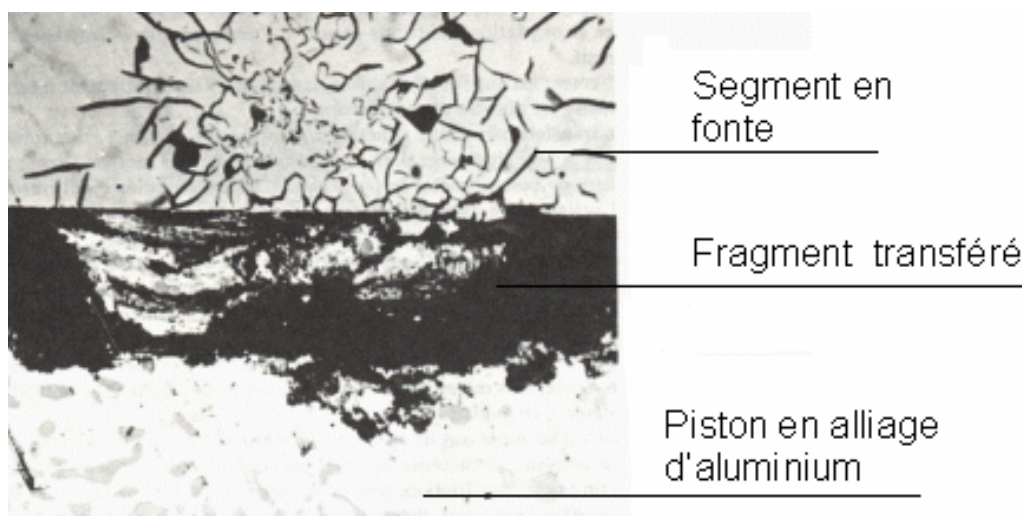


Figure II.16 : Transfert métallique adhésif ( $\times 1000$ ) [13].

Green et Tabor ont montré que, les jonctions sont formées par micro-soudures locales dus à une élévation de la température instantanée. Bowden a estimé que cette élévation de température peut atteindre des valeurs au dessus de 1000°C et ne dure que quelques dizaines de millièmes de seconde. Ces températures sont limitées dans une couche superficielle très mince, alors que la masse du métal est tout à fait froide. La déformation plastique est contrôlée par la dureté du matériau, ainsi si le rapport des duretés entre les deux matériaux est  $r$  alors le taux d'usure varie inversement avec  $r^2$ . On note de plus qu'une augmentation notable du rapport  $r$  n'implique pas un taux d'usure nul du matériau dur.

On peut résumer les étapes qui conduisent à la formation d'un fragment d'usure par adhérence dans le suivant :

- Déformation plastique de l'aspérité et pénétration des films de surface (figure II.17 a) ;
- Formation du joint d'adhérence entre les matériaux de base débarrassés de leur oxyde (figure II.17 b) ;
- Bris de l'aspérité dans le matériau de base et formation d'un fragment d'usure (figure II.17 c).

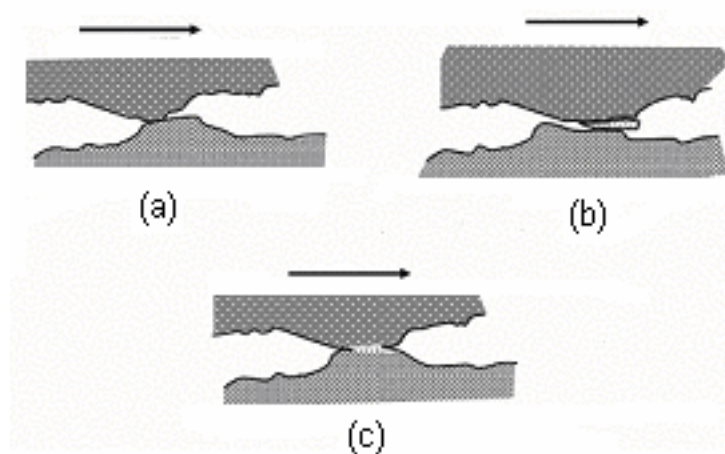


Figure II.17 : Formation d'un fragment d'usure par adhérence.

Si les films d'oxyde protègent suffisamment les métaux pendant le frottement, il ne produit qu'un collage entre les films d'oxyde, le cisaillement s'effectue dans ces films, le métal n'est pas touché, les particules détachées du contact sont de très petites dimensions (100Å), sont constituées d'oxydes métalliques. L'usure est minime, c'est l'usure adhésive en régime douce et dite aussi usure normale ou modérée.

Si les films d'oxyde ne peuvent plus protéger les métaux par suite :

- . De crêtes trop importantes qui sont brisées et mettent le métal à nu.
- . De dureté relative trop forte d'un film par rapport au métal sous-jacent.

. De vitesses ou de charges élevées qui arrachent le manteau protecteur.

Les débris sont des fragments métalliques de dimensions relativement importantes, ils subissent toute une série de transformations (oxydation, écrouissage...), et avant de quitter l'interface, ils sont en moyenne cinquante fois plus gros que les particules initiales. Dans ce cas, l'usure s'appelle l'usure adhésive en régime sévère.

### II.3.2.1. Quantification de l'usure adhésive

Le premier travail sur l'usure daté du 19<sup>ème</sup> 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, a proposé l'expression :

$$V = a \frac{K}{3} \cdot \frac{NL}{H} \quad (\text{II.18})$$

$V$  : Taux d'usure adhésive ou le volume arraché [ $\text{mm}^3$ ].

$a$  : Coefficient caractérisant le type de frottement :

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

$a < 1$  Pour le frottement lubrifié.

$3$  : 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 [13].

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, on peut considérer les valeurs indicatives de coefficient d'usure du tableau II.2.

Coefficient d'usure	Usure adhésive	Usure abrasive	Usure corrosive	Usure par fissuration
	10 <sup>-2</sup>		Abrasion sévère	Corrosion sévère
10 <sup>-3</sup>	Galling			
10 <sup>-4</sup>	Usure modérée	Polissage		Fracture fragile
10 <sup>-5</sup>				
10 <sup>-6</sup>				
10 <sup>-7</sup>	Brunissage			
10 <sup>-8</sup>				Fatigue de surface

Tableau II.2 : Valeurs du coefficient d'usure [14].

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

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

### II.3.2.2. Dimensions des particules d'usure

Le diamètre moyen des particules arrachées après adhésion a été également calculé: considérons une particule hémisphérique, pour que cette particule se détache sous forme de fragment d'usure, il faut que l'énergie élastique cumulée fournie au fragment soit supérieure à l'énergie d'adhésion du fragment sur sa base [13].

$$E_e > E_a$$

$$E_e = \frac{u^2 s_y^2}{2E} \cdot \frac{p \cdot d^3}{12} \quad (II.19)$$

Et :

$$E_a = W_{ab} \frac{p \cdot d^2}{4} \quad (II.20)$$

Il vient :

$$d \geq \frac{6 \cdot E W_{ab}}{u^2 s_y^2} \quad (II.21)$$

$d$  : Diamètre de la particule;

$s_y$  : Limite élastique du matériau le plus tendre ;

$u$  : Coefficient de Poisson ;

$E$  : Module de Young ;

$W_{ab}$  : Énergie d'adhésion des 2 matériaux en contact.

$$W_{ab} : g_a + g_b - g_{ab} \quad (II.22)$$

$g_a$  et  $g_b$  : Energies de surface des matériaux A et B,

$g_{ab}$  : Energie interfaciale.

Pour la plupart des métaux et alliages  $u \approx 0.3$  d'où  $u^2 \approx 0.1$

$$se \approx \frac{H_r}{3} \text{ (critère de Von Mises-Hencky)}$$

$$\frac{S_y}{E} \approx 3.10^{-3}$$

La condition limite pour qu'une particule se détache devient :

$$d = 60000 \frac{W_{ab}}{H} \quad (II.23)$$

L'expérience confirme approximativement cette relation. En particulier, la dimension des particules d'usure est indépendante de facteurs tels que : la charge, la vitesse, la distance de glissement, la géométrie du contact, etc.

L'influence de l'environnement des surfaces frottantes (type d'atmosphère, présence de lubrifiant) a un effet très sensible sur les dimensions des particules d'usure adhésive en modifiant l'énergie d'adhésion des matériaux.

### II.3.2.3. Aspects métallurgiques de l'usure adhésive des aciers

Les aciers au carbone, à l'état recuit, sont moins sujets à l'usure adhésive que les aciers austénitiques ou la ferrite, en effet, la structure perlitique des aciers limite l'adhésion, la soudure aura lieu seulement dans la phase ferrite ou dans la phase austénite.

C'est pour cela, l'augmentation de la teneur en carbone qui a pour effet de réduire la ferrite et d'augmenter la dureté est utile.

Généralement, les structures : perlitique, martensitique et bainitique des aciers, très fines et pluriphasées se comportent mieux que les structures ferritique et austénitique monophasées et constituées de gros grains.

Une forte dureté et la présence de carbures métalliques dans l'acier augmentent la résistance à l'usure. Pour les aciers à outils, la résistance à l'usure dépend plus de la qualité des carbures précipités durant la trempe.

Les éléments d'additions tels que le Chrome Cr, le Vanadium Va, le tungstène Tu le molybdène Mo...etc, Contribuent à améliorer la résistance à l'usure des aciers par leurs effets sur l'affinage du grain et sur le durcissement structural de la matrice.

L'austénite résiduelle, produite par des fortes températures de trempe, a un effet néfaste [13].

#### II.3.2.4. Comment lutter l'usure adhésive

Vu le grand nombre de paramètres qui influencent sur le frottement et l'usure, il est difficile de formuler des règles très précises. L'empirisme joue un grand rôle dans ce domaine.

. Au niveau de la conception technologique et géométrique des surfaces de contact, il est possible de prévenir l'usure adhésive en diminuant les échauffements inter faciaux dus au frottement par :

- La limitation de la distribution des pressions de contact et/ou des vitesses de glissement ( $PV$ ).
- L'assurance d'un refroidissement convenable des surfaces.

. Au niveau du choix des matériaux des surfaces en frottement sec ou limite, il y a intérêt à utiliser des couples de matériaux possédant de faibles interactions, donc une énergie d'adhésion  $W_{ab}$  faible c'est-à-dire des matériaux ne donnant pas lieu à des soudures en phase solide comme : bronze-acier, chrome-fonte, matériaux plastiques-métaux. On évite le contact de métaux identiques car ils tendent à se souder; un métal capable de céder des électrons se lie plus fortement au fer qu'un métal passif ou inerte. C'est pourquoi l'aluminium ; plus électropositif que le Chrome, risque fortement de gripper avec l'acier. Le plomb, l'étain, le cuivre et l'argent sont chimiquement peu actifs, on les utilise dans les coussinets [13].

Les matériaux à structure cristalline hexagonale présentent une adhérence petite que les matériaux à structures cubiques.

Les surfaces métalliques exposées à l'air se recouvrent rapidement d'un film d'oxyde environ 5nm d'épaisseur qui contamine assez la surface pour éviter l'adhésion [7].

En frottement mixte, les surfaces lubrifiées n'adhèrent pratiquement pas. L'usure se produit surtout par abrasion, l'interposition d'un film d'huile suffisamment résistant pour prévenir les contacts métal-métal.

Il y a également intérêt à utiliser des matériaux durs afin de diminuer le taux d'usure. Ce qui explique l'utilisation des aciers trempés, cimentés, nitrurés et carbonitrurés.

### II.3.3. Usure abrasive

#### II.3.3.1. Définition de l'usure abrasive

Dans le glossaire de l'organisation de coopération et de développement économique l'usure abrasive est définie comme étant l'usure par déplacement de matière, produite par des particules dures ou des protubérances dures [15]. Donc l'usure abrasive est le résultat du frottement de glissement par labourage ou par déformation plastique. L'usure peut se faire à deux corps, directement à partir des solides en contact ou bien à trois corps comme l'indique le schéma (figure II.18).

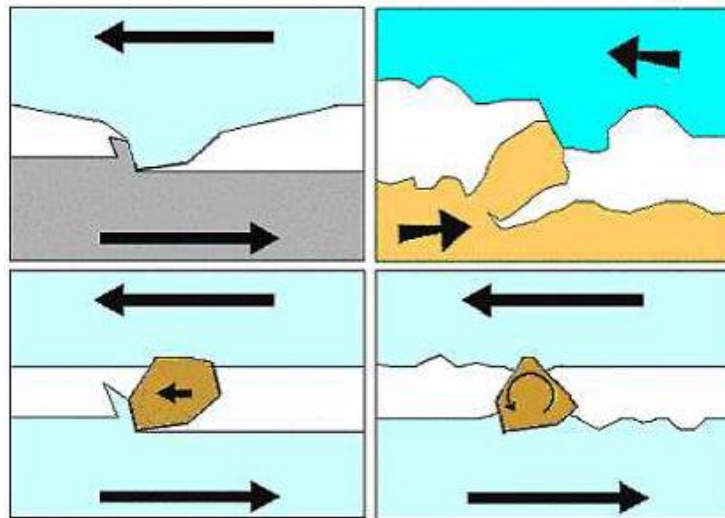


Figure II.18 : Schéma de principe de l'usure abrasive [16].

Il faut noter que l'usure abrasive existe toujours quelque soit le système mécanique. En effet, les débris d'usure générés par les autres modes (adhésions ou fatigue) sont généralement plus durs que les surfaces en contact et par suite participent à l'abrasion, ainsi que les grains abrasifs constitués de poussières ou de sable de fonderie.

#### II.3.3.2. Aspects tribologiques de l'usure abrasive

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

- Usure abrasive se fait par les aspérités ou protubérances dures d'une des surfaces sur l'autre plus tendre, appelée "abrasion à deux corps" (figure II.19) Les sillons sont formés parallèlement à la direction de déplacement des aspérités abrasives.

En général, un matériau mou et malléable conduit à une usure uniforme tandis que pour un matériau plus dur, l'usure est plus localisée dans la région interlamellaire ou les couches d'oxydes forment des points faibles et entraînent le décollement des lamelles [17].

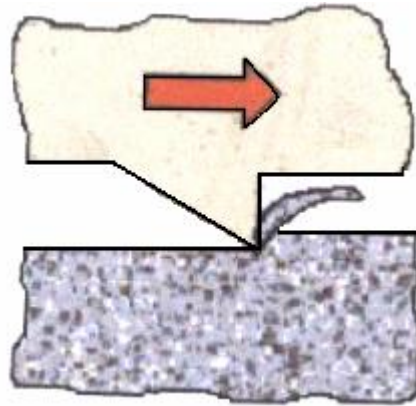


Figure II.19 : Usure abrasive à deux corps [18].

- Usure abrasive dite "à trois corps" provoquée par des particules dures (figure II.20) soit véhiculées entre les deux surfaces en contact, soit enchâssées dans l'un d'elles, généralement la plus tendre. L'accumulation de débris d'usure entre les corps finit par constituer une couche intermédiaire, le troisième corps. Selon Johnson [19], le cisaillement de la couche intermédiaire est la principale source de frottement. Le rodage, le polissage à la pâte ou à la poudre sont des genres d'usure abrasive à trois corps.

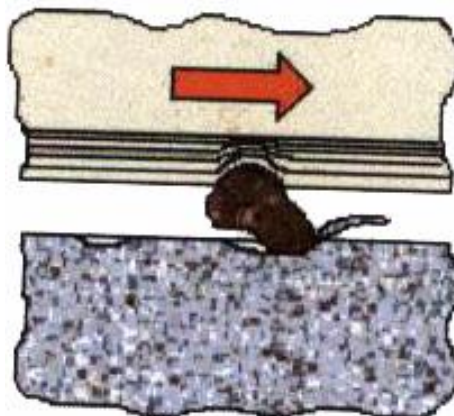


Figure II.20 : Usure abrasive à trois corps [18].

D'après TABOR, la dureté des particules est en moyenne de 20% supérieure à celle de la surface initiale [13].

La figure II.21a montre l'effet produit par une aspérité dure ou le grain abrasif peut être assimilé à un outil de coupe élémentaire, il provoque sur la surface sur lequel il frotte une rayure (sillon d'abrasion) comme l'indique la figure II.21b.

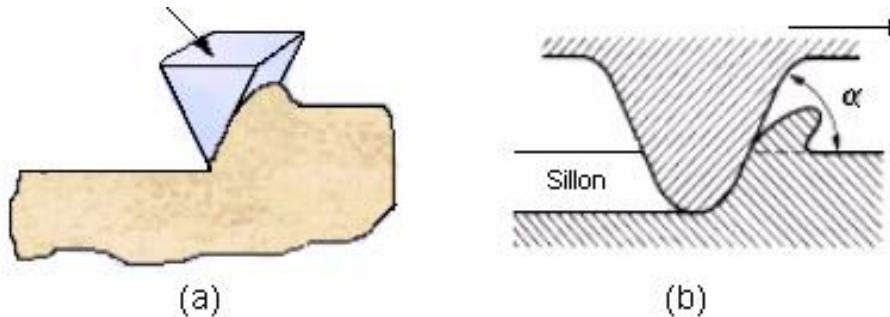


Figure II.21: Effet d'une aspérité (a) outil de coupe ;(b) sillon d'abrasion [7].

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

- La dureté relative de la surface abrasée et de l'abrasif. Lorsque la dureté de la surface rayée approche celle de l'abrasif, celui-ci s'émousse, diminuant son aptitude à la coupe.
- La forme de la partie active de l'abrasif, si elle présente des angles vifs, convenablement orientés par rapport au sens de glissement (figure II.22a), l'abrasion sera analogue à un processus de coupe et la trace laissée sera désignée comme une rayure de microcoupe, contrairement, si elle est arrondie est polie, il y'aura un très peu de matériaux enlevé (figure II.22b).



Figure II.22 : Mécanisme de l'abrasion ; (a) par coupe ;(b) par déformation plastique [13].

- Si les grains abrasifs roulent entre les deux surfaces provoquent moins d'usure que s'ils glissent ou s'incrudent dans l'une des deux surfaces.

La perte de matière dépend à la fois du matériau utilisé et de l'abrasif et l'aspect des sillons fournit de précieuses indications :

- . S'ils sont brillants et très peu profonds, les aspérités de la pièce antagoniste ont raclé les couches d'oxydes.

- . S'ils sont isolés, et interrompus, des particules dures introduites entre les surfaces se sont plus ou moins incrustées.
- . S'ils sont continus et rayent la pièce dure, des particules abrasives sont enchâssées dans la pièce tendre.
- . S'ils sont continus aussi et marquent la pièce tendre, la pièce antagoniste plus dure et sa surface de contact est rugueuse.

Pour rayer une surface il suffit d'une autre plus dure de 20% à 25%.

### II.3.3.3. Quantification de l'usure abrasive

Une loi généralisée d'usure par abrasion a été proposée sous la forme suivante [20] :

$$V = \frac{KFL}{3H} \quad (II.24)$$

Avec

$$K = K' I \left[ 1 - \exp \left( - \ln 2 \cdot \left( \frac{H_a}{mH} \right)^{1+2m} \right) \right] \quad (II.25)$$

$V$  est le volume enlevé du matériau par abrasion [ $m^3$ ]

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

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

$m$  : Le coefficient létal d'abrasion constant

$L$  est la longueur du contact [m]

$F$  : La force appliquée [N]

$I$  est le facteur de l'angularité de l'abrasif constant

$K'$  (constant), 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 :

$$\frac{dV}{dl} = K_{abr} \frac{N}{H} \quad (II.26)$$

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

$N$  : Charge appliquée;

$H$  : Dureté de la surface la plus tendre ;

$K_{abr}$  : Coefficient d'abrasion.

L'équation II.26 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. Le tableau II.3 présente une série de mesures de  $K_{abr}$  :

Références	Type d'usure abrasive	Taille moyenne des débris	Matériaux	$K_{abr}$ ( $10^{-3}$ )
Spur et al. (1957)	2 corps	110	Différents	150
Avient et al. (1960)	2 corps	40 – 150	Différents	120
Lopa. (1956)	2 corps	260	Acier	80
Kruschov et al. (1958)	2corps	80	Multiples	24
Samuels. (1956)	2corps	70	Laiton	16
Toporov. (1958)	3 corps	150	Acier	6
Rabinowicz et al. (1961)	3 corps	80	Acier	4,5
	3 corps	40	Multiples	2

Tableau II.3 : Série de mesure de  $K_{abr}$  [21].

Du tableau II.3, on déduit que le coefficient  $K_{abr}$  de l'usure pour le cas de deux corps est plus important que dans le cas d'usure à trois corps. En effet, dans ce dernier cas (trois corps), environ 90% des particules abrasives ont un mouvement de roulement entre les surfaces alors que seulement 10% d'entre elles glissent et contribuent à l'abrasion des surfaces. Ceci est aussi justifié par la différence qui existe entre les coefficients de frottement où  $m = 0,25$  dans le cas de trois corps et  $m = 0,6$  dans l'autre cas.

L'un des plus simples et plus anciens modèles d'usure par abrasion considéré est le cas du rayage de la surface par un unique cône rigide (figure II.23). Toute la matière déplacée par le cône est arrachée sous forme de débris d'usure.

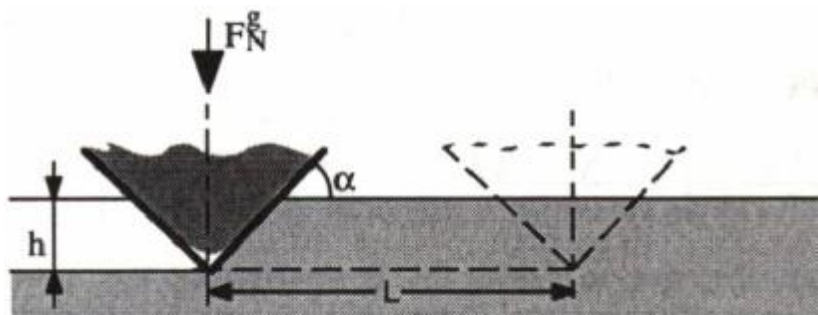


Figure II.23 : Modèle d'usure abrasive pour un unique cône rigide [22].

Dans ce modèle [RABINOWICZ, 1965], la force individuelle agissant sur le cône (grain abrasif)  $F_N^g$  est comme suit :

$$F_N^g = 0.5p(h \cot g a)^2 H \quad (II.27)$$

Avec  $h$  est la profondeur de pénétration,  $a$  est l'angle d'attaque du cône de rayage et  $H$  la dureté de surface la plus tendre.

Le volume approximatif de matière enlevée  $V_g$  est donné par :

$$V_g = L.h^2 \cot g a \quad (II.28)$$

Où  $L$  est la distance de rayage. Si on remplace  $h$  dans l'équation II.28 par son expression dans l'équation II.27 on aura :

$$V_g = \frac{2.L.tg a}{p.H} . F_N^g \quad (II.29)$$

L'usure totale  $V_t$  est la somme des volumes arrachés par chaque grain abrasif est :

$$V_t = \Sigma V_g = \frac{2.L.tg a}{p.H} \Sigma F_N^g$$

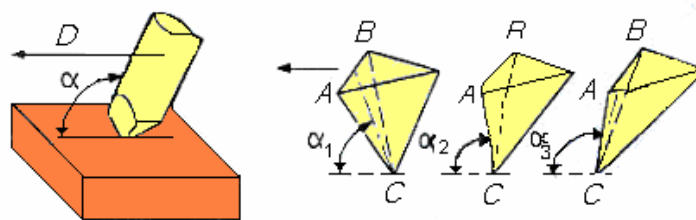
Avec  $F_N$  est la charge appliquée au contact =  $\Sigma F_N^g$

Donc 
$$V_t = \frac{2.L.tg a}{p.H} . F_N \quad (II.30)$$

#### II.3.3.4. Influence de l'angle d'attaque sur l'usure abrasive

La particule ou le grain abrasif doit avoir des angles aigus et être convenablement orienté. Cette condition est mise en évidence par l'expérience suivante :

Une tige à pointe pyramidale raye sous une charge donnée la surface plane d'un échantillon métallique (figure II.24).



$D$  : sens du déplacement       $A C B$  : face d'attaque

Figure II.24 : Angle d'attaque  $a$  d'une particule [15].

Le déplacement de la tige est parallèle à la surface. Les courbes indiquées sur la figure II.25 montrent l'évolution de la section droite de la rayure en fonction de l'angle d'inclinaison  $a$  de la face d'attaque du frotteur par rapport au plan. On remarque, qu'à partir d'un angle

critique  $a_c$ , la largeur de la rayure s'augmente et correspond à l'apparition d'un copeau, c'est-à-dire le passage de la déformation par rayure à la production d'un copeau.

Si l'angle d'attaque  $a$  est inférieur à  $a_c$ , il n'y a pas de copeau.

Si l'angle d'attaque  $a$  est supérieur à  $a_c$ , il se produit de copeau.

Les deux courbes I et II représentent la formation d'une rayure par enlèvement de métal, par contre, la courbe III donne la production d'une rayure sans enlèvement de métal.

Les paramètres (facteurs) de l'usure appliqués sont : la charge est 2 N, la vitesse d'abrasion vaut 0,5 mm / s, la nature du matériau de frotteur est le carbure de tungstène et la piste est en plomb.

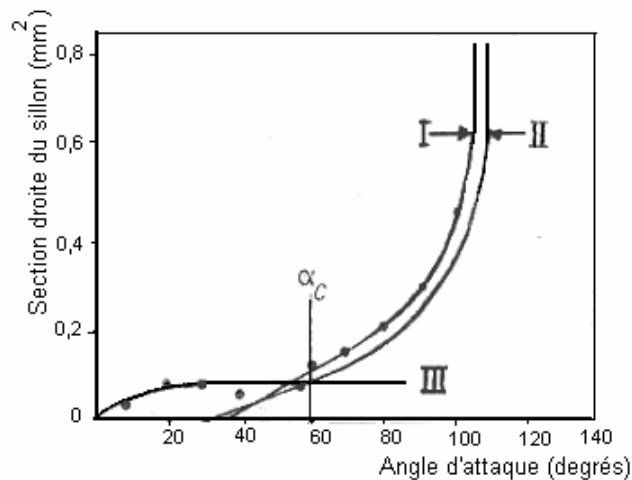


Figure II.25 : Section droite du sillon en fonction de l'angle d'attaque [15].

On peut apprécier expérimentalement et évoluer analytiquement l'aire de la section droite de la rayure dans les deux cas :

. Quand il y a création d'un microsillon sans enlèvement de matière (déformation par rayure), la relation analytique entre l'aire  $A_s$  de la section droite d'un microsillon et les caractéristiques tribologiques géométriques des matériaux en contact est :

$$A_s = m \frac{N}{C} (t \cdot \cot g a + d_{dyn}) \quad (II.31)$$

Avec  $N$  : force normale,  $m$  coefficient de frottement,  $a$  l'angle d'attaque,  $d_{dyn}$  la contrainte d'écoulement dynamique,  $C$  constante géométrique et  $t$  la résistance au cisaillement.

. Quand il y a une production de copeau, la relation analytique exprimant l'aire  $A_{ry}$  de la section droite d'une micro rayure est :

$$A_{ry} = \frac{N}{C} d_{dyn} \left[ \frac{1 + m t g a}{1 + t g a} \right]$$

### II.3.3.5. Aspect Métallurgique de l'usure abrasive des aciers

Il est à noter que la résistance à l'usure des aciers recuits est proportionnelle à leur dureté, pour chaque type d'aciers trempés, la relation résistance à l'usure-dureté est linéaire mais possède une pente plus faible que celle des métaux recuit (figure II.26).

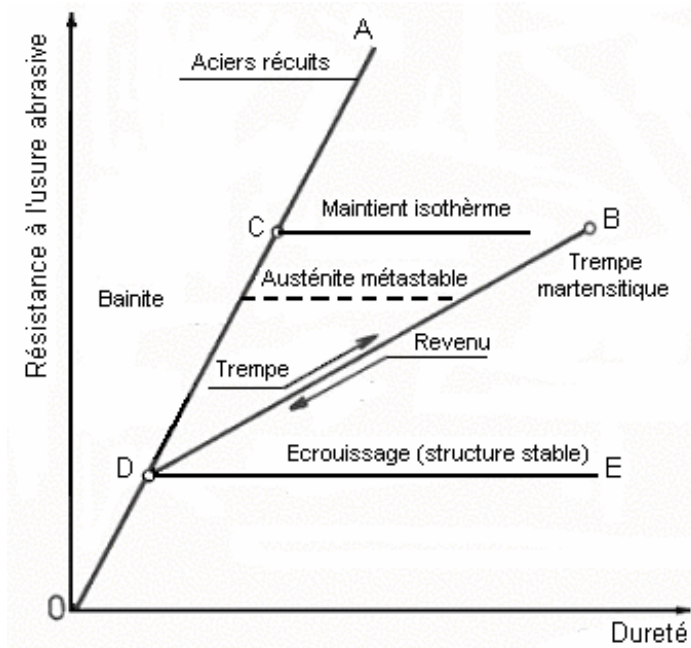


Figure II.26 : La résistance à l'usure abrasive  $\epsilon$  en fonction de la dureté due par traitement thermique des aciers au carbone [13].

La résistance à l'abrasion des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés augmente avec la teneur en carbone indépendamment de celle des autres éléments d'alliage. La résistance à l'usure croît proportionnellement avec la teneur en cémentite pour un acier contenant seulement la ferrite et la cémentite. La structure de l'acier est aussi importante, une structure perlitique a une résistance à l'usure supérieure qu'une structure sphéroïdale.

Dans les aciers hypoeutectoïdes, la résistance à l'usure augmente, avec la quantité de perlite, c'est-à-dire en carbone et aussi lorsque la distance interlamellaire moyenne de la perlite diminue. Ce qui concerne les aciers hypereutectoïdes, la résistance à l'usure continue son augmentation jusqu'à ce que le réseau de cémentite proeutectoïde intergranulaire ne devienne pas continu et fragile [13].

L'effet des traitements thermiques sur le comportement des aciers au carbone est représenté sur la figure précédente, où il apparaît que la trempe augmente la résistance à l'usure alors que le revenu la diminue. Les traitements thermiques isothermes, tels que la trempe différée martensitique (martempering) et la trempe bainitique (Austempering) améliorent la ténacité des aciers. Le durcissement par écrouissage préalable des aciers ne conduit à aucune amélioration de leur résistance à l'usure bien que des travaux aient montré que l'écrouissage d'une surface métallique par des grains abrasifs améliorant sa résistance à l'usure.

Pour les aciers faiblement alliés, la résistance à l'abrasion s'améliore pour les éléments donnant lieu à des carbures dispersables dans la ferrite. L'addition d'une faible teneur en manganèse améliore la résistance à l'usure d'une structure perlitique mais abaisse celle d'une structure martensitique.

Pour les aciers fortement alliés, la précipitation fine et uniforme de carbures dans la matrice est désirable pour l'augmentation de la résistance à l'usure. La meilleure structure est la structure martensitique. Par contre les aciers possédant une structure austénitique stable et homogène, comme les aciers inoxydables, ne possèdent pas une résistance à l'abrasion très élevée.

L'acier qui résiste à l'abrasion sous des charges importantes est l'acier austénitique à 12% de manganèse (aciers Hadfield) : qui sont des aciers austénitiques hyperboloïdes au manganèse formant une couche martensitique dure par écrouissage). Sous charge modérée, ses performances sont celle d'un acier au carbone ordinaire, mais sous charge élevée, l'écrouissage transforme l'austénite en martensite très résistante à l'usure abrasive. On améliore aussi la résistance à l'abrasion par l'addition de molybdène ou de niobium qui augmente la limite élastique.

## **II.3.4. Usure par oxydation**

### **II.3.4.1. Introduction**

La majorité des surfaces des métaux réagissent avec l'oxygène de l'atmosphère pour former des oxydes [23].

Si un métal forme plusieurs oxydes, les composés sont arrangés de telle sorte que le plus riche en oxygène soit à l'interface solide-gaz, tandis que le plus pauvre se situe à l'interface métal-oxyde [24], comme le cas du fer illustré par la figure II.27.

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 II.27) [23].



Figure II.27 : Formation des couches d'oxydes superposées sur la surface du fer à 625 °C après 24 h.

### II.3.4.2. Oxydation du fer

Etant donné le rôle que jouent les oxydes de fer dans les processus de frottement et d'usure. Une surface de fer s'oxyde pour donner les oxydes de fer : FeO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

#### II.3.4.2.1. L'oxyde ferreux FeO

Stable au dessus de 570 °C qui présente un caractère plastique [25].

#### II.3.4.2.2. La magnétite Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

De couleur noire, cet oxyde est poreux [24].

#### II.3.4.2.3. L'oxyde ferrique Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

C'est l'oxyde le plus dur des oxydes de fer (10<sup>4</sup> MPa), il est rouge-brun [23]. Vu son caractère d'abrasif, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> joue un rôle essentiel dans l'endommagement par le frottement et l'usure.

### **II.3.4.3. Mécanismes de l'usure par oxydation**

L'usure par oxydation est un mécanisme d'usure douce, elle résulte de l'adsorption de l'oxygène sur les surfaces métalliques mises à nu lors du frottement et des réactions chimiques de cet oxygène avec le métal [26]. Le taux d'oxydation est contrôlé par la diffusion de l'oxygène dans les couches superficielles, les films d'oxyde se développent sur le plateau de contact à la température  $\theta_0$ , l'usure se produit par écaillage de l'oxyde et émission de débris.

## CHAPITRE III

### DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET TECHNIQUES DE MESURE

#### III.1. Introduction

L'une des causes de l'endommagement en service des pièces mécaniques provient du frottement de surfaces, en mouvement. L'usure des surfaces frottantes qu'en résulte se traduit, le plus souvent en cours de fonctionnement, par une élévation de température, des modifications géométriques, des transformations physico-chimiques ou encore par des enlèvements de matière.

Parmi les objectifs du présent travail, on peut citer, en premier lieu, la compréhension de l'influence des paramètres opératoires tels que : la charge, la vitesse, 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 étudié en fonction des paramètres cités auparavant.

Le deuxième objectif est de déterminer la nuance d'acier appropriée du pion utilisée pouvant répondre aux conditions d'emploi de l'acier.

#### III.2. Dispositif expérimental

##### III.2.1. Présentation générale du tribomètre

Le principe de base de la machine d'usure (tribomètre) par glissement 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 (pin-on-disk). Une force déterminée est appliquée sur le pion qui génère ainsi un sillon circulaire à la surface du disque. C'est d'ailleurs le principe utilisé dans le test standard de l'usure par l'ASTM.

Le tribomètre que nous avons utilisé se base sur le même principe, il est de type (TE91) existant au niveau du Laboratoire de Mécanique de l'Université de Constantine, constitué d'un ensemble d'organes comme l'indique la figure III.1.

Le pion utilisé est de forme cylindrique contient un méplat, qui permet de le fixer dans un trou à l'aide d'une vis de blocage sur un bras de charge en aluminium. Il est chargé contre un disque par des masses du poids variable. Le pion est aisément échangé par un autre échantillon, ou peut être enlevé pour permettre la mesure de la perte de masse ou du changement dimensionnel du à l'usure.

Le disque est un plateau circulaire d'usure fixé sur un support 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 de rapport 1:20. La variation de la vitesse de rotation est effectuée par un variateur de fréquence, qui permet d'avoir une gamme de vitesses de rotation allant de 10 tr.mn<sup>-1</sup> à 200 tr.mn<sup>-1</sup>. Sachant que le rayon de la piste d'usure est 0.02 m, la vitesse linéaire varie donc entre 0.020 m/sec et 0,418 m/sec. La force normale est transmise au support d'échantillon à l'aide des masses reposant sur l'extrémité du bras de charge.

Le capteur de force retient le bras de charge dans le plan horizontal et ceci enregistre la force de frottement produite dans le contact entre les deux échantillons. Le capteur d'usure contrôle l'usure entre pion et disque pendant l'essai.

Du lubrifiant peut être présenté en remplissant collier de lubrification adapté au porteur de disque.



Figure III.1 : Tribomètre de type TE91.

### III.2.2. Spécifications techniques

Vitesse de rotation du disque	10 à 200 tr.mn <sup>-1</sup>
Vitesse linéaire équivalente	20 à 420 mm.sec <sup>-1</sup>

Rayon de piste	20 mm
Gamme de charge sur le pion	< 40 N
Dimension du disque	50 mm de diamètre et 10 mm d'épaisseur
Dimension du pion	4 mm de diamètre et 20 mm de longueur
Jeu de poids	1× 500 g, 1× 250 g et 2× 125 g

### **III.2.3. Connexion électrique du tribomètre**

Le banc d'étude du tribomètre TE91 (figure III.2) est un module polyvalent qui comprend : l'unité de base, le moteur à courant continu, le capteur de vitesse du moteur, le réducteur, le boîtier d'affichage, le capteur d'usure, la cellule et la prise de connexion.

#### **III.2.3.1. Unité de base**

L'unité de base est constituée par la plate-forme sur laquelle toutes les expériences de la gamme TE91 sont montées.

Le plateau supérieur est conçu avec une série de trous afin de pouvoir monter tous les modules du TE91.

A l'intérieur de l'unité de base se trouve une alimentation 12 V reliée à la prise sur la face avant de l'appareil. Celle-ci fournit la puissance nécessaire au boîtier d'affichage. L'alimentation et le régulateur de vitesse électronique du moteur à courant sont aussi situés dans l'unité de base.

Un espace de rangement est disponible à l'avant de l'unité de base pour l'afficheur, avec un emplacement supplémentaire pour ranger les câbles.

#### **III.2.3.2. Moteur à courant continu**

Sa vitesse de rotation maximale est  $4000 \text{ tr.mn}^{-1}$  et une puissance 50 Watts.

#### **III.2.3.3. Capteur de vitesse du moteur**

Capteur magnétique monté sur le moteur.

#### **III.2.3.4. Réducteur**

Le rapport est 20:1, complet avec accouplement moteur. La vitesse de l'arbre de sortie du réducteur est de 0 à  $200 \text{ tr.mn}^{-1}$ .

### **III.2.3.5. Boîtier d'affichage**

Le boîtier d'affichage est alimenté en 12 V par l'alimentation de l'unité de base et fournit des indications directes de :

- . La force (en Newton) mesuré par la cellule.
- . La vitesse en sortie du réducteur 20 :1 (en  $\text{tr.mn}^{-1}$ ) ou l'indication d'usure, par les mouvements du capteur d'usure (en mm).
- . Une prise sur le boîtier d'affichage permet une connexion pour un périphérique d'affichage externe de type enregistreur analogique.

Le câble fournit pour la connexion analogique externe présente 3 fils de couleurs distinctes qui doivent être connectés en entrée du périphérique externe de la manière suivante :

Bleu est pour la force, jaune est pour l'usure et vert est commun.

Les sorties analogiques sont linéaires et varient de 0 à 4 V DC.

8 mm d'usure sur le capteur d'usure donneront au maximum 4 V en sortie sur la prise jaune.

50 N de force sur la cellule de charge donneront au maximum 4 V sur la prise bleu.

Le boîtier d'affichage (non connecté) se range à l'intérieur de l'espace de rangement quand celui ci n'est pas utilisé.

### **III.2.3.6. Capteur d'usure**

Capteur de déplacement linéaire, 8mm de déplacement maximum.

### **III.2.3.7. Cellule**

Capteur linéaire à jauges d'extensométrie monté en pont, force 50 N max.

### **III.2.3.8. Prises de connexion**

Alimentation secteur, alimentation 12 V du boîtier d'affichage et enregistreur analogique.

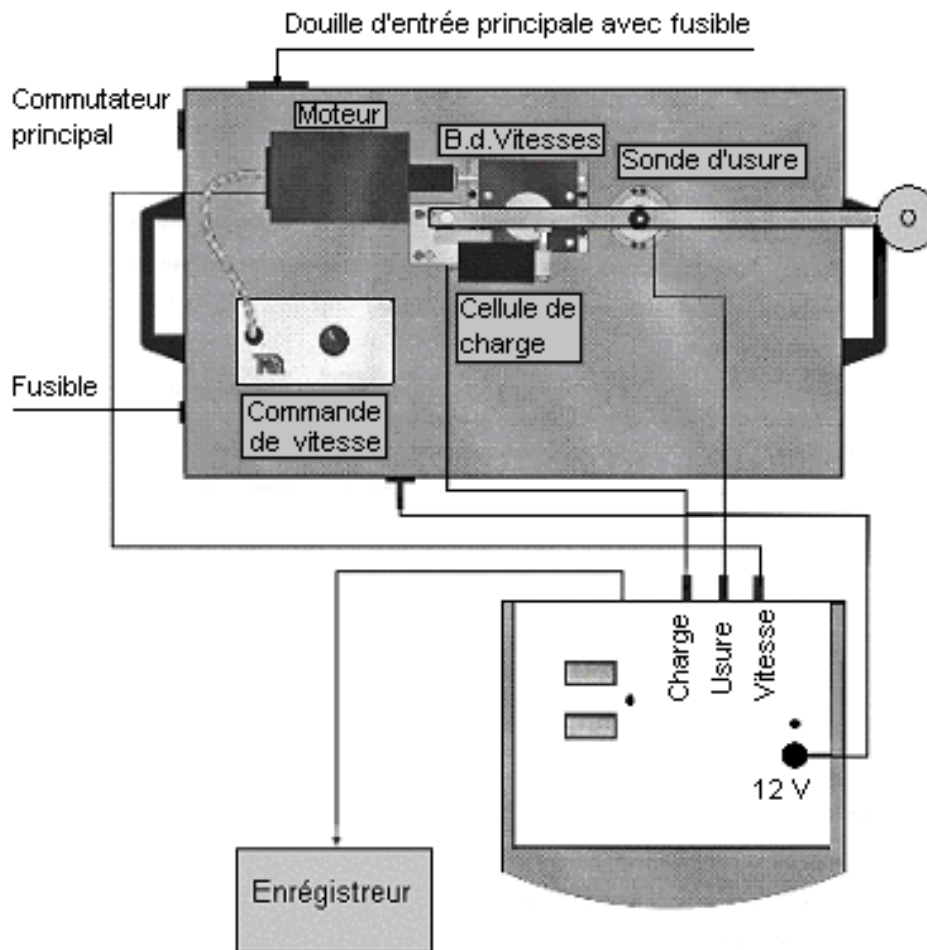


Figure III.2 : Schéma de connexion électrique du tribomètre TE91.

### III.3. Identification des matériaux utilisés

#### III.3.1. Matériaux du pion

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

##### III.3.1.1. Acier XC48

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 moyeux, 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 [30,38].

### **III.3.1.2. Acier A60**

C'est un acier ordinaire dont le pourcentage de carbone obtenu n'est pas connu avec précision, correspond à des produits de grande consommation, moins onéreux, couramment employé dans la construction des édifices et des ouvrages d'art soudés rivés et boulonnés (poutres, charpentes des grues, corps des récipients et des appareils, charpentes des chaudières à vapeur [31].

### **III.3.2. Matériau du disque**

Le matériau du disque est l'acier XC55, de fabrication locale, à une teneur de carbone varie de 0.52% à 0.60 %, utilisé pour la fabrication des rails, bandages, axes, clavettes, lames de scie et canon de fusil...etc [32].

### **III.3.3. Techniques d'identification des échantillons**

Les données techniques des matériaux utilisés dans la préparation des échantillons sont fournies par le fournisseur et sont confirmées après par l'analyse chimique (carbométrie et spectrométrie) au niveau de l'Entreprise Nationale des Matériels de Travaux Publics (laboratoires du Complexe des Pelleteuses et Grues " CPG " qui se trouve à Constantine.

#### **III.3.3.1. Carbométrie**

L'objectif est de déterminer le pourcentage de carbone dans l'échantillon à étudier, l'essai consiste en un prélèvement de copeaux de la nuance à analyser. Le carbone contenu dans un échantillon d'acier brûle complètement dans un courant d'oxygène, à une température d'environ 1250 °C et forme de dioxyde de carbone, la combustion est effectuée dans un four à tubes dont la chambre à combustion est un tube en céramique dans laquelle on introduit la nacelle à combustion contenant l'échantillon pesé (figure III.3).

On fait passer un courant d'oxygène purifié à travers un tube, avec le dioxyde de carbone formé lors de la combustion, et après avoir atteint le point zéro de l'échelle figurant sur la burette, le gaz est refoulé à deux reprises dans un vase d'absorption rempli de potasse en solution. Il y'a alors l'absorption du dioxyde de carbone, le reste du gaz est ramené dans la burette. Sur l'échelle graduée en % on peut relever la diminution par rapport au volume initiale.



Figure III.3 : Appareil pour le dosage rapide de carbone dans l'acier [33].

Le pourcentage en carbone dans la nuance analysée est obtenu par la relation :

$$\%C = F \times V$$

Où

V : Valeur du volume relevé sur l'échelle de la burette.

F : Facteur de correction qui tient compte deux paramètres P et T.

P : Pression atmosphérique régnant au sein du laboratoire obtenue sur un baromètre gradué en torr (1Torr = 133,32 Pa = 1,333.10<sup>-3</sup> bar).

T : Température dans le laboratoire.

### III.3.3.2. Spectrométrie

En excitant l'échantillon par une lumière blanche jaillit, cette dernière est un mélange de rayonnement visible de différentes longueurs d'onde et différentes couleurs, chaque élément chimique émet lorsqu'il est excité, un rayonnement spécifique d'une couleur et d'une longueur d'onde déterminée, qui lui est propre.

La composition d'un échantillon est de ce fait identifiable par le rayonnement lumineux tel que son angle de réfraction, le passage d'un milieu à un autre dépend de la longueur d'onde. De cette manière le faisceau mélangé de rayonnement est passé par un prisme qui le répartit suivant ses composantes, les éléments d'alliage d'un échantillon apparaissant sous formes de raies spectrales, l'intensité lumineuse des raies spectrales correspond à la teneur de l'élément considéré dans l'échantillon.

### III.3.4. Composition chimique

Le tableau III.1 donne la composition chimique des échantillons

	Eléments	C	Si	Mn	P	S
XC48	Masse (%)	0,51	0,40	0,75	0,032	0,030
A60	Masse (%)	0,40	0,15	0,55	0,070	0,050
XC55	Masse (%)	0,54	0,40	0,70	0,031	0,030

Tableau III.1 : Composition chimique des échantillons.

### III.3.5. Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques sont présentées dans le tableau III.2.

	$R_e$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	A % min	$H_{V500}$
XC48	375	680	17	224
A60	335	605	17	118
XC55	430	730	16	235

Tableau III.2 : Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés.

## III.4. Présentation des couples tribologiques

### III.4.1. Disque

Le disque est un plateau de forme cylindrique, de diamètre 50 mm et d'une épaisseur de 12 mm, il possède un trou lamé au centre, ce dernier permet la fixation du disque à l'aide d'une vis sur le support du tribomètre (figure III.4).

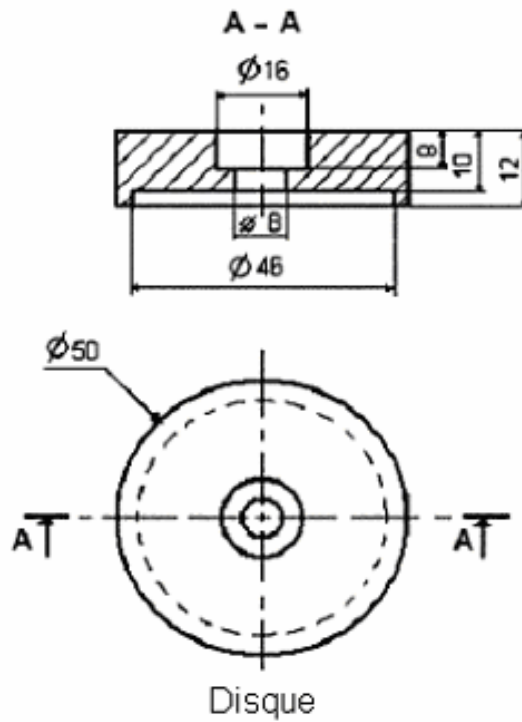


Figure III.4 : Dessin de définition du disque.

### III.4.2. Pion

Il s'agit d'une tige de longueur de 20 mm et de diamètre égale 4 mm, contient un méplat qui a le rôle d'empêcher la rotation du pion pendant l'essai comme l'indique la figure III.5.

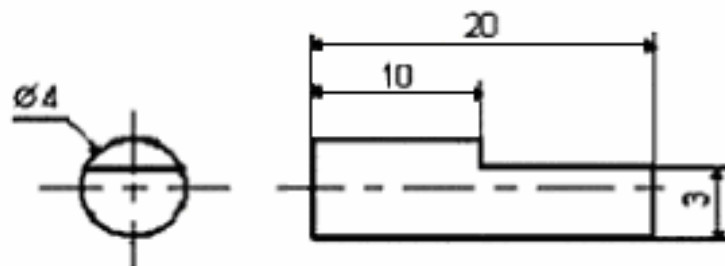


Figure III.5 : Dessin de définition du pion.

## III.5. Préparation des échantillons

### III.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 pour le disque et

tournage et fraisage pour le pion) afin d'avoir les échantillons comme un produit fini selon les dimensions et les critères géométriques demandés.

### III.5.2. Traitements thermiques

#### III.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'élasticité  $A\%$ .

Un matériau ne peut subir avec profit un traitement thermique que si celui-ci est approprié à sa composition.

De très nombreux alliages métalliques peuvent subir des traitements thermiques, les aciers représentent le domaine d'application le plus vaste.

#### III.5.2.2. Cycle d'un traitement thermique

Généralement, un traitement thermique comprend trois étapes (figure III.6)

- Un chauffage à une température dépendant du type de traitement voulu.
- Maintien isotherme à cette température de traitement.
- Un refroidissement dans un milieu préalablement défini.

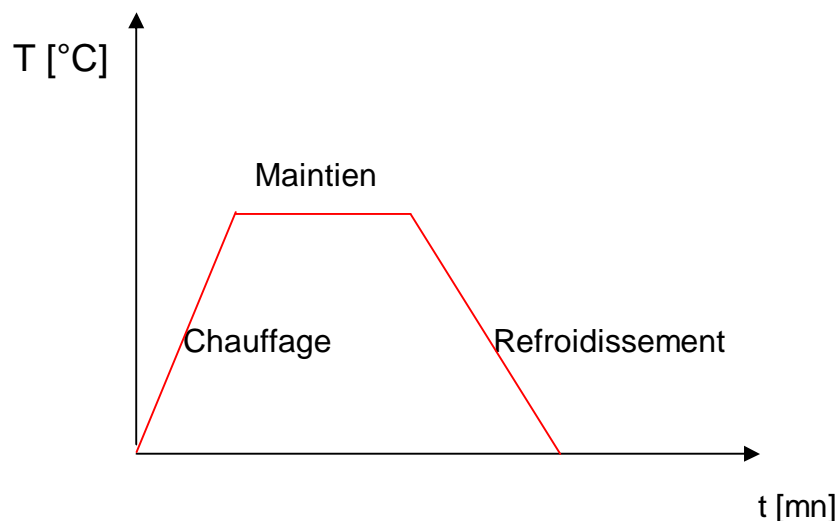


Figure III.6 : Cycle d'un traitement thermique.

### III.5.2.3. Traitements thermiques appliqués

Les traitements thermiques réalisés dans notre étude ont pour but de voir l'influence des caractéristiques mécaniques sur l'usure et surtout la ténacité qui est caractérisée par la dureté.

### III.5.2.4. Trempe

La trempe est utilisée pour augmenter la dureté, la résistance à la rupture mais diminue la résilience et l'allongement [34].

On a mis les échantillons dans un four électrique de type NABER dont la température maximale est 1100 °C (figure III.7). Le mécanisme de la trempe est comme suit :

- Chauffage lent ( $\approx 400$  °C), puis rapide à une température supérieure de 50 °C à celle d'austénitisation. On a choisit les températures de trempe des échantillons à partir du diagramme Fe-C illustré dans la figure III.8 qui précise la température d'austénitisation en fonction du pourcentage de carbone. On a chauffé chaque type d'échantillon à une température  $AC_3 + 50$  °C (ligne Tr), c'est-à-dire, pour l'acier A60, sa température de trempe est 850 °C et la température de trempe des aciers XC48 et XC55 est 830 °C.



Figure III.7 : Four électrique " NABER ".

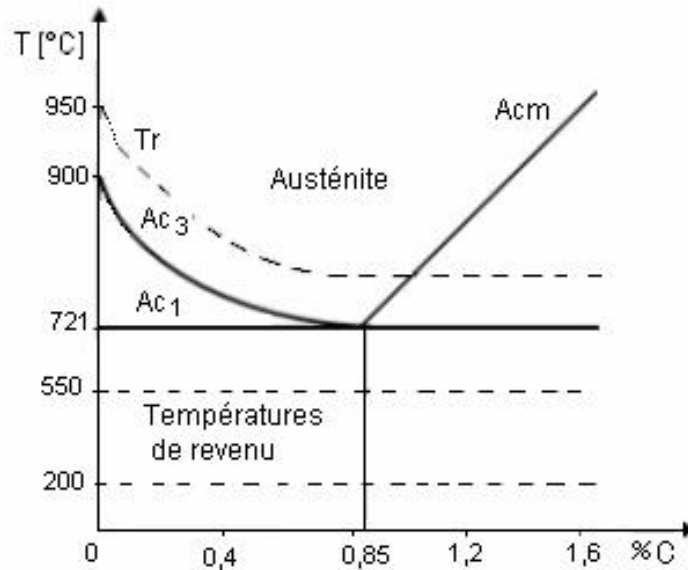


Figure III.8 : Températures de trempe et revenu suivant le diagramme Fe-C [35].

- Maintien en température pour permettre une austénisation complète, la durée de maintien dépend du volume de la pièce, l'expérience montre qu'une minute est nécessaire pour chaque millimètre d'épaisseur de la pièce. La durée de maintien du pion est quatre minutes et douze minutes pour le disque.
- Refroidissement brusque, en trempant la pièce dans un fluide réfrigérant eau ou huile (% C ≤ 0,48, on utilise l'eau, % C > 0,48, on utilise l'huile).

### III.5.2.5. Revenu

Le revenu est pratiqué après trempe pour supprimer les tensions internes qui ont pris naissance au moment de refroidissement brutal et diminuer la fragilité du métal (augmentation de la résilience  $K$ ). Il a l'inconvénient d'atténuer  $R_m$  et  $H$ .

Le processus opératoire du revenu est le suivant :

- . Chauffage entre 200 °C et 500 °C selon les résultats souhaités et le pourcentage de carbone.
- . Maintien en température (la durée est aussi en fonction du volume de la pièce à traiter).
- . Refroidissement lent (à l'air) [36].

### III.5.3. Le polissage

Le polissage dans notre cas est obtenu manuellement, 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.

### **III.6. Essais et examens (avant frottement)**

#### **III.6.1. Essai de microdureté**

##### **III.6.1.1. 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.

##### **III.6.1.2. Principe de microdureté**

Du point de vue scientifique, on peut distinguer les essais de dureté des essais de microdureté 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. On peut distinguer en pratique deux domaines qui correspondent en général aux appareils différents [37].

. La dureté sans charge allant de 1,96 à 98 N, le domaine le plus caractéristique comprenant les charges de 1,96N à 19,6N.

. La microdureté, de 1,96N jusqu'à des charges descendant au centième de newton, le domaine le plus courant comportant des charges comprises entre 0.049N et 0.49N.

Ces domaines correspondent à des techniques expérimentales entièrement différentes, la pénétration des plus petites micro empreintes est de l'ordre de 0.5  $\mu\text{m}$ , alors que les charges réduites provoquent des empreintes de 7 à 40  $\mu\text{m}$ .

Les mesures de microdureté, pour donner des résultats satisfaisants doivent être faites en précisant tous les paramètres, charge appliquée, vitesse de mise en charge et préparation de l'échantillon (polissage).

### **III.6.1.3. Déroulement des essais**

La pratique de microdureté nécessite une préparation des échantillons sur la face qui fait l'objet de l'essai. Cette préparation s'agit tout d'abord de faire un polissage.

Les mesures de la microdureté des échantillons ont été effectuées à l'aide d'un duromètre de type : LECO M-400-H1. Elles ont été réalisées avec un identeur de type Vickers. Le duromètre est doté de moyens de déplacements micrométriques et à affichage numérique d'intervalle d'erreur  $\pm 2\%$ .

Une charge de 500 grammes a été appliquée, en contrôlant la partie concernée à l'aide de l'objectif puis on tangente de sommet du diamant, on règle le temps d'application de la charge (20 secondes) et on attend le bip sonore qui indique la fin de l'application de la charge. A l'aide d'une règle graduée sur l'objectif on prend la longueur de la diagonale de l'empreinte observée et on met l'afficheur à zéro, on déplace le repère de l'objectif à l'autre extrémité en appuyant sur un bouton qui nous donne la dureté Vickers. Les valeurs de dureté obtenues résultent de la moyenne de plusieurs mesures.

## **III.7. Examen métallographique**

### **III.7.1. Introduction**

La métallographie est une science qui se consacre à l'étude de la relation entre la composition, la structure et les propriétés des métaux et des alliages d'une part, et de l'autre, de principes qui régissent leur modification sous l'action des facteurs extérieurs, qu'ils soient thermiques, chimiques, mécaniques, électromagnétiques ou radioactifs.

L'examen métallographique a pour but de mettre en évidence les constituants des produits métallurgiques (métaux purs, combinaisons, solutions solides, eutectiques et eutectoïdes) de la structure de l'échantillon. Pour cela, on procède à l'examen au microscope par réflexion d'une surface polie et généralement attaquée [34].

### **III.7.2. Déroulement de l'essai**

La préparation des échantillons est identique à celle de la microdureté on commence par polir la surface qu'on veut observer et la rendre parfaitement plane que possible. Ensuite on utilise des toiles émeri de plus en plus fines. On ne cesse d'utiliser l'un d'eux que lorsque les stries provenant de la toile précédente ont disparu. La pièce est lavée de façon à ne

laisser aucune trace d'émeri. Il faut obtenir une surface polie analogue à celui d'un miroir. Pour cela on utilise des tourets commandant des feutres. Ces feutres sont recouverts d'un abrasif très fin constitué par de l'alumine  $Al_2O_3$  en suspension dans de l'eau.

On utilise des pâtes contenant de la poudre de diamant dont la grosseur de grains de 1 à  $0.25\ \mu m$ . L'échantillon poli est observé au microscope afin de se rendre compte du fini du polissage.

On passe après à l'attaque chimique des échantillons. Elle se fait à l'aide de réactifs appropriés qui permettent de différencier les constituants. Le réactif chimique utilisé pour nos échantillons est le nital qui est une solution composée de l'acide nitrique dans l'alcool éthylique (4ml d'acide nitrique avec 100 ml d'éthanol), on trempe l'échantillon dans cette solution, un temps de maintien de 2 à 5 seconds suivi d'une opération de nettoyage à l'eau distillée et d'un séchage par flux d'air sur la surface traitée.

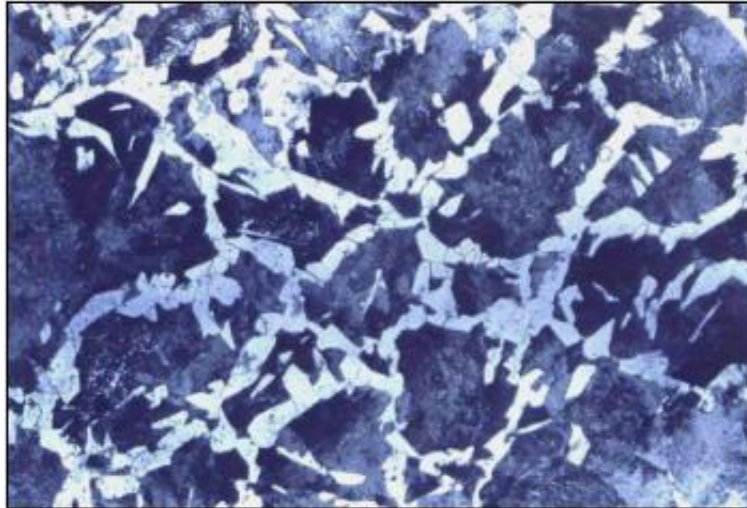
L'examen micrographique a été fait à l'aide d'un microscope métallographique de type "OLYMPIS PME3", équipé d'un système de prise de photos, qui permet l'observation des échantillons, avec un grossissement pouvant atteindre 500 fois. Nous avons pris des micrographies des échantillons avant et après les traitements thermiques.

### **III.7.3. Observation microscopique des échantillons avant traitements thermiques**

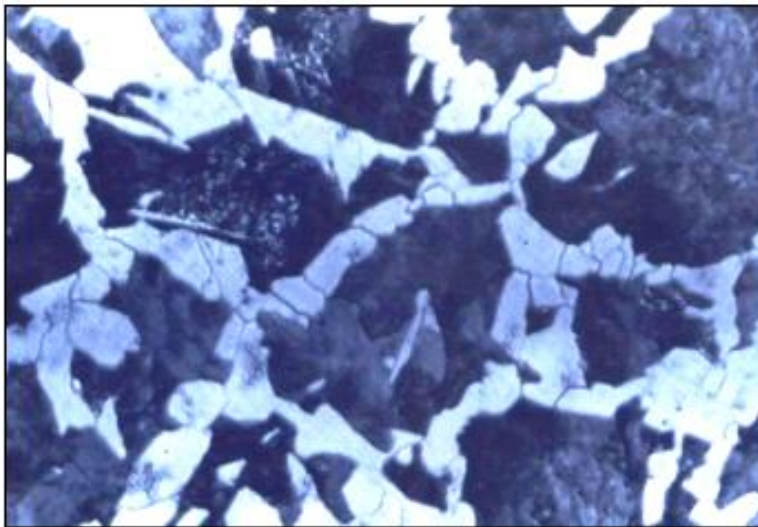
Nous avons pris des photos micrographiques à l'état recuit des échantillons. Les figures qui suivent représentent les meilleures images prises après plusieurs essais.

#### **III.7.3.1 Observation microscopique de l'acier XC48**

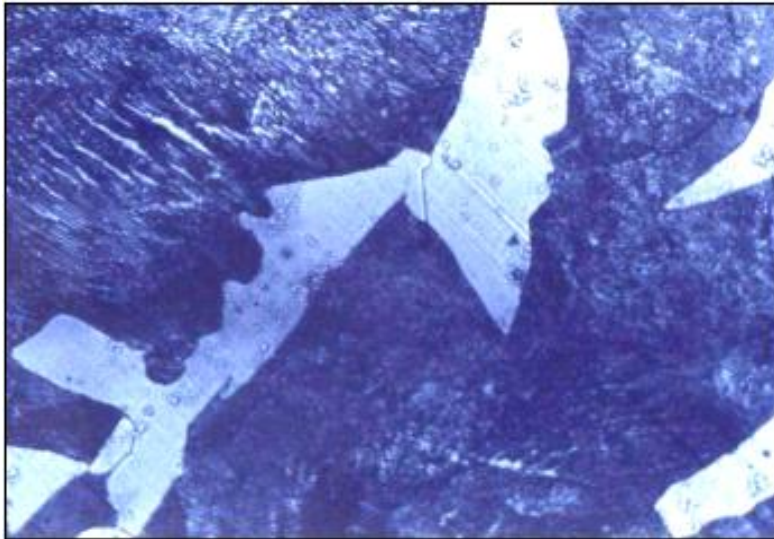
L'analyse a montré que la structure est cellulaire de la ferrite et de la perlite lamellaire avec une grande proportion volumique de la perlite, les grains ferritiques se trouvent au niveau des joints du grain perlitique, c'est une structure qui a subi un recuit de normalisation (figure III.9).



Grossissement ( $\times 100$ ).



Grossissement ( $\times 200$ ).

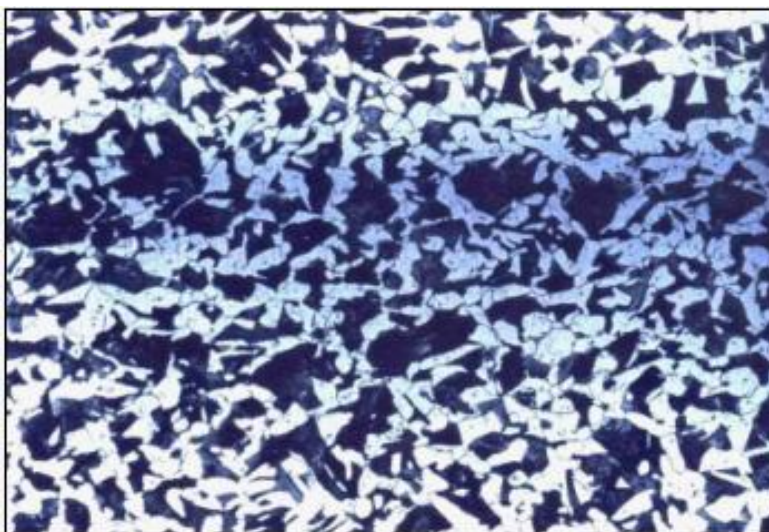


Grossissement ( $\times 500$ ).

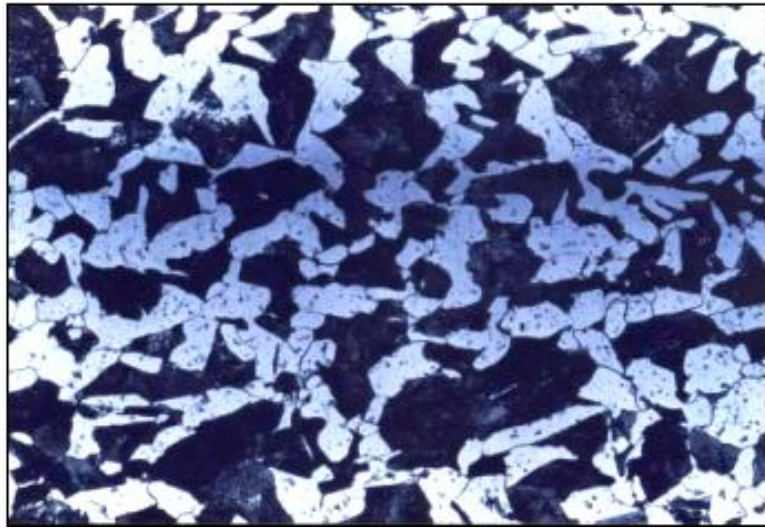
Figure III.9 : Micrographie de l'acier XC48 non traité.

### III.7.3.2. Observation microscopique de l'acier A60

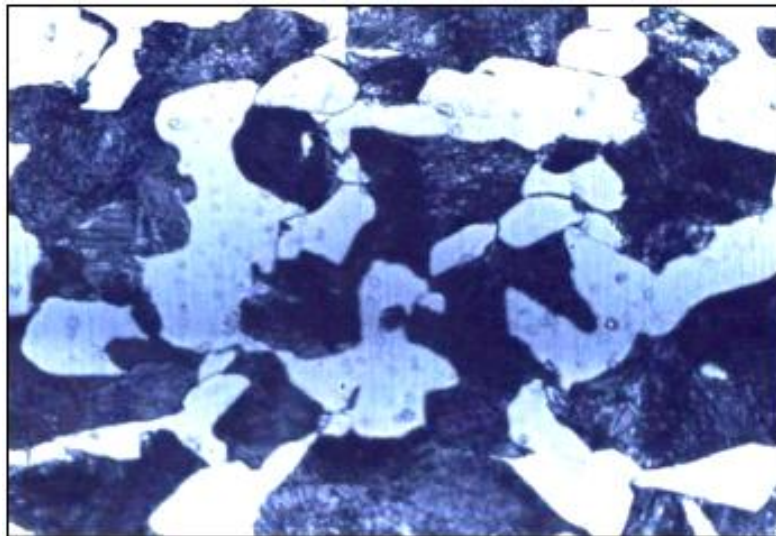
L'analyse indique que la structure de l'acier est cellulaire de la ferrite et de la perlite lamellaire (la proportion volumique de la ferrite est plus supérieure que la perlite), avec des grains ferritiques allongés et orientés dus à l'effet de laminage et présence d'inclusion, de petits globules de sulfure sur fond de ferrite (figure III.10).



Grossissement ( $\times 100$ ).



Grossissement ( $\times 200$ ).

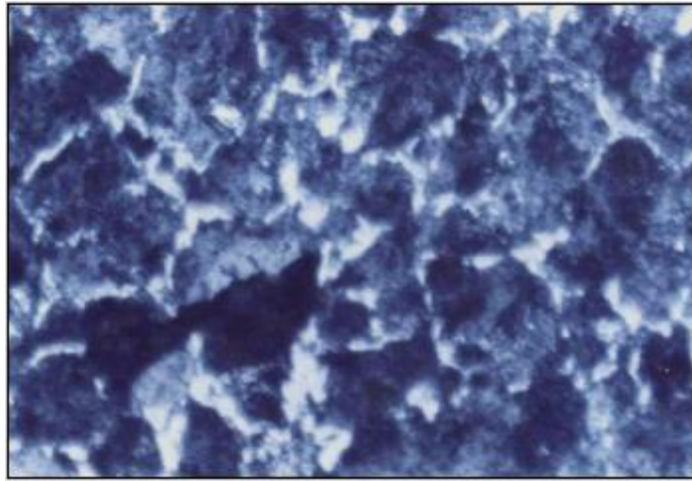


Grossissement ( $\times 500$ ).

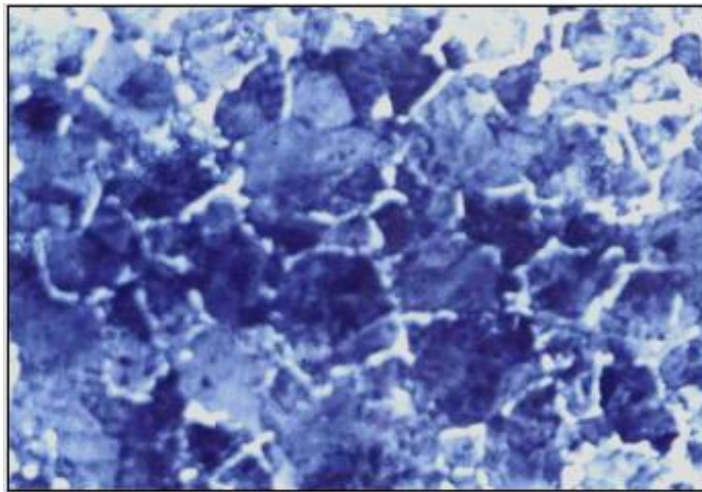
Figure III.10 : Micrographie de l'acier A60 non traité.

### III.7.3.3. Observation microscopique de l'acier XC55

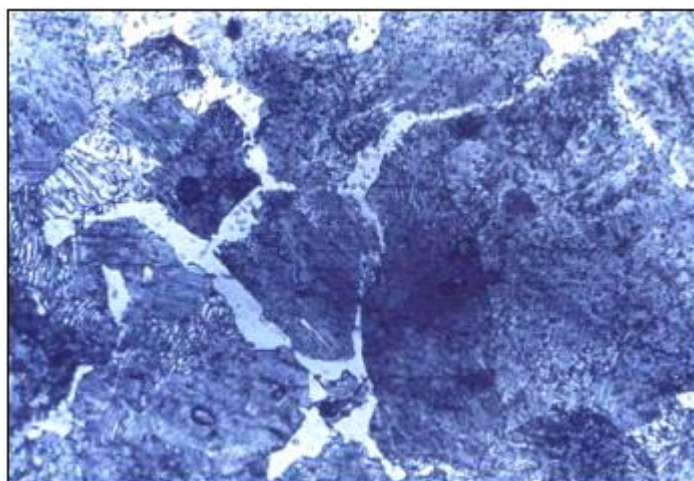
L'analyse a donné une structure cellulaire de ferrite et perlite lamellaire (la proportion volumique de la perlite est plus supérieure que la ferrite), la ferrite est dispersée entre les plaques lamellaires de la perlite avec présence d'une colonie d'inclusion oxydée très fine sur fond de ferrite et de perlite (figure III.11).



Grossissement ( $\times 100$ ).



Grossissement ( $\times 200$ ).



Grossissement ( $\times 500$ ).

Figure III.11 : Micrographie de l'acier XC 55 non traité.

#### III.7.4. Observation microscopique des échantillons après traitements thermiques

La micrographie des aciers après trempe et revenu montre que la structure générale est composée essentiellement de martensite fine et de grains fins de cémentite (figure III.12, III.13 et III.14).

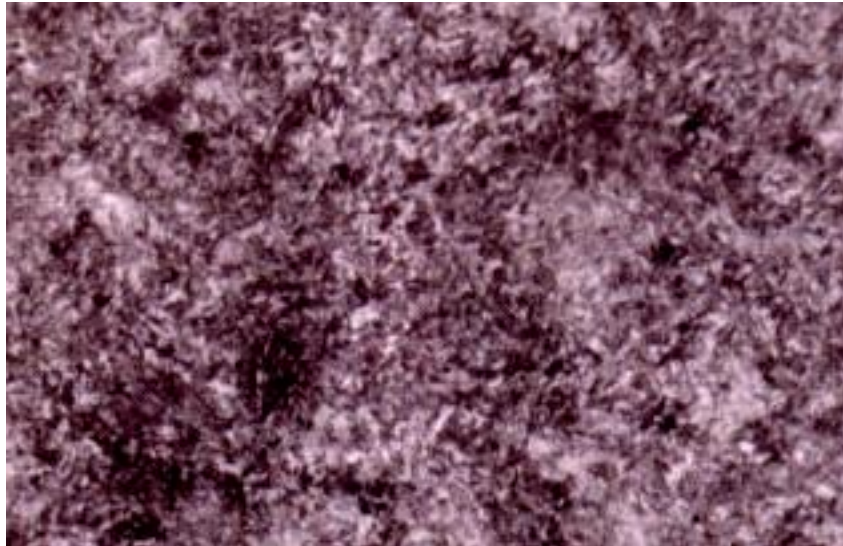


Figure III.12 : Microstructure de l'acier XC48 trempé revenu ayant la dureté 38 HRC (x 500).

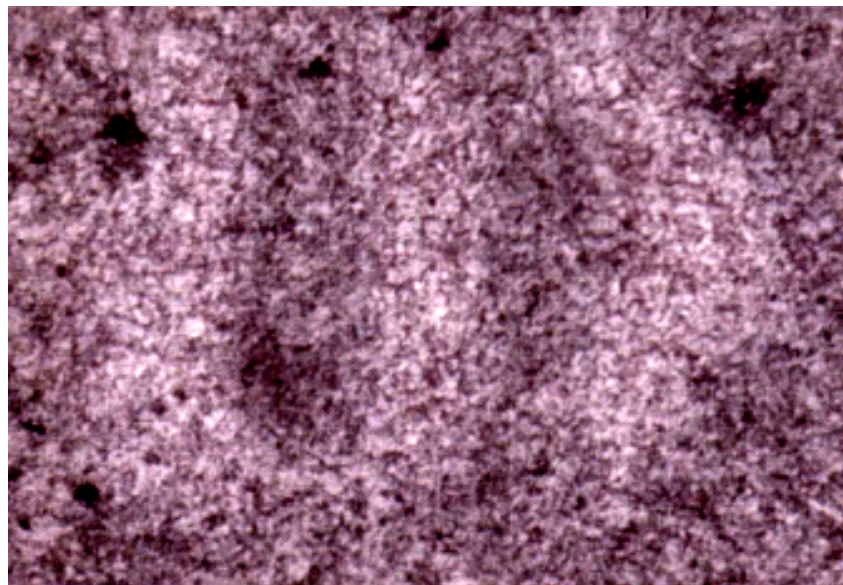


Figure III.13 : Microstructure de l'acier A60 trempé revenu ayant la dureté 38 HRC (x 500).

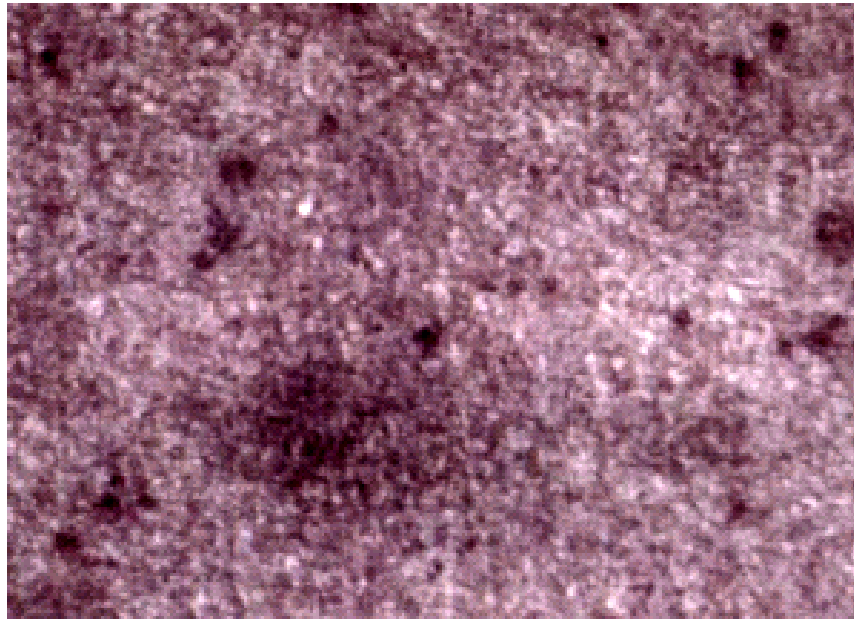


Figure III.14 : Microstructure de l'acier XC55 trempé revenu ayant la dureté 45 HRC (x 500).

### III.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 III.15). L'afficheur a donné une moyenne de rugosité  $R_a = 0,06 \mu\text{m}$  et l'enregistreur a tracé les profils (figure III.16).



Figure III.15 : Rugosimètre à stylet de type "MITUTOYO SurfTest - 4".

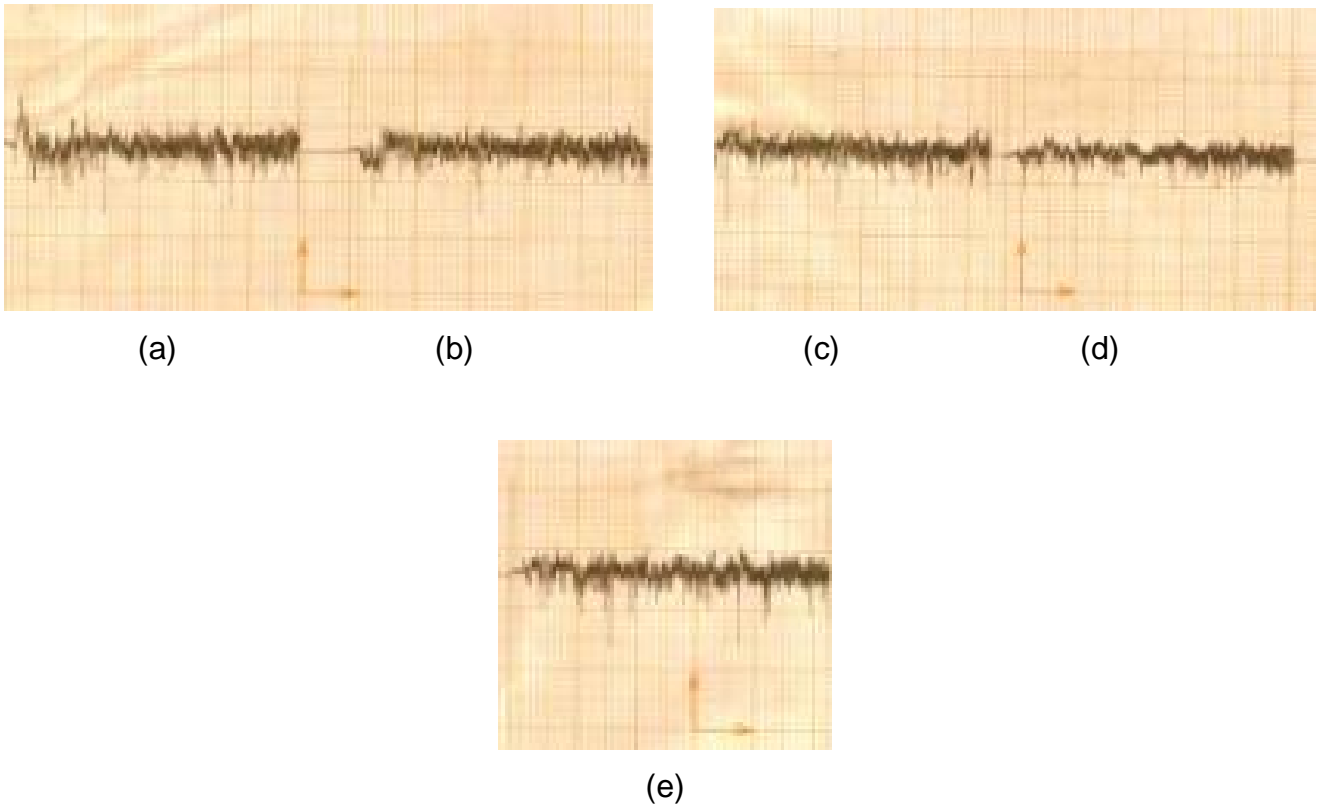


Figure III.16 : Enregistrement des profils de la rugosité :(a) A60 non traité ; (b) A60 traité ; (c) XC48 non traité ; (d) XC48 traité ;(e) XC55 traité.

### III.9. Moyens de mesure

#### III.9.1. La charge normale

Une charge normale  $N$  est appliquée à l'extrémité droite du bras, à l'aide des masses d'une boîte de poids de mesure.

On peut considérer le bras du tribomètre ou on porte la charge normale comme une poutre rigide soumise à des charges concentrées (figure III.17).

La détermination de la force normale appliquée sur le pion est basée sur le principe de l'équilibre statique suivant :

$$\sum F_{\text{ext}} = 0 \tag{III.1}$$

$$\sum M_{F_{\text{ext}}} / O = 0 \tag{III.2}$$

Après projection des forces appliquées sur le bras selon le sens positif choisi on écrit :

$$N \cdot a - F(a+b) = 0 \quad (\text{III.3})$$

$$N = F(a+b)/a$$

$N$  : La charge appliquée sur le pion [N]

$F$  : La charge appliquée à l'extrémité du bras =  $mg$  [N]

Si  $m = 125 \text{ g}$                        $N = 125 \cdot 10^{-3} \cdot 10 (8.5+22.5)/8.5 = 5 \text{ N}$

Si  $m = 250 \text{ g}$                        $N = 9 \text{ N}$

Si  $m = 375 \text{ g}$                        $N = 13 \text{ N}$

Si  $m = 500 \text{ g}$                        $N = 18 \text{ N}$

Si  $m = 625 \text{ g}$                        $N = 22 \text{ N}$

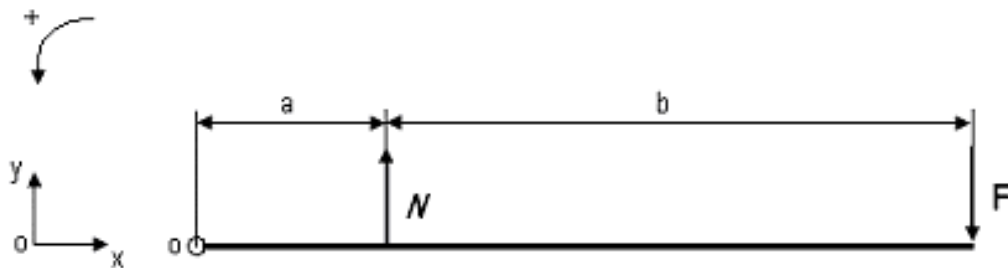


Figure III.17 : Système de charges appliquées sur le bras.

### III.9.2. Vitesse linéaire de glissement

La stabilité de vitesse de rotation du moteur entraînant le disque est assurée par l'emploi d'un moteur à courant continu muni d'un variateur de fréquence, qui permet d'avoir une gamme de vitesses de rotation allant de  $10 \text{ tr.mn}^{-1}$  à  $200 \text{ tr.mn}^{-1}$ . Pour une piste de rayon  $r$ , choisi sur le disque, la vitesse linéaire  $V$  est donnée par la relation :

$$V = \omega \cdot r = 2 \cdot p \cdot r \cdot N = \frac{p}{30} r \cdot N \quad [\text{m/s}] \quad (\text{III.4})$$

### III.9.3. Force tangentielle de frottement

Sous l'effet combiné de la charge normale et l'effort tangentiel, un couple est exercé sur le bras. Le capteur de force retient le bras de charge dans le plan horizontal et ceci enregistre la force de frottement  $F_t$  sur le boîtier d'affichage produite en fonction du temps.

### III.9.4. Coefficient de frottement

Pour chaque essai on fait varier un paramètre, les autres étant fixés et on mesure le coefficient de frottement  $\mu = F_t / N$ .

### III.9.5. Mesure de l'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. Après l'expérience, il est nettoyé à nouveau et pesé. L'usure du pion est :

$$U = \Delta m = m_i - m_f \quad [10^{-3} \text{ kg}]$$

$m_i$  masse initiale du pion.

$m_f$  masse finale du pion.

### III.10. Courbe d'étalonnage

L'étalonnage que nous avons fait du capteur de force utilisé, dans le dispositif expérimental, permet d'accéder aux relations entre les différences de potentiel mesurées et les forces qu'elles expriment. Les résultats sont représentés sur la figure III.16.

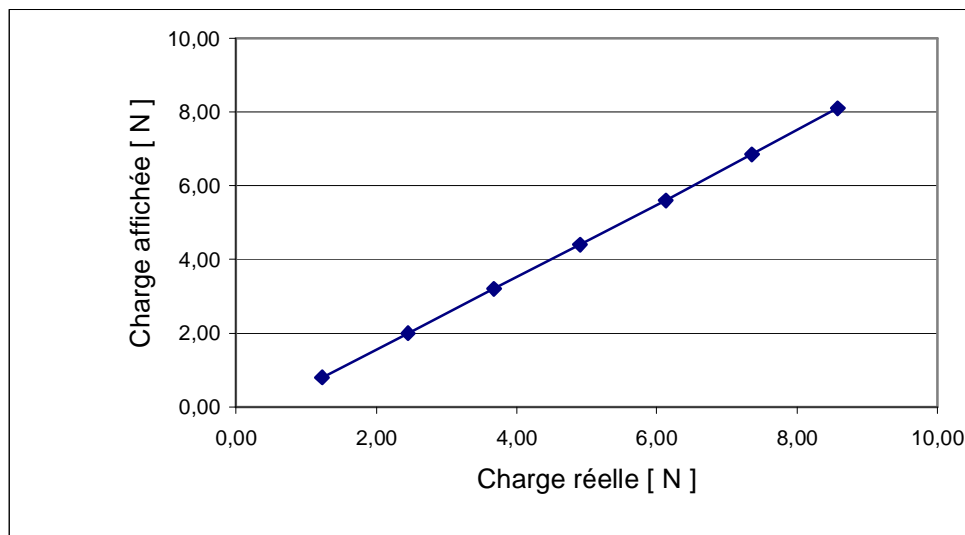


Figure III.18 : Courbe d'étalonnage.

### III.11. La durée de l'essai d'usure

Chaque essai dure environ quarante minutes, dans une atmosphère ambiante.

## CHAPITRE IV

### RESULTATS EXPERIMENTAUX

#### INFLUENCE DES PARAMETRES MECANIQUES SUR LE FROTTEMENT ET L'USURE DES COUPLES UTILISES

##### IV.1 Déroulement des essais

Dans tous les essais, on a fixé le temps (40 mn) et le matériau du disque ayant pour dureté 45HRC après trempe et revenu. Dans le tableau VI.1 le couple d'aciers utilisé est A60 non traité avec XC55 traité, en faisant varier la vitesse linéaire de glissement et la charge normale. Pour le tableau VI.2, on a fixé tous les paramètres cités dans le tableau précédant et on a seulement substitué la nuance du pion par XC48 non traité.

Le tableau VI.3 et le tableau VI.4 présentent respectivement la variation de la dureté des pions traités de nuances A60 et XC48 avec la fixation de la vitesse linéaire de glissement et la charge normale.

Nous avons mentionné la perte en masse du pion A60 non traité en fonction du temps (tableau VI.5), ainsi que pour le pion XC48 non traité (tableau VI.6), en fixant la charge normale et la vitesse de glissement.

Le tableau VI.7 illustre les résultats obtenus de l'usure du pion de nuance A60 traité d'une dureté 38HRC en fonction du temps.

Le tableau VI.8 donne aussi l'usure du pion XC48 traité à la dureté 38HRC en fonction du temps. L'ensemble des tableaux se trouve à l'annexe.

##### IV.2. Evolution du coefficient de frottement

###### IV.2.1. Variation de $\mu$ en fonction de la charge normale

La figure IV.1 illustre la variation du coefficient de frottement en fonction de la charge normale appliquée. En examinant cette figure, sur ces courbes on peut distinguer deux zones :

### - 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).

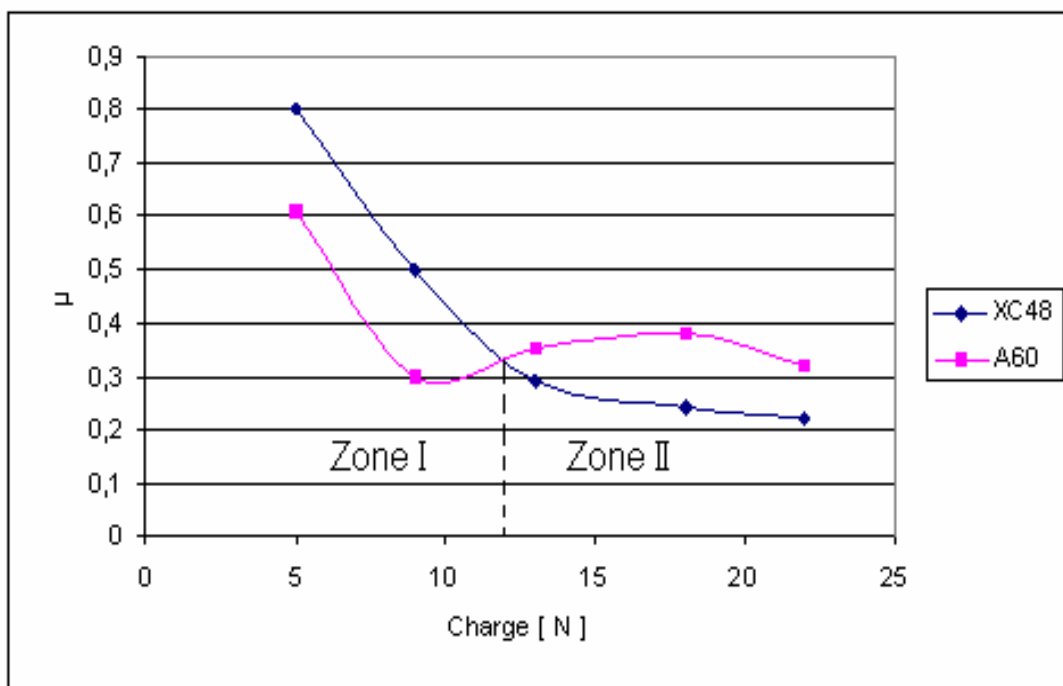


Figure VI.1 : Variation du coefficient de frottement  $\mu$  en fonction de la charge ( $V=0,24$  m/s)

### VI.2.2. Variation de $\mu$ en fonction de la vitesse de glissement

Sur les courbes (figure IV.2) on peut remarquer deux branches (zones) différentes :

- Dans la première ( $0,08 \leq V \leq 0,32$  m/s)  $\mu$  est assez élevé, il va diminuer quand la vitesse augmente pour atteindre une valeur limite de l'ordre de 0,55 pour le couple A60/XC55 et 0,60 pour XC48/XC55.
- La deuxième branche ( $0,32 < V \leq 0,40$  m/s) est caractérisée par une stabilité de  $\mu$  à la valeur limite.

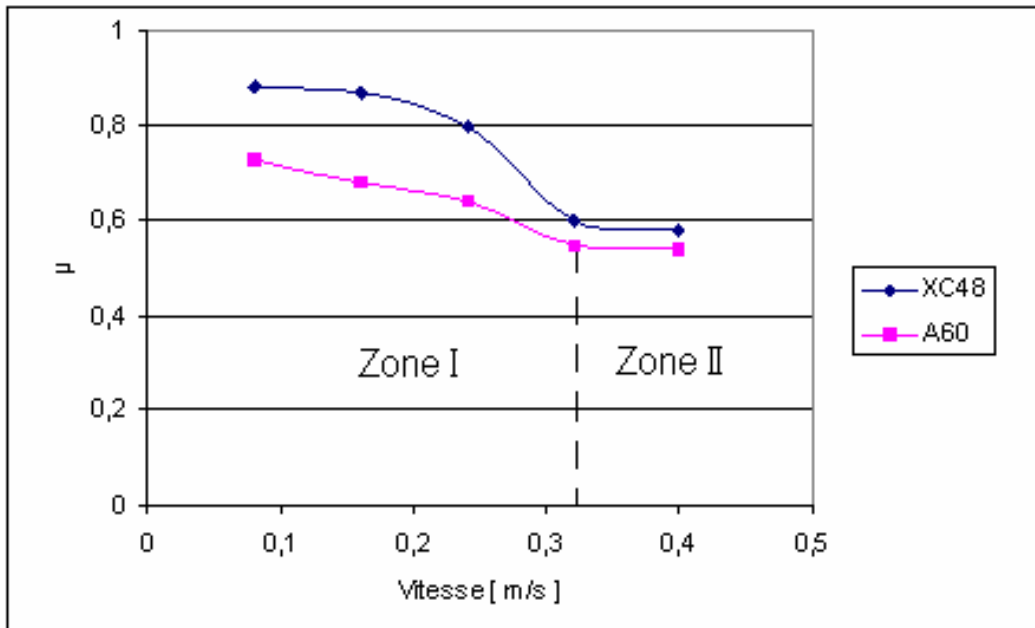


Figure VI.2 : Evolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement ( $N = 5N$ ).

Aux faibles vitesses, la courbe de  $\mu$  présente des fluctuations pendant 35 minutes puis  $\mu$  se stabilise. Ces fluctuations sont moins d'amplitude et durent environ 20 minutes et  $\mu$  diminue avec l'accroissement de la vitesse (figure VI.3).

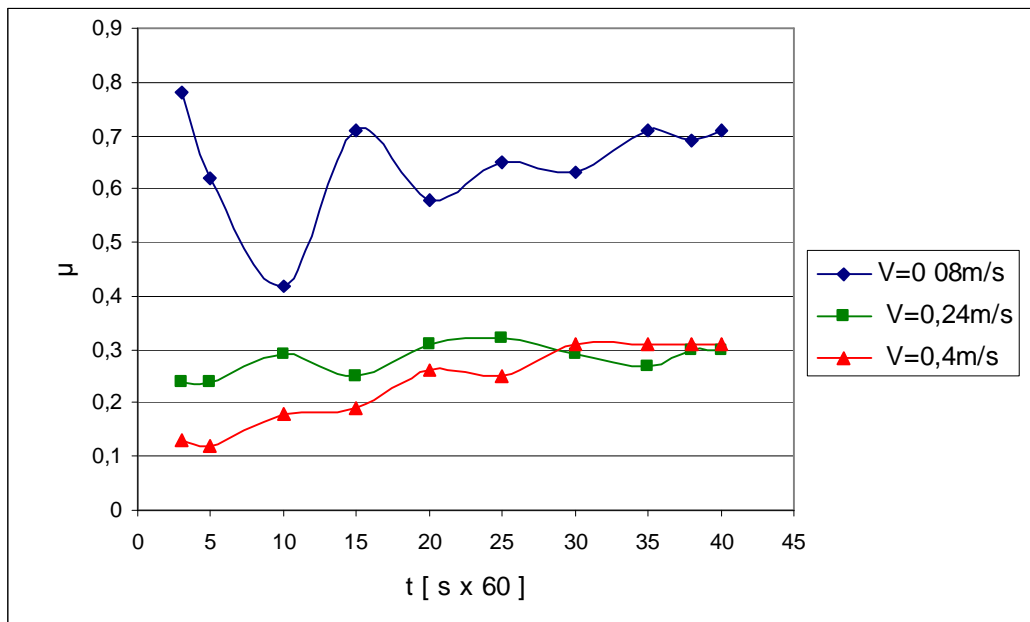
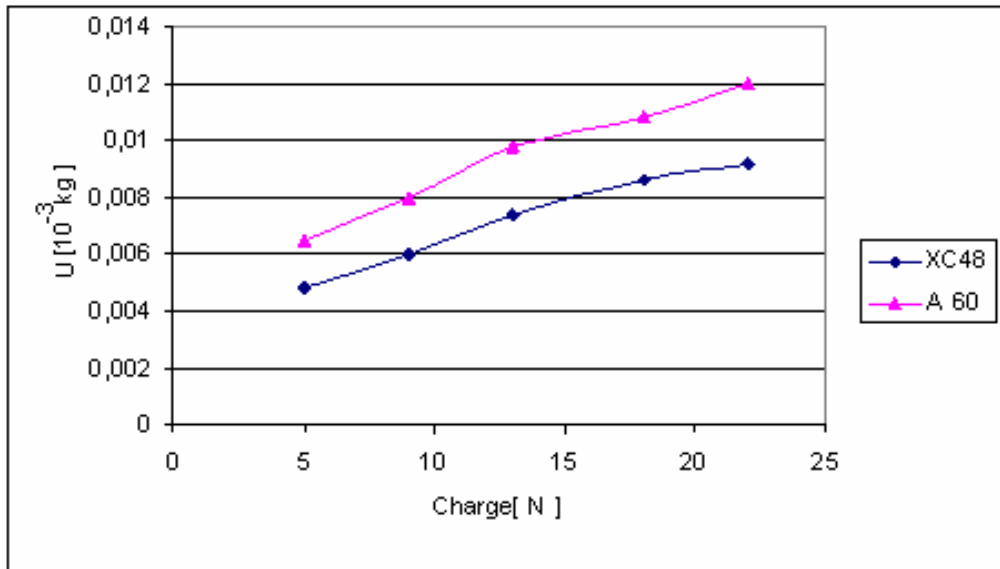


Figure IV.3 : Evolution du coefficient de frottement de l'acier XC48 non traité avec XC55 en fonction du temps ( $N = 13N$ ).

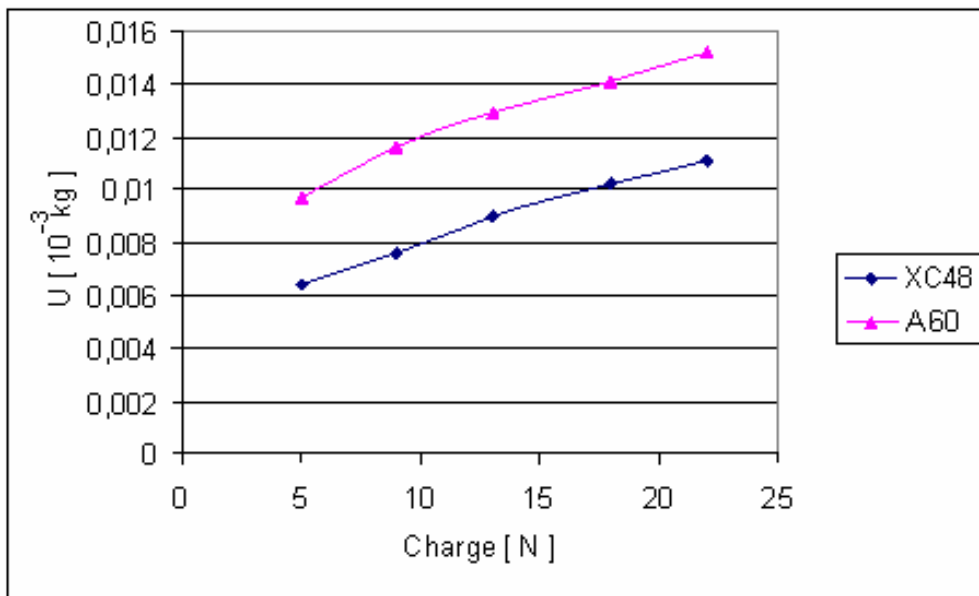
### IV.3 Variation de l'usure

#### IV.3.1. Variation de l'usure en fonction de la charge normale

La figure IV.4 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.



(a)



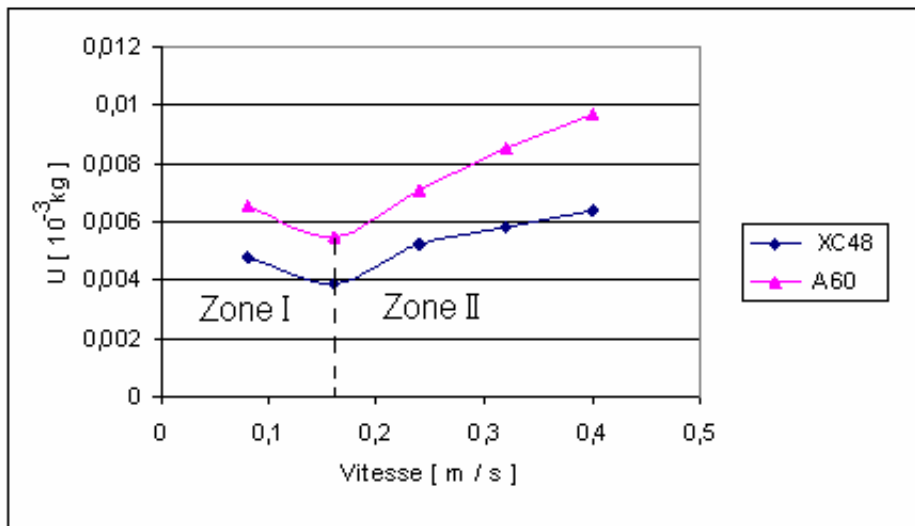
(b)

Figure IV.4: Effet de la charge normale sur l'usure du pion : (a)  $V=0,08$  m/s ; (b)  $V=0,40$  m/s.

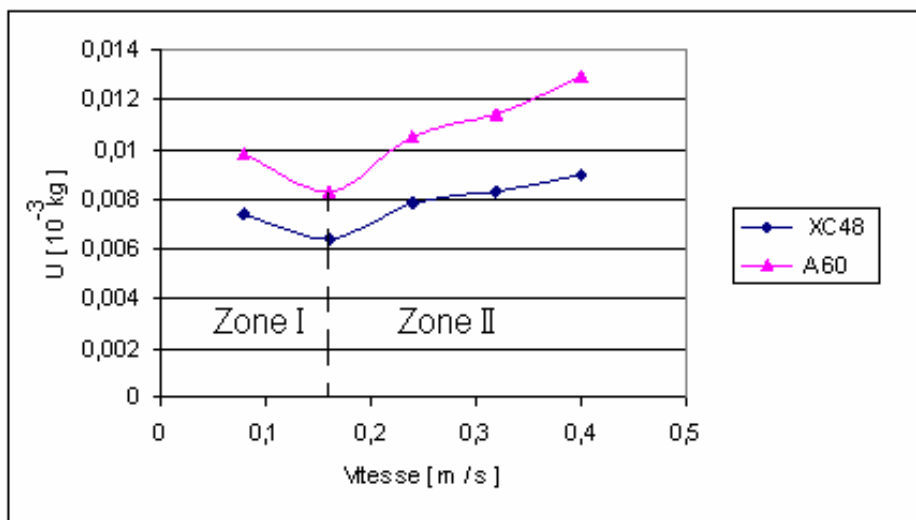
### IV.3.2. Influence de la vitesse de glissement sur l'usure

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

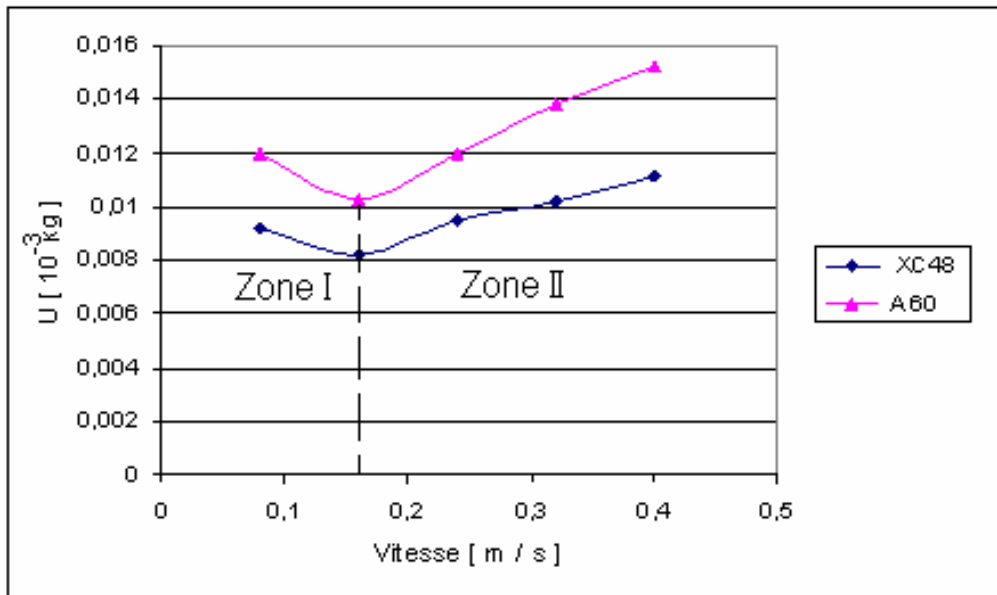
Dans toutes les courbes de la figure IV.5 nous avons constaté qu'il existe deux zones différentes, une zone I où la perte en masse du pion varie d'une manière décroissante avec la vitesse linéaire de glissement appartenant à l'intervalle [0,08 m/s, 0,16 m/s] et une autre zone II caractérisée par l'augmentation légère de l'usure lorsque cette vitesse augmente de 0,16 m/s à 0,40 m/s. De plus, le couple A60 / XC55 montre généralement une perte élevée comparée au couple XC48 / XC55.



(a)



(b)



(c)

Figure IV.5 : Variation de l'usure en fonction de la vitesse linéaire.

### IV.3.3. Effet de la dureté sur l'usure

La figure IV.6 indique que la variation de l'usure est inversement proportionnelle à la dureté des aciers utilisés. On remarque que le couple XC48/XC55 présente une résistance à l'usure plus élevée que la résistance du couple A60/XC55.

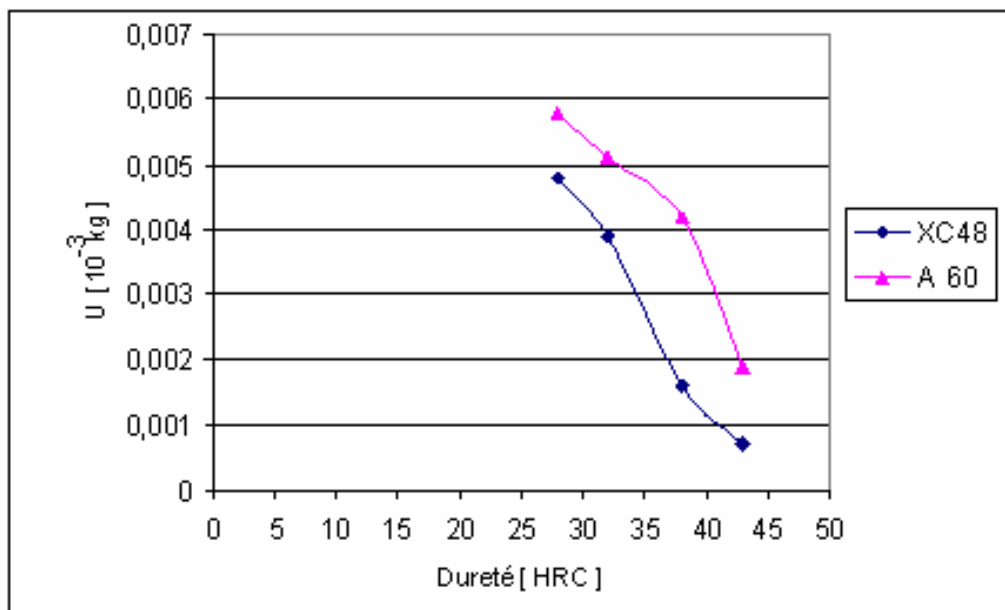
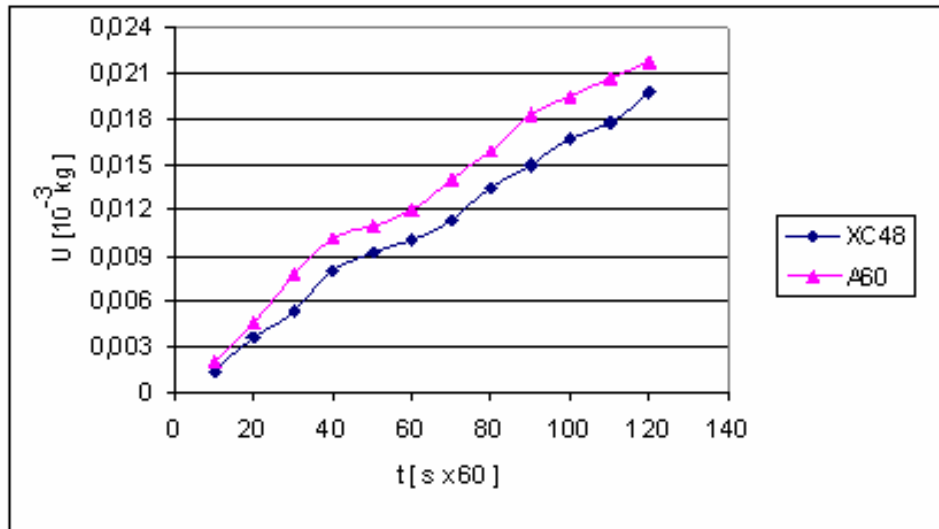


Figure IV.6 : Effet de la dureté sur l'usure des pions ( $N = 13N$  et  $V = 0,24m/s$ ).

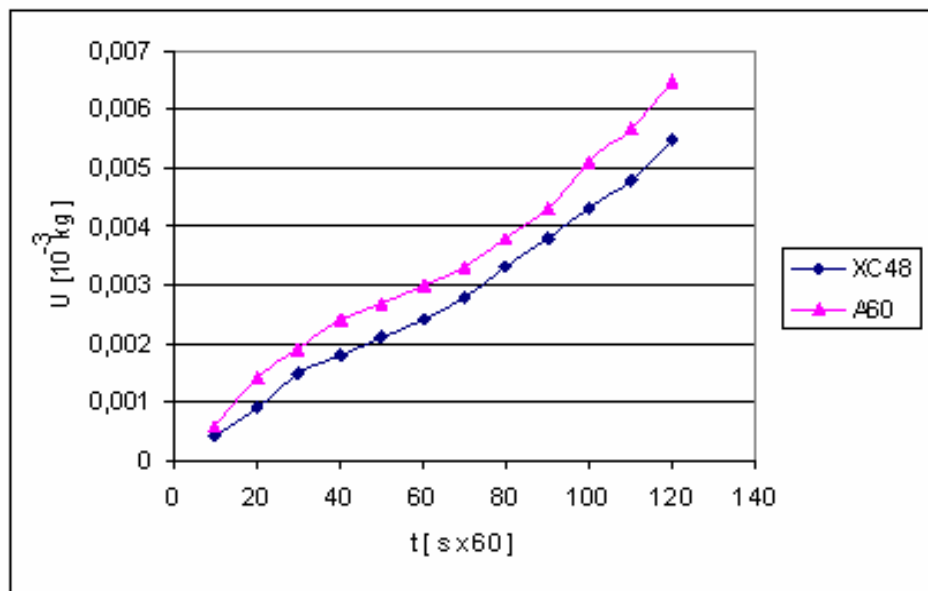
#### IV.3.4. Variation de l'usure en fonction du temps

Il faut noter tout d'abord que pour ces tests, nous avons maintenu la force appliquée à une valeur soit 13N et la vitesse de glissement à une valeur 0,24 m/s.

La figure IV.7 donne la variation de l'usure  $U$  (perte en masse du pion en  $10^{-3}$  kg) avec le paramètre temps. On constate que toutes les courbes ont des allures identiques, elles sont sensiblement des droites caractérisées de pente  $a$  durant les premières 40 minutes, puis s'infléchissent légèrement et enfin reprennent leurs inclinaisons initiales après 80 minutes environ de fonctionnement du système tribologique.



(a)



(b)

Figure IV.7: Relation entre l'usure  $U$  et le temps  $t$  : (a) XC48 et A60 non traités ; (b) XC48 et A60 traités.

## CHAPITRE V

### ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

#### V.1. Influence de la charge normale sur le frottement et l'usure

Aux très faibles charges, les surfaces des matériaux antagonistes ne se touchent que par les aspérités les plus élevées (figure V.1a). La surface de contact croît au fur et à mesure que la charge  $N$  augmente (figure V.1b) sous l'action combinée de la charge normale et la contrainte tangentielle, les aspérités s'enchevêtrent pour former la surface réelle du contact. 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 (figure IV.1).

Pour des petites charges (figure IV.4), 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 (usure par oxydation). On est donc en usure adhésive douce, autrement dit, le fragment d'usure cisailé du pion peut rester fixé sur la surface du disque.

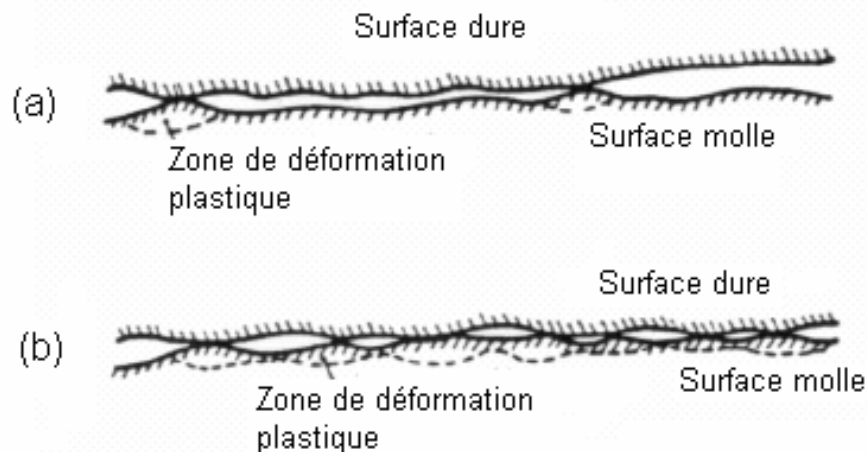


Figure V.1: Contact des aspérités en frottement (a) sous faible charge ;  
(b) sous forte charge [21].

La nature du dépôt transféré est le facteur qui détermine si les variations observées du frottement et de l'usure sont des fluctuations instantanées ou sont des évolutions plus longues dans le temps. Nos observations ont permis de constater que, dès que le transfert du métal sur le disque s'amorce, le coefficient de frottement commence à fluctuer, il se stabilise dès que le film transféré atteint un état stable.

Il est important de remarquer que le métal transféré s'oxyde aux températures atteintes par le contact disque-pion aux grandes charges. Les traces d'oxyde de fer que nous avons observé sur la piste du disque ont deux origines :

La couche oxydée sur le pion se rompt par abrasion mécanique, parce que le film d'oxyde est plus dur ( $10^4$  MPa). La quantité d'oxyde ainsi arrachée se dépose sur la piste pour se mêler au fer transféré.

La pellicule métallique transférée s'oxyde et il apparaît que l'usure du pion n'est pas déterminée par le transfert de matière du pion vers le disque, mais par l'oxydation du film transféré.

## **V.2. Effet de la vitesse sur le frottement et l'usure**

Dans l'intervalle de faibles vitesses, entre 0,08 m/s et 0,16 m/s, le coefficient de frottement  $\mu$  (figure IV.2 et figure IV.3) et l'usure  $U$  (figure IV.5) sont élevés au début parce que les jonctions métalliques ont le temps nécessaire pour accroître leurs sections par fluage et la surface réelle de contact s'élargit radialement et dans le sens du mouvement. La décroissance du coefficient de frottement et l'usure est attribué au diminution du temps de croissance des jonctions et par conséquent, le nombre de contacts métalliques est réduit par la formation d'une couche d'oxyde sur la face frottante du pion qui diminue le frottement et protège la surface contre l'endommagement en assurant une bonne résistance à l'usure. On remarque que les débris d'usure sont sous forme des films d'oxyde de couleur rouge-brun. Bien que ces films d'oxyde aient une parenté avec leur matériau d'origine, ils n'ont pas la même composition ni la même structure que leurs parents. Vu l'élévation de la température, le film d'oxyde devient ductile, dans ces conditions, l'oxyde agit comme lubrifiant.

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

présente des déformations avec des sillons labourés dans le sens du mouvement, caractéristique d'une usure abrasive.

### **V.3. Influence de la dureté sur l'usure**

La figure IV.6 montre que l'usure des pions est inversement proportionnelle à leurs duretés. 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.

### **V.4. Influence du paramètre temps sur l'usure**

Pour une charge  $N$  et une vitesse  $V$  données, l'usure  $U$  des pions est généralement une fonction linéaire en fonction du temps (figure IV.7).

Pendant le rodage, au début de glissement, les états de surface du couple se modifient rapidement. Les aspérités les plus hautes d'une surface rugueuse en état de déformation plastique sont écrasées et en partie arrachées. Après le rodage, les surfaces deviennent presque polies et présentent des petites ondulations ce qui justifie la croissance lente et stationnaire de l'usure. En revanche, une surface très lisse voit sa rugosité augmenter du fait du labourage par les aspérités de la surface opposée, ce qui va par conséquent accroître de nouveau l'usure.

### **V.5. Effet thermique sur le comportement tribologique des couples**

Considérons la surface de contact entre le pion et le disque, circulaire de rayon  $a$  (figure V.2). La chaleur dissipée dans le contact peut être assimilée à celle provenant de deux sources : une source fixe transmettant une quantité de chaleur par unité de temps  $Q_d$  du disque mobile et une source mobile transmettant une quantité de chaleur par unité de temps  $Q_p$  du pion fixe. La chaleur générée par le frottement  $Q = Q_d + Q_p$  est distribuée entre les deux surfaces de telle sorte que l'élévation de température à l'interface  $\Delta q_m$  soit la même pour les deux solides. On prend pour référence la température des solides en un point éloigné de l'interface.

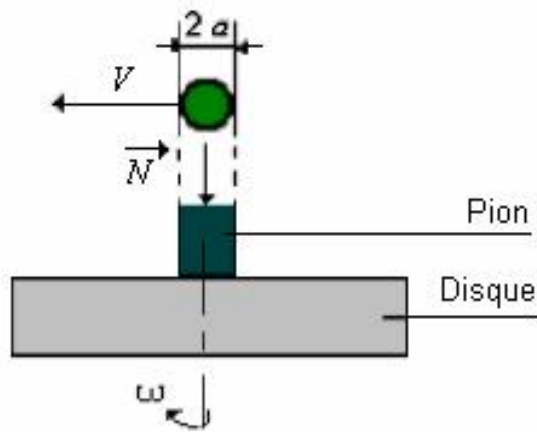


Figure V.2 : Forme de contact pion-disque.

On s'accorde à considérer deux régimes, l'un dit établi dans lequel la vitesse de glissement soit faible et un autre régime aux grandes vitesses. La limite de la vitesse du régime établi se détermine à partir des valeurs d'un paramètre  $L$  défini par la relation :

$$L = \frac{V.a}{2c}$$

$c = \frac{I}{r.C_p}$  : Diffusivité thermique,  $I$  est la conductibilité thermique,  $r$  densité,  $a$  : Le rayon

de la surface réelle totale de contact,  $V$  vitesse de glissement et  $C_p$  la chaleur spécifique.

Le tableau V.1 illustre les valeurs de  $r$ ,  $I$ , et  $C_p$  des aciers utilisés.

Acier	$r$ [ $10^3$ kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg°C]	$I$ [J.m/m <sup>2</sup> .s.°C]	Réf
XC48	7,85	465	45	[40]
A60	7,85	475	50	[40]
XC55	7,85	460	40	[40]

Tableau V.1 : Valeurs de  $r$ ,  $I$ , et  $C_p$  des aciers utilisés.

$L$  représente le rapport entre le temps nécessaire pour atteindre la température maximale à une profondeur égale à  $a$ , dans le cas d'un pulse thermique appliqué à la surface et la durée du pulse.

Si  $L < 0,1$ , le régime est établi et la température du pion à l'interface s'écrit comme suit :

$$\Delta q_m = \frac{Q_p}{4a.I_p}$$

Avec  $Q_p = Q_d = m.N.V$   $m$  : Coefficient de frottement et  $N$  la charge normale appliquée  
 $I_p$  étant la conductibilité thermique du pion.

De même, la relation conduisant la température à l'interface pion-disque, coté disque s'écrit :

$$\Delta q_m = \frac{Q_d}{4a.I_d}$$

Dans le cas ou  $L > 5$ , la température à l'interface est :

$$\Delta q_m = \frac{0,31.Q_p}{I_p.a} \left( \frac{c_p}{V.a} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Si  $0,1 < L < 5$  on prend la relation :

$$\Delta q_m = a \frac{Q_p}{4a.I_p}$$

Avec  $a$  variant de 0,85 à 0,35 lorsque  $L$  varie de 0,1 à 5.

Dans notre cas, il est nécessaire d'évaluer l'aire de contact réelle :

$$N = p.a^2.H$$

$H$  : La dureté du métal le plus tendre.

Pour une rupture dans l'acier XC48,  $N = 13$  N,  $H = 6,6.10^8$  Pascal d'où  $a = 79$   $\mu$ m.

Pour une rupture dans l'oxyde ferrique  $Fe_2O_3$  dont la dureté est égale  $10^4$  MPa, le rayon du cercle de contact  $a = 20$   $\mu$ m.

Pour une rupture dans l'acier A60,  $N = 13$  N,  $H = 5,9.10^8$  Pascal, d'où  $a = 84$   $\mu$ m.

En prenant les valeurs de  $a$  extrêmes :  $a = 20$   $\mu$ m et  $a = 79$   $\mu$ m pour l'acier XC48,  $a = 20$   $\mu$ m et  $a = 84$   $\mu$ m pour l'acier A60 pour trois vitesses différentes 0,08 m/s, 0,24 m/s et 0,40 m/s.

Les valeurs de l'élévation de températures  $\Delta q_m$  correspondantes sont données dans le tableau V.2.

Acier	$a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$m$	$N$ [N]	$V$ [m/s]	$L$	$a$	$Q_p$ [Watt]	$\Delta q_m$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
XC48	20	0,53	13	0,08	0,06	/	0,55	153
		0,29	13	0,24	0,18	0,83	0,90	207
		0,23	13	0,40	0,30	0,80	1,19	264
	79	0,53	13	0,08	0,25	0,82	0,55	32
		0,29	13	0,24	0,77	0,78	0,90	49
		0,23	13	0,40	1,28	0,72	1,19	60
A60	20	0,40	13	0,08	0,05	/	0,41	102
		0,35	13	0,24	0,18	0,83	1,09	226
		0,36	13	0,40	0,30	0,80	1,87	374
	84	0,40	13	0,08	0,25	0,82	0,41	20
		0,35	13	0,24	0,75	0,79	1,09	50
		0,36	13	0,40	1,25	0,73	1,87	81

Tableau V.2 : Evolution de la température de contact.

Suivant les résultats illustrés, on constate que :

Pour le rayon  $a=20 \mu\text{m}$ , les valeurs de  $\Delta q_m$  pour l'acier A60 sont légèrement supérieures à celles de l'acier XC48. Cette différence s'explique comme suit :

La chaleur de frottement naît à l'extrémité des aspérités en contact. Elle est ensuite transmise au corps des matériaux par conduction [41]. Comme la conductibilité thermique de l'acier XC48 est inférieure à celle de l'acier A60, donc ce dernier reçoit une quantité de chaleur supérieure ce qui conduit à l'élévation de sa température avec le temps jusqu'à équilibre thermique.

En considérant le même rayon de l'aire de contact, on constate une augmentation de  $\Delta q_m$  avec la vitesse de glissement. Par contre, une baisse significative de  $\Delta q_m$  est enregistrée avec l'augmentation de l'aire de contact. Cette diminution est attribuée à la répartition de la quantité de chaleur produite sur toute l'aire de contact.

## V.6. Conséquences du frottement et de l'usure sur les surfaces frottantes

Au cours de nos expériences, nous avons remarqué l'existence d'un transfert de matière du pion vers la piste de friction du disque. Ce transfert est lié à la chaleur générée à l'interface.

La figure V.3 montre la piste d'un disque ayant frotté contre un pion, où on distingue aisément la détérioration de la piste avec un taux de recouvrement important d'oxyde. De plus, l'état de surface avant le frottement poli à une rugosité moyenne de  $0,06\mu\text{m}$  (figure V.4) devient rugueux, et la rugosité moyenne varie de  $0,60\mu\text{m}$  à  $0,67\mu\text{m}$  (figure V.5).



Figure V.3 : Piste d'usure d'un disque.

Les états de surfaces des échantillons avant les essais sont polis à une rugosité moyenne  $0,06\mu\text{m}$  (figure V.4). Après tous les essais effectués sont devenus rugueux, la rugosité moyenne  $R_a$  varie entre  $0,60\mu\text{m}$  à  $0,67\mu\text{m}$  comme l'indique la figure V.5.

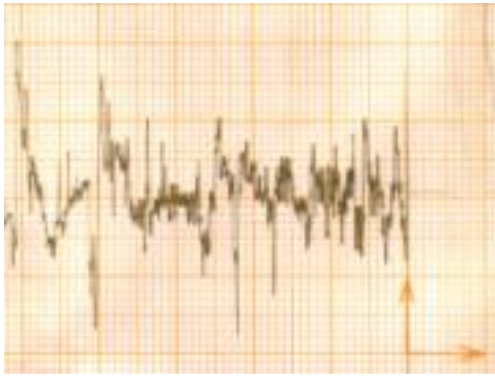


(a)

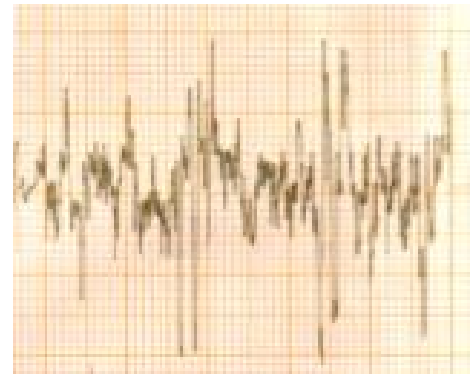
(b)

Figure V.4 : Enregistrement des profils de la rugosité avant les essais :(a) A60 ; (b) XC48.

$R_a = 0,06\mu\text{m}$ .



(a)

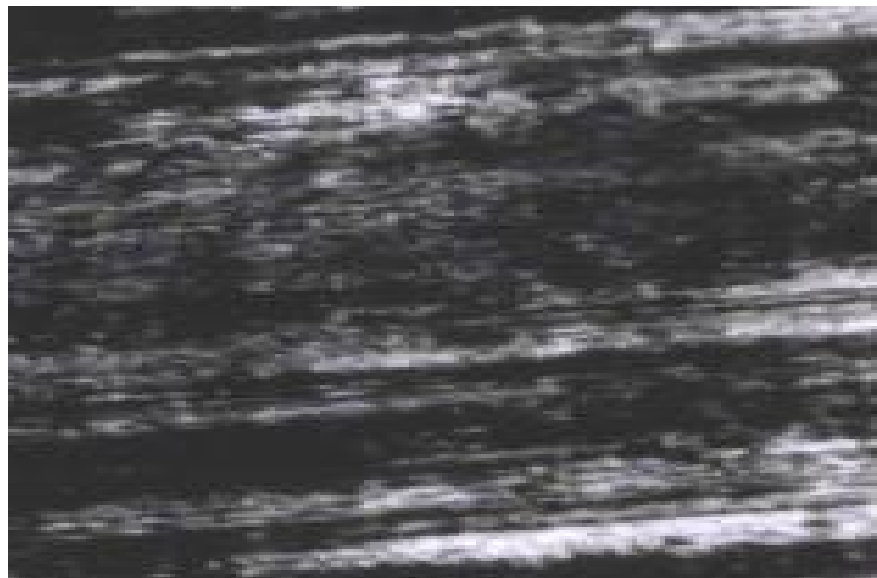


(b)

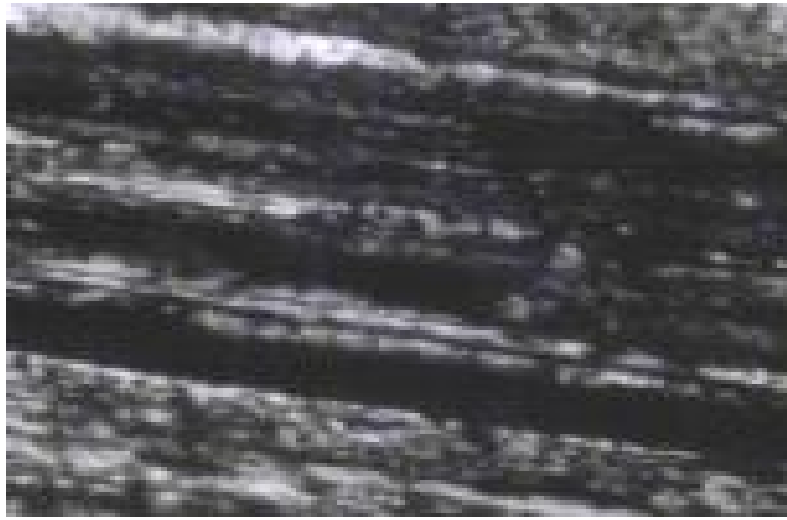
Figure V.5 : Enregistrement des profils de la rugosité après les essais : (a) A60 ; (b) XC48  
 $R_a = 0,60 - 0,67 \mu\text{m}$ .

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 non traité (figure V.6a) et l'acier A60 non traité (figure V.6b) par une couche d'oxyde noire qui s'adapte bien aux irrégularités des surfaces.



(a)



(b)

Figure V.6 : Vue microscopique (x100) de la face usée du pion : (a) XC48 non traité ; (b) A60 non traité dans les conditions expérimentales suivantes :  $N = 9$ [N] et  $V=0,32$  [m/s].

Les aciers A60 et XC48 traités ayant une dureté 38HRC paraissent avoir subi simultanément une usure adhésive et abrasive. La surface de frottement des échantillons étudiés est caractérisée par des rayures ou stries (endroits nus) dues à des déformations plastiques engendrées par les particules (grains) durs du troisième corps engendrées par rupture du film d'oxyde provenant de l'usure (figure V.7).

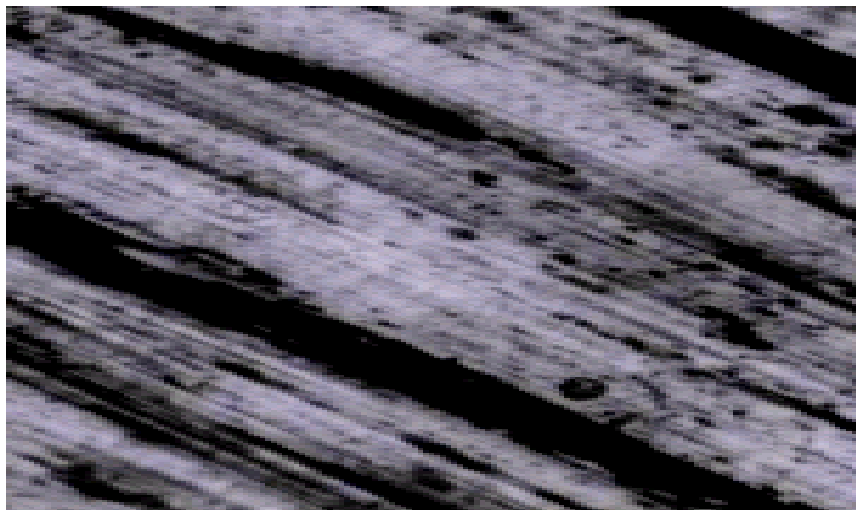


Figure V.7 : Aspect microscopique de la surface usée du pion en acier XC48, dans l'atmosphère ambiante (x100),  $N = 18$  [N] et  $V=0,32$  [m/s].

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.8). Généralement, on distingue deux types de grains :

## - Les grains passifs

Après leur arrachement des sites de formation, ils sont rapidement évacués de la piste de frottement et ne jouent pas de rôle important. Ils sont souvent composés de grosses particules.

## - Les grains actifs

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.

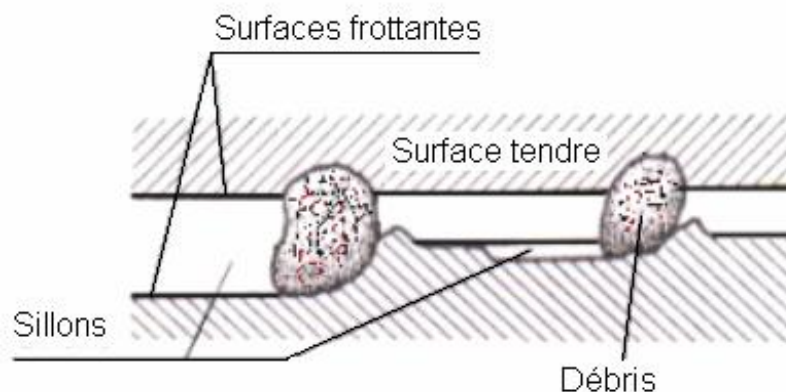


Figure V.8 : Rayage par les grains de la poudre d'usure.

Nous discutons dans ce chapitre les différents résultats relatifs aux essais tribologiques appliqués. Nous étudions et comparons les influences des paramètres d'essais, tels que la

force appliquée sur l'échantillon et la vitesse linéaire de glissement sur le coefficient de frottement  $\mu$  et sur la perte de masse  $\Delta m$  de deux échantillons A60 et XC48 qui représentent le pion.

Nous tenons aussi en compte l'analyse des résultats obtenus de la perte de masse du pion en fonction de la dureté et du temps et enfin nous discutons les conséquences du frottement et d'usure sur les surfaces des aciers à étudier.

## V- 2. Influence de la force appliquée sur le coefficient de frottement

La (figure V.1) et la (figure V.2) indiquent respectivement l'évolution du coefficient de frottement  $\mu$  en fonction de la force appliquée dans le cas des échantillons A60 et XC48 non traités sur l'acier XC55 traité. Les conditions d'essai de ces deux matériaux sont identiques.

Le frottement entre les matériaux antagonistes augmente rapidement au début d'essai pour diminuer ensuite jusqu'à une valeur presque stable. Le coefficient de frottement se stabilise d'autant plus rapidement que la force appliquée est élevée.

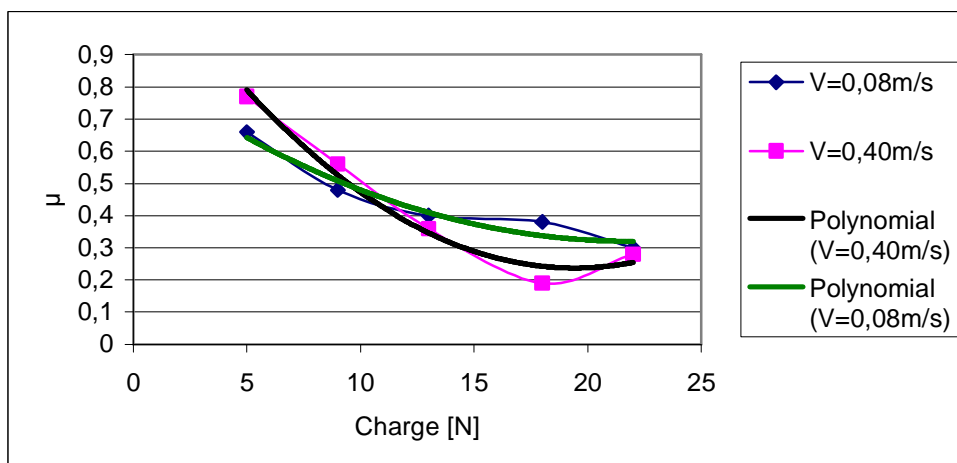
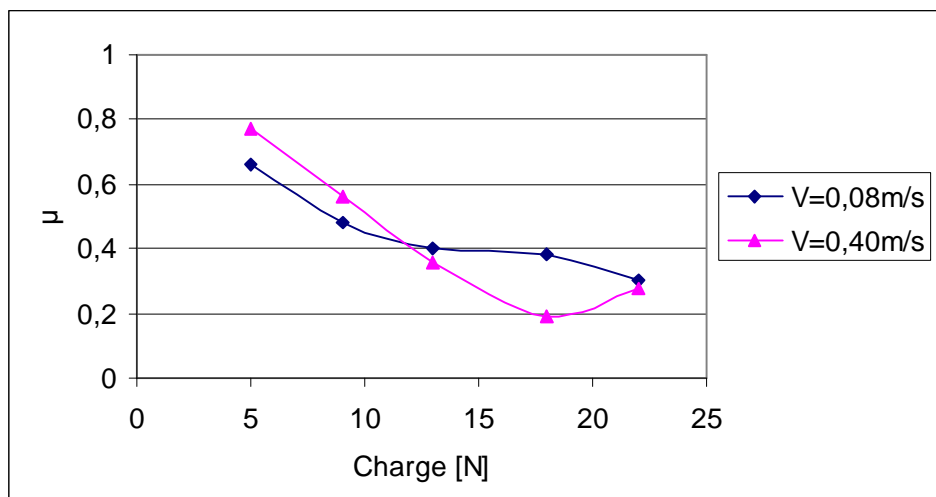


Figure V.1 : Evolution du coefficient de frottement entre l'acier A60 non traité et l'acier XC55 en fonction de la force appliquée.

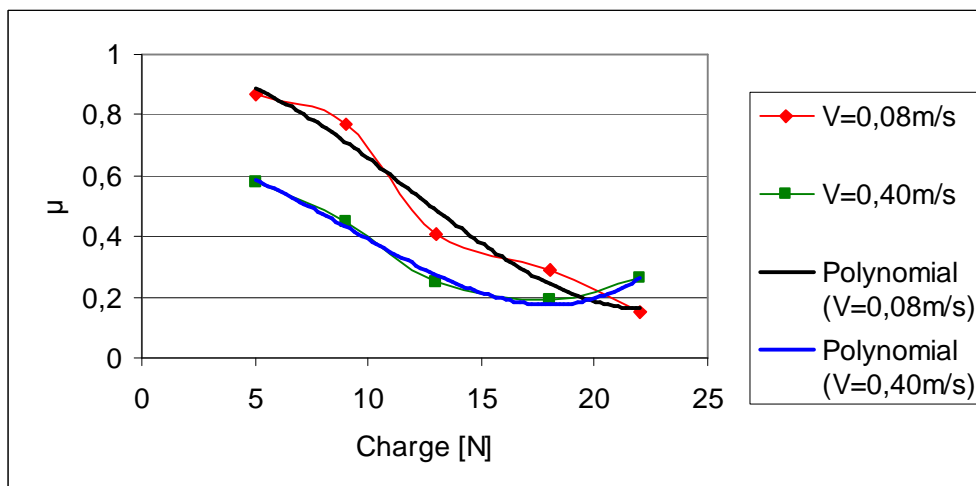
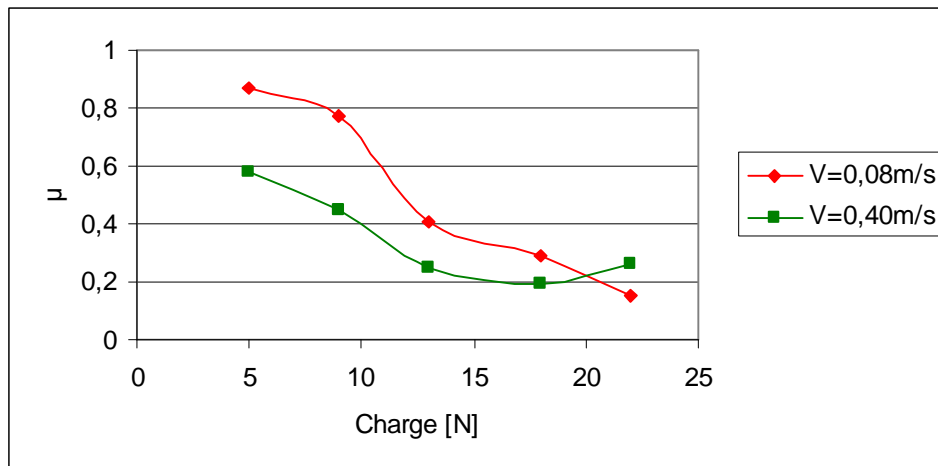


Figure V.2 : Evolution du coefficient de frottement entre l'acier XC48 non traité et l'acier XC55 en fonction de la force appliquée.

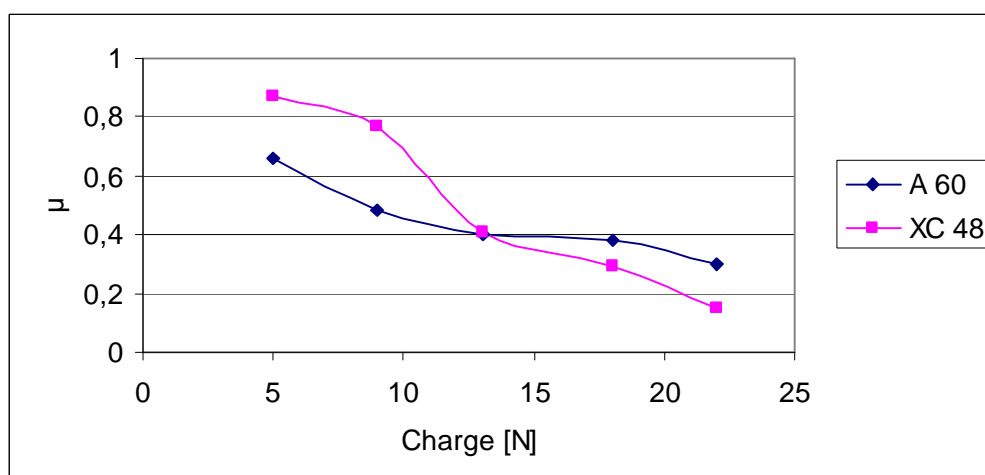


Figure ...: Evolution du coefficient de frottement entre l'acier A60 et XC48 non traités avec l'acier XC55 en fonction de la force appliquée à une vitesse de glissement  $V=0,08\text{ m/s}$ .

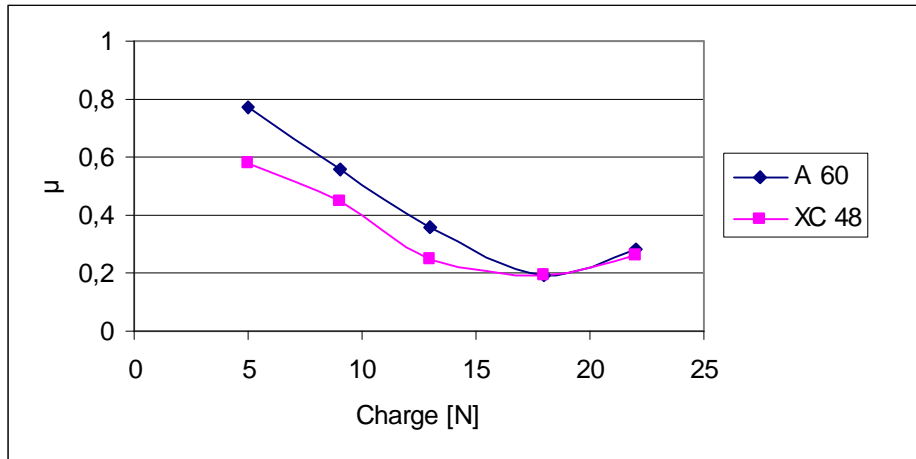
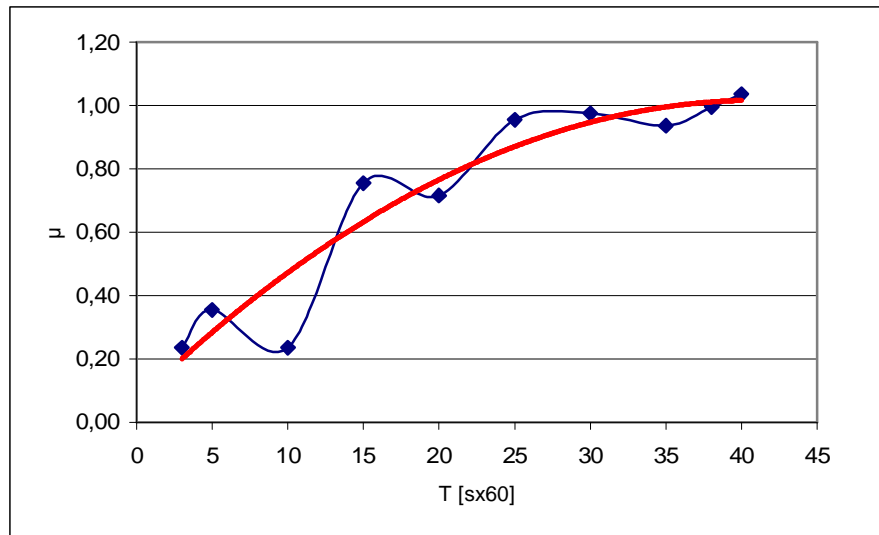


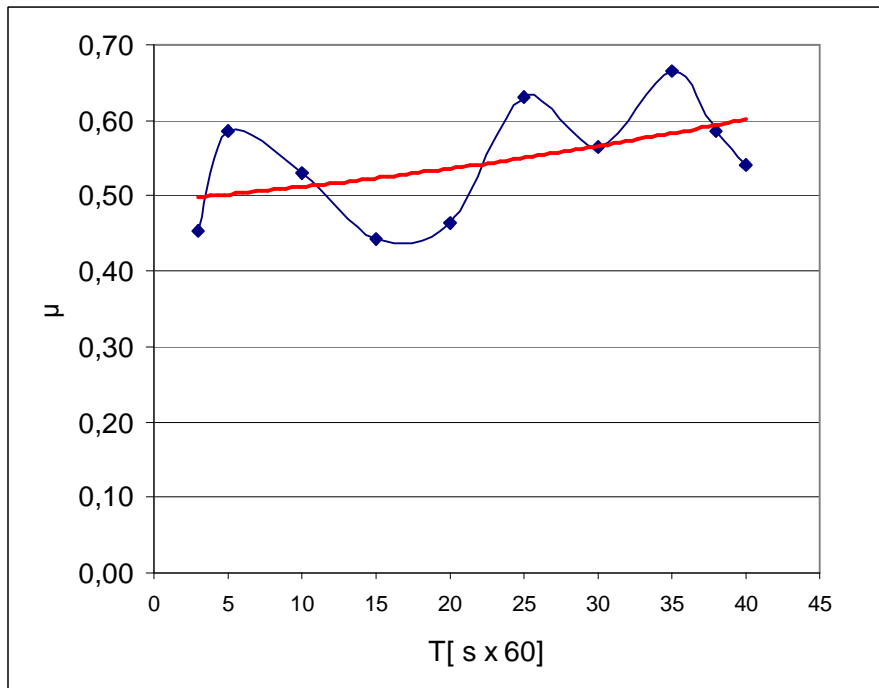
Figure ...: Evolution du coefficient de frottement entre l'acier A60 et XC48 non traités avec l'acier XC55 en fonction de la force appliquée à une vitesse de glissement  $V= 0,40$  m/s.

On peut dire qu'avec l'augmentation de la charge appliquée, le film d'oxyde qui joue un rôle critique dans le contact glissant est progressivement détruit, entraînant une augmentation du coefficient de frottement qui se stabilise à une valeur correspondant au contact métal-métal où les deux surfaces de contact se polissent et les débris d'usure sont enlevés ou assez profondément incrustés dans la surface tendre pour ne pas rayer la surface dure.

Les courbes illustrées dans les figures... sont des courbes des essais effectués à des petites forces appliquées : 5N et 9N. Elles présentent des variations rapides et de forte amplitude de  $\mu$ . Ces variations de  $\mu$  sont expliquées par le phénomène de broutage ou « Stick-Slip ». Autrement dit, le glissement intermittent est dû à une phase d'adhérence entre les surfaces (Stick), due au frottement statique plus élevé, suivie d'un rapide glissement (Slip), dû au frottement cinétique plus faible.

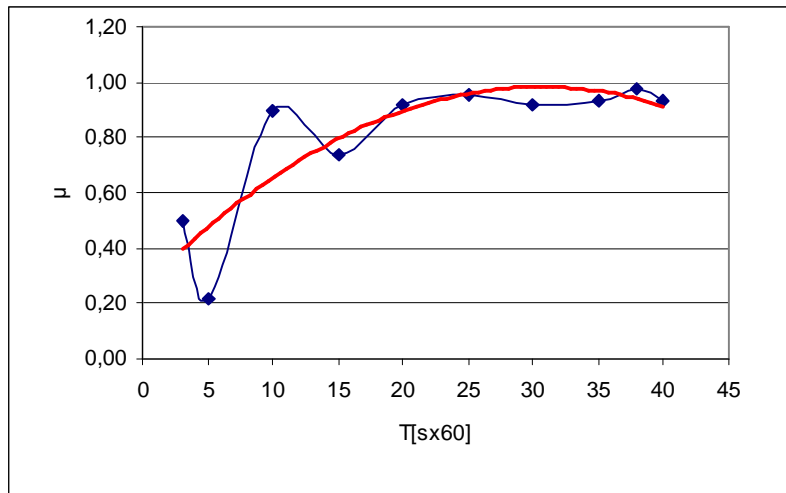


(a)

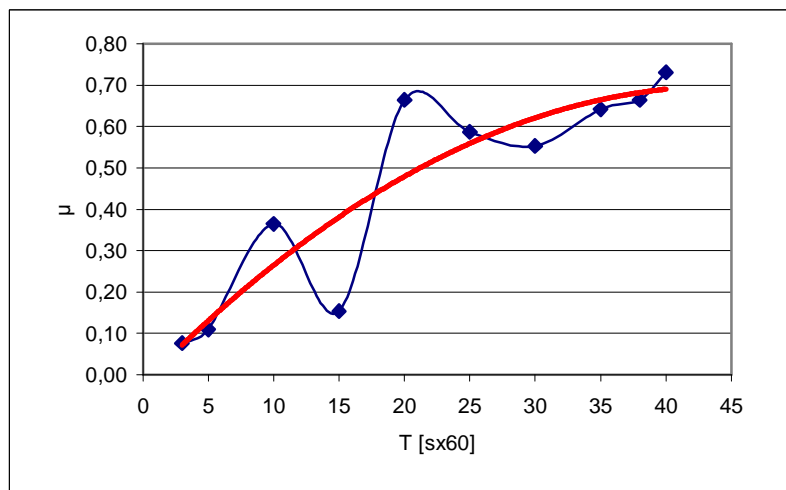


(b)

Figure ...: Evolution du coefficient de frottement entre l'acier A60 non traité et l'acier XC55 en fonction du temps : (a)  $N=5N$  ; (b)  $N=9N$ .



(a)



(b)

Figure ...: Evolution du coefficient de frottement entre l'acier XC48 non traité et l'acier XC55 en fonction du temps : (a)  $N = 5N$ ; (b)  $N = 9N$ .

### V- 3. Influence de la vitesse de glissement sur le coefficient de frottement

Nous considérons dans cette partie de l'étude les deux échantillons suivants :

- L'acier A60 non traité.
- L'acier XC48 non traité.

Ces échantillons sont testés en frottement dans les conditions identiques, la force appliquée est constante avec la variation de la vitesse linéaire de glissement de 0,08 m/s à 0,40 m/s.

Les coefficients de frottement de l'acier A60 non traité sur l'acier XC55 et l'acier XC48 non traité sur XC55 en fonction de la vitesse de glissement. Les courbes signifient que le

coefficient de frottement est élevé dans le domaine à faible vitesse. En effet, nous avons une augmentation de la surface réelle de contact au début par pénétration des aspérités d'une sur dans l'autre, ce qui conduit à une évacuation de la température dans la masse et la formation du film d'oxyde. Remarquons aussi que l'accroissement de la vitesse de glissement réduit le coefficient e frottement, cela veut dire que les interactions entre les surfaces des aciers en contact sont d'autant plus faible que la vitesse de glissement augmente.

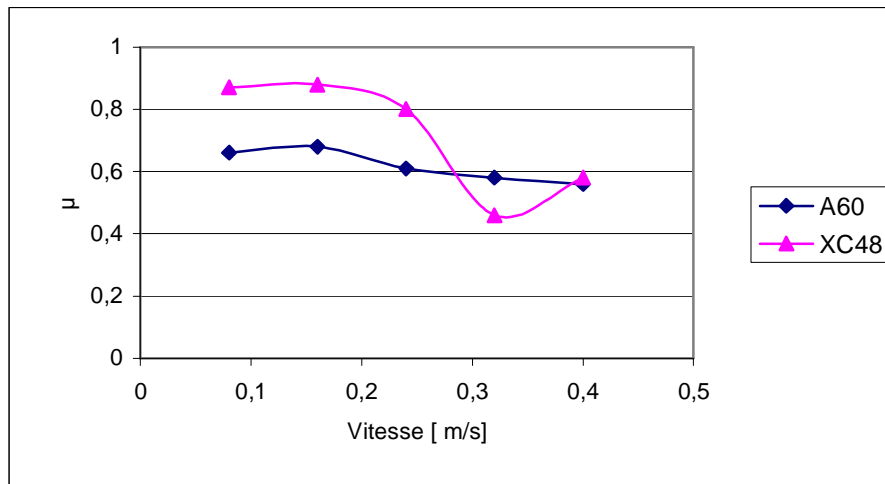


Figure ...: Evolution du coefficient de frottement entre l'aciers A60 et XC48 non traité avec l'acier XC55 en fonction de la vitesse de glissement ( $N = 5N$ ).

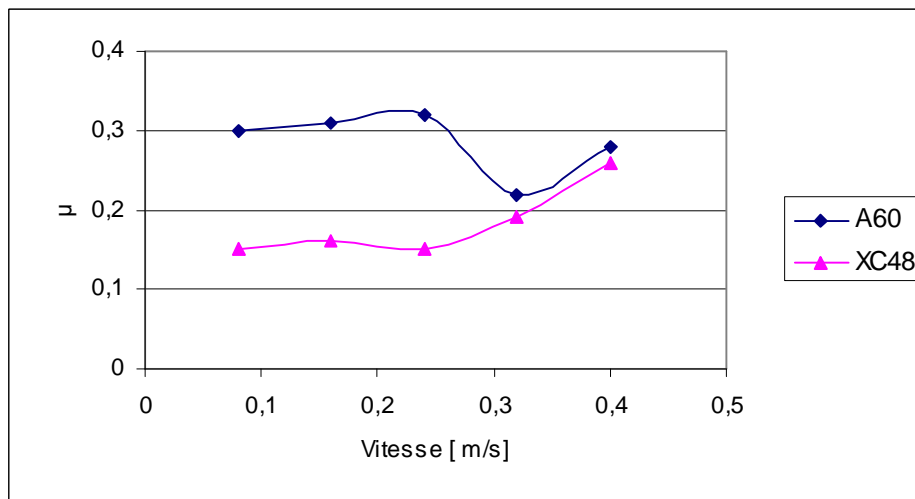


Figure ...: Evolution du coefficient de frottement entre l'aciers A60 et XC48 non traité avec l'acier XC55 en fonction de la vitesse de glissement ( $N = 22N$ ).

#### V- 4. Influence de la force appliquée sur la perte de masse

Les essais sont effectués sous diverses charges afin de quantifier l'usure pendant le frottement. Les charges appliquées sont 5N, 9N, 13N, 18N, 22N. Les autres paramètres d'essais sont identiques à ceux utilisés dans l'étude précédente.

La figure .. représente l'évolution de la perte de masse en fonction de la force appliquée des deux échantillons A60 et XC48 non traités dans les mêmes conditions d'essais. On remarque que pour les deux matériaux, la perte de masse est une fonction linéaire croissante avec la charge appliquée. Sous une faible charge (5N) les deux échantillons A60 et XC48 non traités montrent respectivement des pertes de masse assez faibles  $0,0065 \times 10^{-3}$  kg et  $0,0048 \times 10^{-3}$  kg. En revanche, leur perte est fortement accrue sous la charge 22N. La variation de la perte de masse augmente rapidement durant le début d'essai puis devient assez lente et petite à la fin. Dans la première partie de la courbe où la perte de masse est importante se traduit par un accroissement du nombre des points de contact avec la taille moyenne des particules abrasives. Quant à la deuxième partie de la courbe, à partir de la force 13N, la perte de masse est lente à cause de l'existence de particules d'usure qui diminuent l'efficacité des particules abrasives.

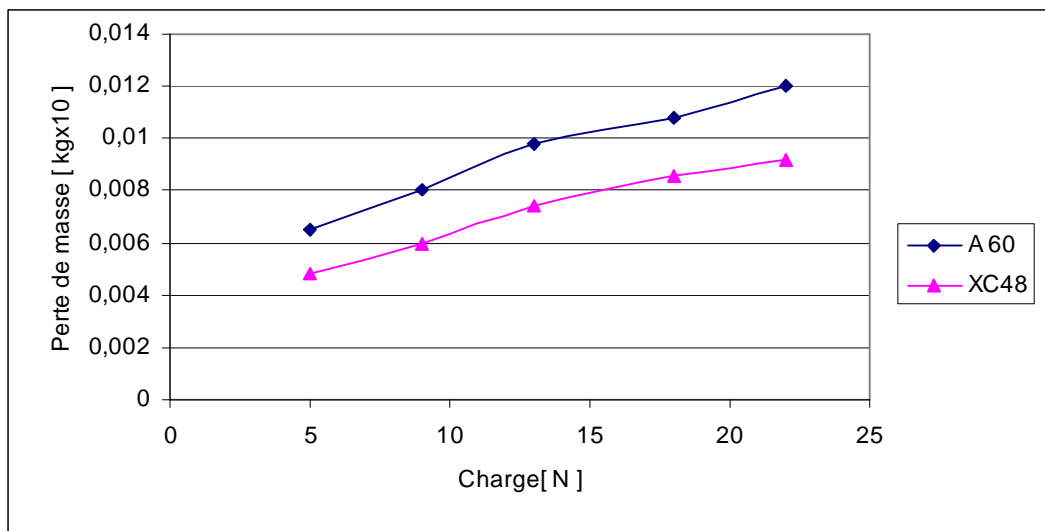


Figure : Variation de la perte de masse de l'acier A60 et XC48 non traités en fonction de la charge ( $V=0,08$  m/s).

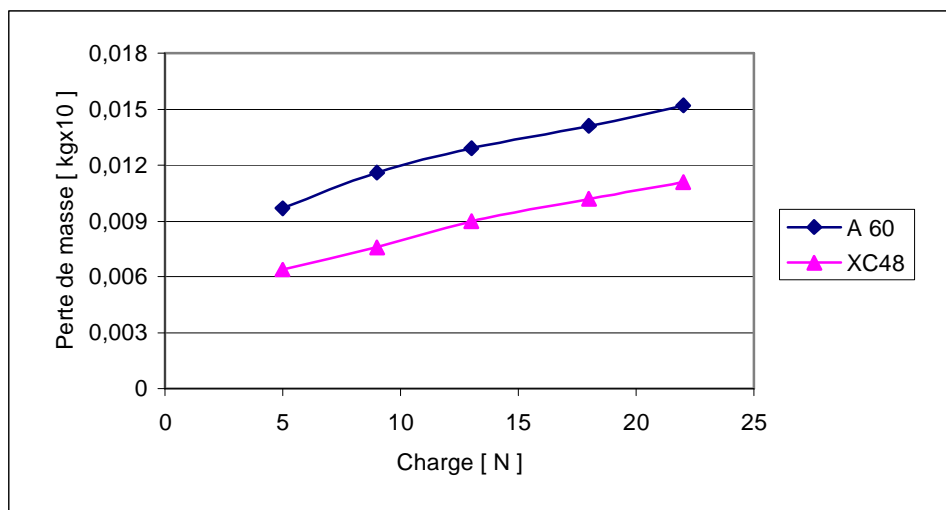


Figure : Variation de la perte de masse de l'acier A60 et XC48 non traités en fonction de la charge ( $V=0,40$  m/s).

### V- 5. Influence de la vitesse linéaire de glissement sur la perte de masse

La variation de la perte de masse en fonction de la vitesse linéaire de glissement est rapportée aux figures ... Avant d'étudier les courbes, il faut noter que pour ces tests, nous avons gardé la force appliquée et en variant la vitesse linéaire de glissement à partir de la valeur 0,08 m/s jusqu'à 0,40 m/s.

Dans toutes les courbes, nous avons constaté qu'il existe deux zones différentes, une zone I où la perte de masse varie d'une manière décroissante avec la vitesse linéaire de glissement qui varie de 0,08 m/s jusqu'à 0,16 m/s et une autre zone II caractérisée par l'augmentation légère de la perte de masse lorsque cette vitesse augmente de 0,16 m/s à 0,40 m/s.

De plus, le couple A60 / XC55 montre généralement une perte de masse élevée comparée au couple XC48 / XC55.

La meilleure résistance à l'usure est représentée par l'acier XC48 à cause de l'augmentation du pourcentage des éléments d'addition dans sa composition chimique tels que le manganèse, le silicium qui jouent un grand rôle dans la détermination de la dureté et la ténacité de l'acier, sans oublier au premier lieu la quantité de carbone.

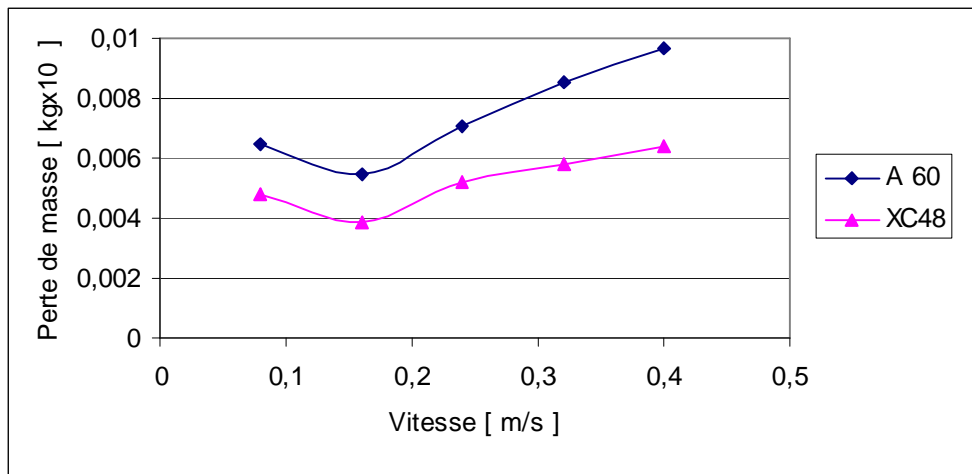


Figure : Variation de la perte de masse de A60 et XC48 non traités en fonction de la vitesse linéaire de glissement ( $N = 5N$ ).

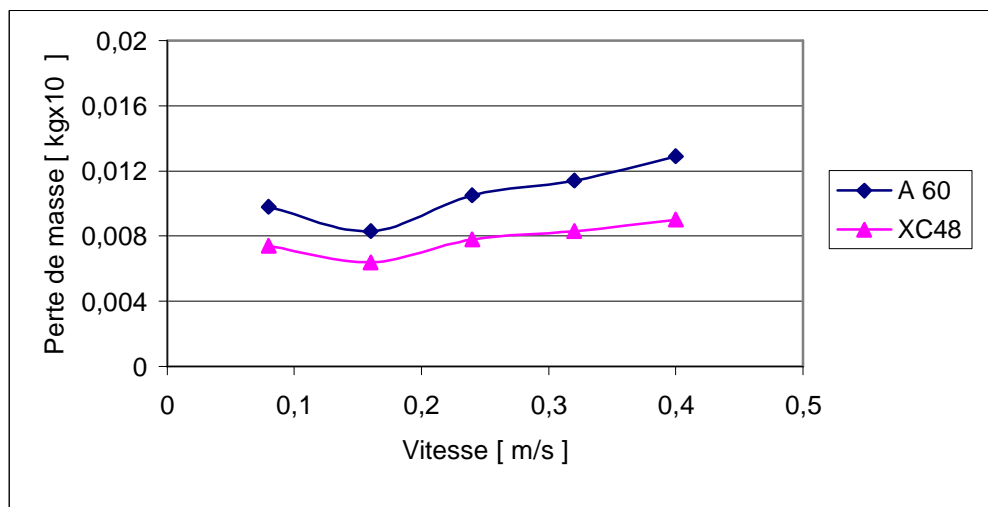


Figure : Variation de la perte de masse de A60 et XC48 non traités en fonction de la vitesse linéaire de glissement ( $N = 13N$ ).

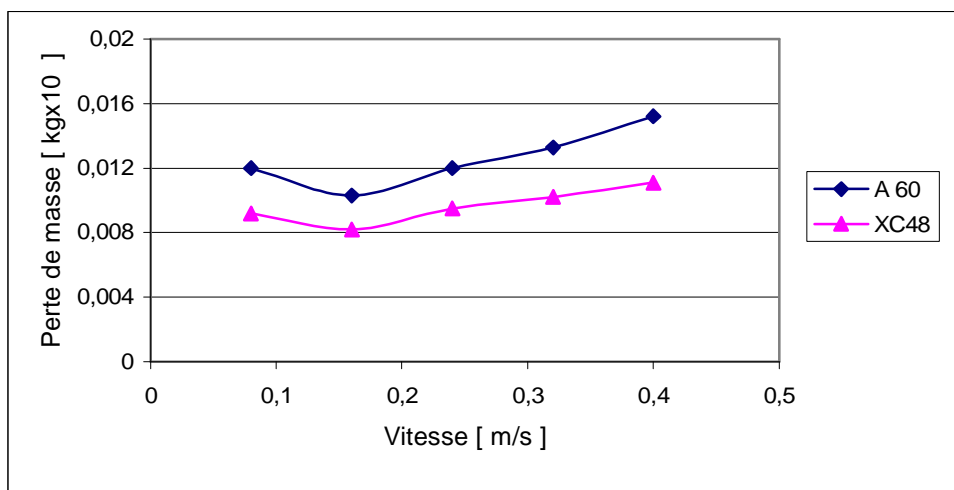


Figure : Variation de la perte de masse de A60 et XC48 non traités en fonction de la vitesse linéaire de glissement ( $N = 22N$ ).

### V- 5.1. Caractéristiques de la zone I

D'après les figures. nous observons au début du frottement, à des petites vitesses glissement 0,08 m/s que la perte de masse est importante. Cette importance due à l'état de surface de l'échantillon qui est rugueux et peut produire pendant le frottement des points chauds, ce qui accroît la réactivité des surfaces, des produits d'usure et donne de l'importance à toutes les réactions d'oxydation qui peuvent se produire au cours des glissements.

Après la période de rodage à la vitesse 0,16 m/s, la perte de masse diminue pour la même période du temps que la vitesse 0,08 m/s.

### V- 5.2. Caractéristiques de la zone II

Lorsqu'on augmente la vitesse, la perte de masse augmente aussi, cette augmentation de perte est à l'origine d'une baisse des propriétés mécaniques sous l'effet de l'échauffement et la destruction du film d'oxyde.

### V- 6. Influence de la dureté sur la perte de masse

L'étude de l'effet de la variation de la dureté sur la perte de masse nécessite la fixation de la force normale appliquée et la vitesse linéaire de glissement. Nous avons donc fixé la force  $N$  à 13N et la vitesse  $V$  à 0,24 m/s.

Pour les couples d'aciers étudiés A60/XC55 et XC48/XC55, les duretés utilisées sont illustrées dans le tableau... pour A60 et le tableau..pour XC48, avec le maintien de la dureté

de l'acier XC55 à HRC45, de plus nous avons gardé les mêmes propriétés de l'état de surface pour tous les matériaux à tester ( $R_a = 0,06 \mu\text{m}$ ).

La figure.. indique que le couple XC48/XC55 présente la résistance à l'usure la plus élevée que le couple A60/XC55.

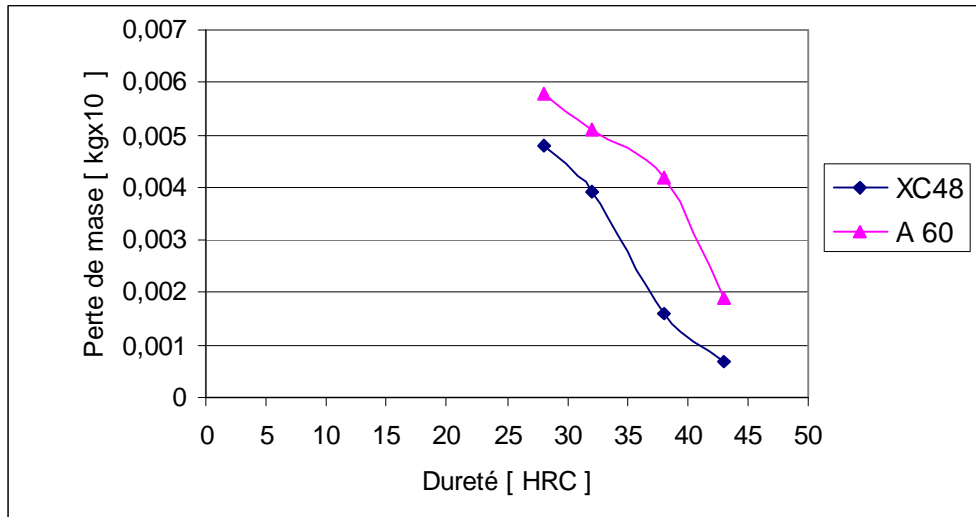


Figure.. : Evolution de la perte de masse de A60 et XC48 en fonction de la dureté.

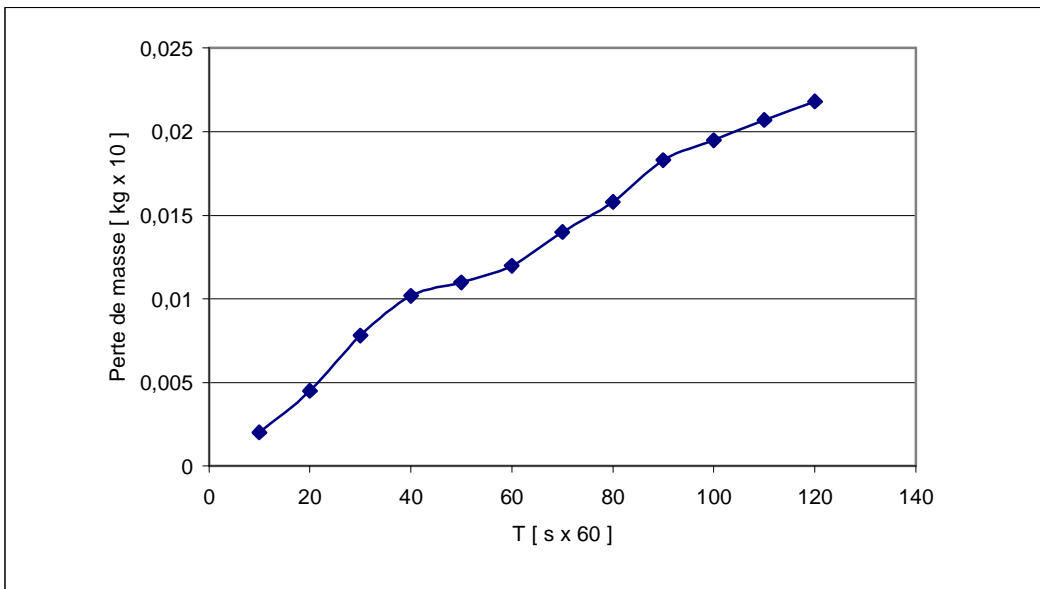
L'augmentation de la résistance à l'usure avec l'augmentation de la dureté est basée sur la microstructure des aciers. Les structures martensitiques obtenues après traitement thermique (trempe et revenu) des aciers à tester montrent que, plus les grains de l'acier sont fins plus la dureté est augmentée, et par conséquent, l'acier devient résistant à l'usure.

### V-7. Influence du temps sur la perte de masse

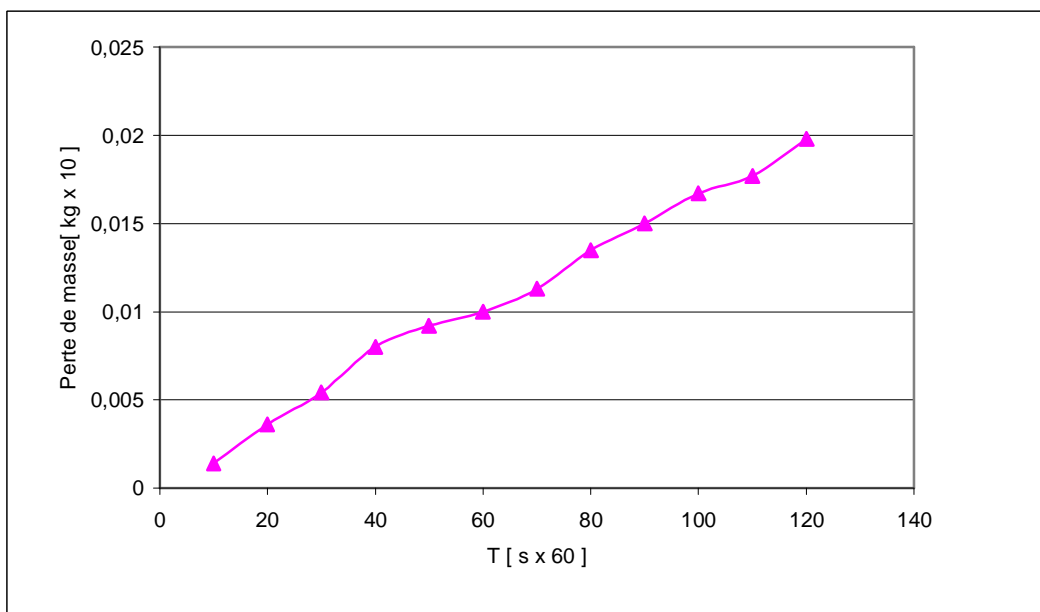
Il faut noter tout d'abord que pour ces tests, nous avons maintenu la force appliquée à une valeur moyenne soit 13N et la vitesse de glissement à une valeur 0,24 m/s.

Nous constatons que toutes les courbes (figure ) qui représentent la variation de la perte de masse en fonction du temps ont des allures identiques. La matière enlevée de A60 et XC48 non traité est assez élevée que si ces aciers sont traités.

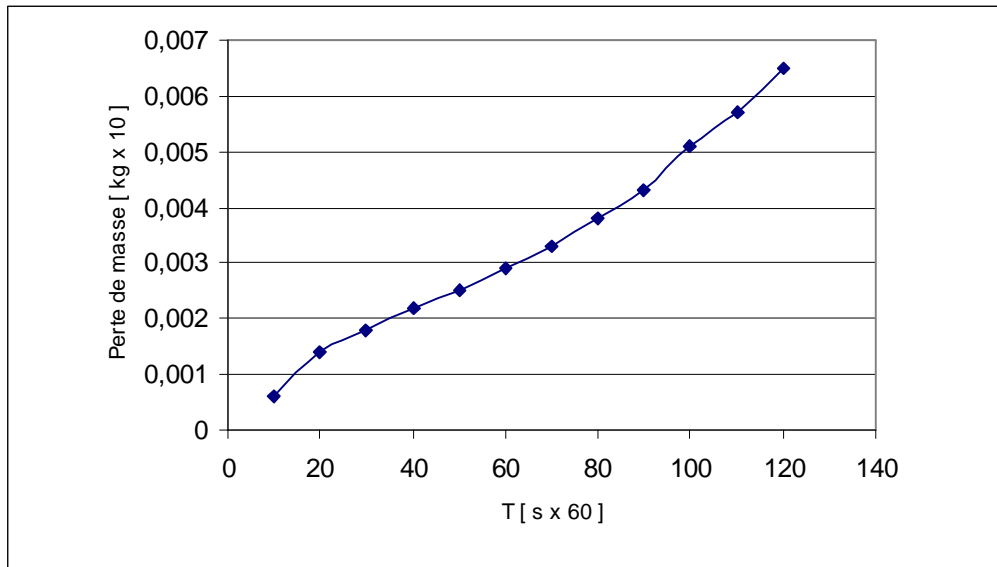
On distingue que chaque courbe contient trois parties, la première se caractérise par une croissance rapide de la perte de masse, que l'on appelle rodage. Dans la deuxième partie la perte est stationnaire caractérisée par une croissance lente est petite. Quant à la troisième partie, la perte reprend son accroissement initial.



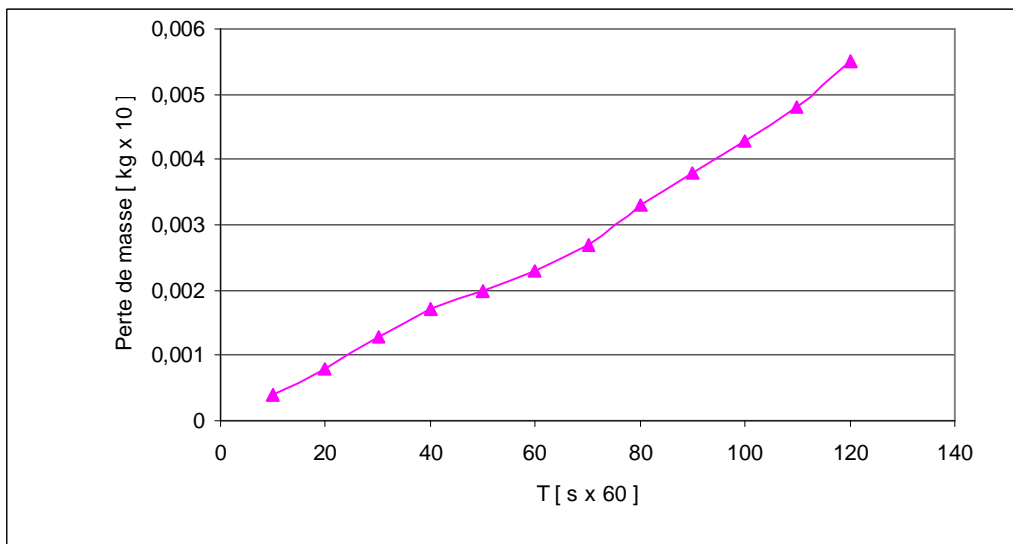
(a)



(b)



(c)



(d)

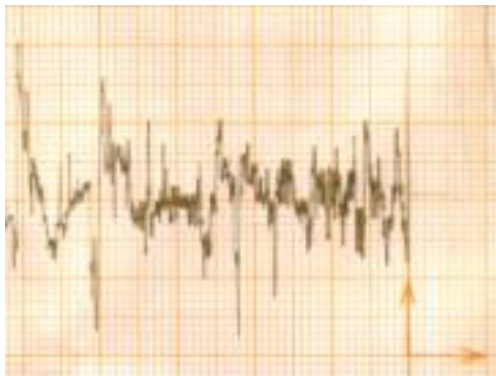
Figure.. : Evolution de la perte de masse en fonction du temps : (a) A60 non traité ; (b) XC48 non traité ; (c) A60 traité HRC38 ; (d) XC48 traité HRC38.

Pendant le rodage, au début de glissement, les états de surface du couple se modifie rapidement. Les aspérités les plus hautes d'une surface rugueuse en état de déformation plastique sont écrasées et en partie arrachées. Après le rodage, les surfaces deviennent presque polies et présentent des petites ondulations ce qui justifie la croissance lente et stationnaire de la perte de masse. En revanche, une surface très lisse voit sa rugosité

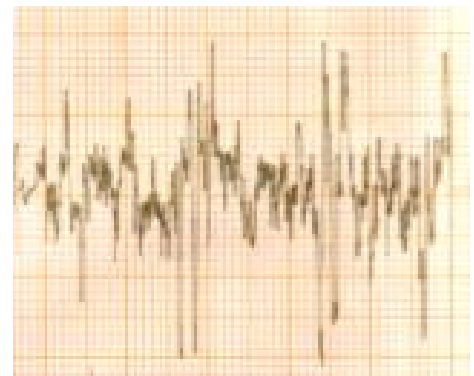
augmenter du fait du labourage par les aspérités de la surface opposée, ce qui va par conséquent accroître de nouveau la perte de masse.

#### V- 8. Conséquences du frottement et usure sur les surfaces des aciers à étudier

Les états de surfaces des échantillons après les essais sont devenus rugueux, la rugosité moyenne  $R_a$  varie entre  $0,60\mu$  à  $0,67\mu$  comme indique la (figure..).



(a)



(b)

Figure III.11 : Enregistrement des profils de la rugosité :(a) A60 traité ; (b) XC48 traité.

Les caractéristiques des endommagements observées sur le faciès d'usure du pion et sur la piste de frottement du disque suggèrent que. Dans la majorité des cas, l'usure s'effectue simultanément par adhésion et abrasion.

L'examen du faciès du pion de l'acier XC48 non traité sous une charge de 9N et une vitesse linéaire de glissement  $0,32$  m/s révèle une adhérence importante du troisième corps généré par l'usure adhésive de cet acier (figure..)

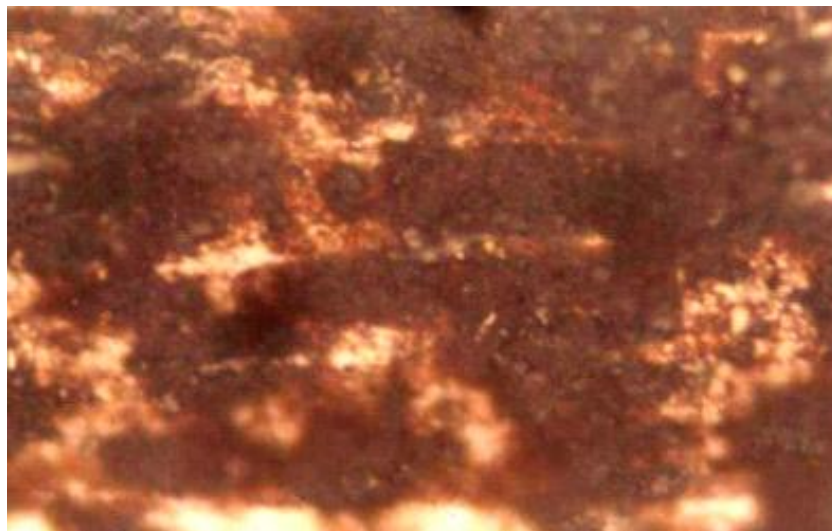


Figure . : Faciès d'usure du pion XC48 non traité à la charge normale  $N = 9\text{N}$  et la vitesse de glissement  $V=0,32\text{ m/s}$ .

Le faciès du même échantillon à la même vitesse de glissement et à une charge normale  $N = 18\text{N}$  paraît avoir subi une usure adhésive et abrasive (figure ).

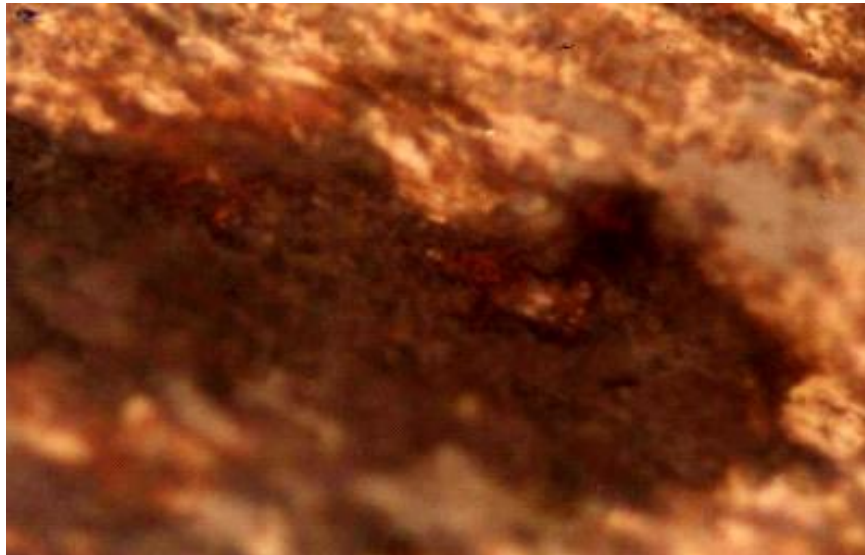
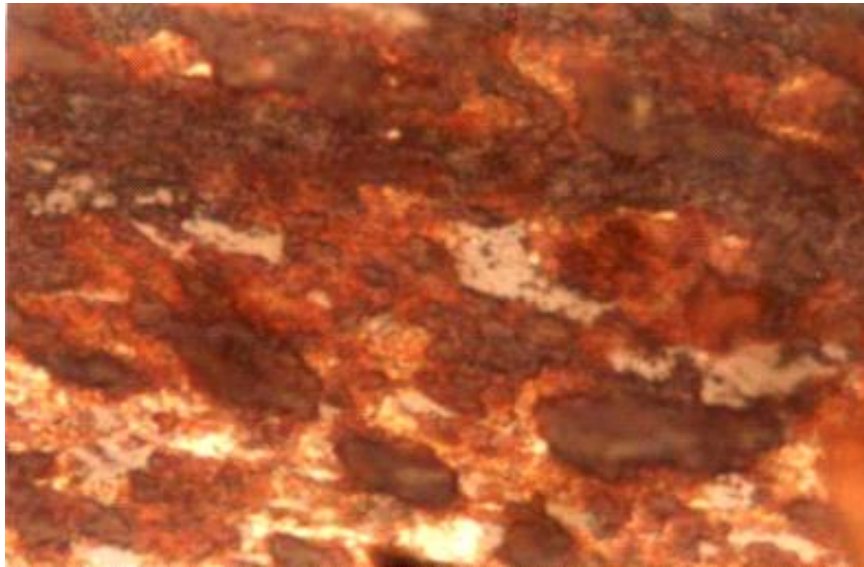


Figure . : Faciès d'usure de l'acier XC48 non traité à la charge normale  $N = 18\text{N}$  et la vitesse de glissement  $V=0,32\text{ m/s}$ .

Sous l'effet de la dureté, les échantillon A60 et XC48 traités ayant une dureté HRC38 paraissent avoir subi simultanément une usure adhésive et abrasive. La surface de frottement des échantillons étudiés est caractérisée par des rayures ou stries causées par les particules dures du troisième corps comme indique la (figure ).



(a)



(b)

Figure . : Surface d'usure du pion à 38 HRC correspondant à la charge normale  $N = 18\text{N}$  et la vitesse de glissement  $V=0,32\text{ m/s}$  : (a) A60 ; (b) XC48.

### Annexe I

A60 non traité	Charge normale appliquée [N]				
	5	9	13	18	22

Vitesse linéaire du glissement [m/s]	0,080	0,0065	0,0080	0,0098	0,0108	0,0120
	0,160	0,0055	0,0069	0,0083	0,0097	0,0103
	0,240	0,0071	0,0086	0,0105	0,0118	0,0120
	0,320	0,0085	0,0098	0,0114	0,0131	0,0138
	0,400	0,0097	0,0116	0,0129	0,0141	0,0152

Tableau VI.1 : Evolution de l'usure exprimée en [ $10^{-3}$  kg] du pion en acier A60 non traité en fonction de la charge normale et la vitesse de glissement.

XC48 non traité		Charge normale appliquée [N]				
		5	9	13	18	22
Vitesse linéaire du glissement [m/s]	0,080	0,0048	0,0060	0,0074	0,0086	0,0092
	0,160	0,0039	0,0050	0,0064	0,0077	0,0082
	0,240	0,0052	0,0062	0,0078	0,0089	0,0095
	0,320	0,0058	0,0070	0,0083	0,0094	0,0102
	0,400	0,0064	0,0076	0,0090	0,0102	0,0111

Tableau VI.2 : Evolution de l'usure exprimée en [ $10^{-3}$  kg] du pion en acier XC48 non traité en fonction de la charge normale et la vitesse de glissement.

Couple d'aciers pion / disque	Vitesse linéaire du glissement [m/s]	Charge normale appliquée [N]	Dureté du pion [HRC]	Usure [ $10^{-3}$ kg]
A60 / XC55	0,240	13	23	0,0058
A60 / XC55	0,240	13	28	0,0051
A60 / XC55	0,240	13	33	0,0042
A60 / XC55	0,240	13	38	0,0019

Tableau VI.3 : Variation de l'usure du pion en acier A60 en fonction de la dureté.

Couple d'aciers pion / disque	Vitesse linéaire du glissement [m/s]	Charge normale appliquée [N]	Dureté du pion [HRC]	Usure [ $10^{-3}$ kg]
XC48 / XC55	0,240	13	28	0,0048

XC48 / XC55	0,240	13	32	0,0039
XC48 / XC55	0,240	13	38	0,0016
XC48 / XC55	0,240	13	43	0,0007

Tableau VI.4 : Variation de l'usure du pion en acier XC48 en fonction de la dureté.

Couple d'aciers pion / disque	Vitesse linéaire du glissement [m/s]	Charge normale appliquée [N]	Temps [sx60]	Usure [10 <sup>-3</sup> kg]
A60 / XC55	0,240	13	10	0,0020
A60 / XC55	0,240	13	20	0,0045
A60 / XC55	0,240	13	30	0,0078
A60 / XC55	0,240	13	40	0,0102
A60 / XC55	0,240	13	50	0,0116
A60 / XC55	0,240	13	60	0,0128
A60 / XC55	0,240	13	70	0,0144
A60 / XC55	0,240	13	80	0,0162
A60 / XC55	0,240	13	90	0,0183
A60 / XC55	0,240	13	100	0,0195
A60 / XC55	0,240	13	110	0,0207
A60 / XC55	0,240	13	120	0,0218

Tableau VI.5 : évolution de l'usure du pion A60 non traité en fonction du temps.

Couple d'aciers pion / disque	Vitesse linéaire du glissement [m/s]	Charge normale appliquée [N]	Temps [sx60]	Usure [10 <sup>-3</sup> kg]
XC48 / XC55	0,240	13	10	0,0014
XC48 / XC55	0,240	13	20	0,0036
XC48 / XC55	0,240	13	30	0,0054

XC48 / XC55	0,240	13	40	0,0080
XC48 / XC55	0,240	13	50	0,0092
XC48 / XC55	0,240	13	60	0,0109
XC48 / XC55	0,240	13	70	0,0123
XC48 / XC55	0,240	13	80	0,0140
XC48 / XC55	0,240	13	90	0,0160
XC48 / XC55	0,240	13	100	0,0178
XC48 / XC55	0,240	13	110	0,0191
XC48 / XC55	0,240	13	120	0,0198

Tableau VI.6 : évolution de l'usure du pion XC48 non traité en fonction du temps.

Couple d'aciers pion / disque	Vitesse linéaire du glissement [m/s]	Charge normale appliquée [N]	Temps [sx60]	Dureté [HRC]	Usure [10 <sup>-3</sup> kg]
A60 / XC55	0,240	13	10	38	0,0006
A60 / XC55	0,240	13	20	38	0,0014
A60 / XC55	0,240	13	30	38	0,0018
A60 / XC55	0,240	13	40	38	0,0022
A60 / XC55	0,240	13	50	38	0,0028
A60 / XC55	0,240	13	60	38	0,0034
A60 / XC55	0,240	13	70	38	0,0040
A60 / XC55	0,240	13	80	38	0,0043
A60 / XC55	0,240	13	90	38	0,0048
A60 / XC55	0,240	13	100	38	0,0053
A60 / XC55	0,240	13	110	38	0,0057
A60 / XC55	0,240	13	120	38	0,0060

Tableau VI.7 : évolution de l'usure du pion A60 traité en fonction du temps.

Couple d'aciers pion / disque	Vitesse linéaire du glissement [m/s]	Charge normale appliquée [N]	Temps [sx60]	Dureté [HRC]	Usure [10 <sup>-3</sup> kg]
XC48 / XC55	0,240	13	10	38	0,0004
XC48 / XC55	0,240	13	20	38	0,0008
XC48 / XC55	0,240	13	30	38	0,0013
XC48 / XC55	0,240	13	40	38	0,0017

XC48 / XC55	0,240	13	50	38	0,0020
XC48 / XC55	0,240	13	60	38	0,0026
XC48 / XC55	0,240	13	70	38	0,0029
XC48 / XC55	0,240	13	80	38	0,0035
XC48 / XC55	0,240	13	90	38	0,0039
XC48 / XC55	0,240	13	100	38	0,0043
XC48 / XC55	0,240	13	110	38	0,0048
XC48 / XC55	0,240	13	120	38	0,0053

Tableau VI.8 : évolution de l'usure du pion XC48 traité en fonction du temps.

Couple d'aciers pion / disque	Vitesse linéaire du glissement [m/s]	Charge normale appliquée [N]	Dureté du pion [HRC]	$\Delta m$ [kgx10 <sup>-3</sup> ]
----------------------------------	---	---------------------------------	-------------------------	-----------------------------------

XC48 / XC55	0,240	13	28	0,0048
XC48 / XC55	0,240	13	32	0,0039
XC48 / XC55	0,240	13	38	0,0016
XC48 / XC55	0,240	13	43	0,0007

Tableau VI.4 : Perte de masse  $\Delta m$  du pion XC48 en fonction de la dureté.

Couple d'aciers pion / disque	Vitesse linéaire du glissement [m/s]	Charge normale appliquée [N]	Temps [sx60]	Perte de masse [kgx10 <sup>-3</sup> ]
A60 / XC55	0,240	13	10	0,0020
A60 / XC55	0,240	13	20	0,0045
A60 / XC55	0,240	13	30	0,0078
A60 / XC55	0,240	13	40	0,0102
A60 / XC55	0,240	13	50	0,0116
A60 / XC55	0,240	13	60	0,0128
A60 / XC55	0,240	13	70	0,0144
A60 / XC55	0,240	13	80	0,0162
A60 / XC55	0,240	13	90	0,0183
A60 / XC55	0,240	13	100	0,0195
A60 / XC55	0,240	13	110	0,0207
A60 / XC55	0,240	13	120	0,0218

Tableau VI.5 : Perte de masse du pion A60 non traité en fonction du temps.

Couple d'aciers pion / disque	Vitesse linéaire du glissement [m/s]	Charge normale appliquée [N]	Temps [sx60]	Perte de masse [kgx10 <sup>-3</sup> ]
XC48 / XC55	0,240	13	10	0,0014
XC48 / XC55	0,240	13	20	0,0036
XC48 / XC55	0,240	13	30	0,0054
XC48 / XC55	0,240	13	40	0,0080

XC48 / XC55	0,240	13	50	0,0092
XC48 / XC55	0,240	13	60	0,0109
XC48 / XC55	0,240	13	70	0,0123
XC48 / XC55	0,240	13	80	0,0140
XC48 / XC55	0,240	13	90	0,0160
XC48 / XC55	0,240	13	100	0,0178
XC48 / XC55	0,240	13	110	0,0191
XC48 / XC55	0,240	13	120	0,0198

Tableau VI.6 : Perte de masse du pion XC48 non traité en fonction du temps.

Couple d'aciers pion / disque	Vitesse linéaire du glissement [m/s]	Charge normale appliquée [N]	Temps [sx60]	Dureté HRC	Perte de masse [kgx10 <sup>-3</sup> ]
A60 / XC55	0,240	13	10	38	0,0006
A60 / XC55	0,240	13	20	38	0,0014
A60 / XC55	0,240	13	30	38	0,0018
A60 / XC55	0,240	13	40	38	0,0022
A60 / XC55	0,240	13	50	38	0,0028
A60 / XC55	0,240	13	60	38	0,0034
A60 / XC55	0,240	13	70	38	0,0040
A60 / XC55	0,240	13	80	38	0,0043
A60 / XC55	0,240	13	90	38	0,0048
A60 / XC55	0,240	13	100	38	0,0053
A60 / XC55	0,240	13	110	38	0,0057
A60 / XC55	0,240	13	120	38	0,0060

Tableau VI.7 : Perte de masse du pion A60 traité en fonction du temps.

Couple d'aciers pion / disque	Vitesse linéaire du glissement [m/s]	Charge normale appliquée [N]	Temps [sx60]	Dureté HRC	Perte de masse [kgx10 <sup>-3</sup> ]
XC48 / XC55	0,240	13	10	38	0,0004
XC48 / XC55	0,240	13	20	38	0,0008
XC48 / XC55	0,240	13	30	38	0,0013
XC48 / XC55	0,240	13	40	38	0,0017
XC48 / XC55	0,240	13	50	38	0,0020

XC48 / XC55	0,240	13	60	38	0,0026
XC48 / XC55	0,240	13	70	38	0,0029
XC48 / XC55	0,240	13	80	38	0,0035
XC48 / XC55	0,240	13	90	38	0,0039
XC48 / XC55	0,240	13	100	38	0,0043
XC48 / XC55	0,240	13	110	38	0,0048
XC48 / XC55	0,240	13	120	38	0,0053

Tableau VI.8 : Perte de masse du pion XC48 traité en fonction du temps.

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est principalement de nature expérimentale, il a permis de donner des réponses à certaines questions relatives au frottement et à l'usure d'un pion en acier A60 ou XC48 frottant contre un disque en acier XC55. On a essayé de mettre en évidence des phénomènes tribologiques.

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. Les surfaces exposées à l'air ambiant sont toujours souillées par des gaz adsorbés, ou/et chimisorbés des particules d'oxydes et des débris d'usure qui forment le corps intermédiaire. Le cisaillement de cette couche est à l'origine de la plus grande partie de l'usure.

En général, la force de frottement est proportionnelle à la charge normale appliquée. Le coefficient de frottement est assez grand au démarrage du mouvement, il diminue puis il se stabilise à cause de la réduction du nombre de jonctions métalliques et la diminution de l'aire d'adhésion par l'effet de l'oxyde de fer qui joue le rôle d'un lubrifiant solide.

L'usure est la conséquence du frottement, engendré par l'enlèvement progressive à la surface des pièces frottantes l'une sur l'autre. Elle est généralement de type adhésive douce tant que des débris d'oxydes de haute dureté n'apparaissent pas dans l'interface.

La formation des grains abrasifs labourent les surfaces et augmentent considérablement l'usure du pion.

La vitesse d'usure croît proportionnellement à la charge normale, à la vitesse de glissement et inversement proportionnelle à la dureté.

L'usure est relativement rapide au début du frottement pendant le rodage, puis il diminue et reste normalement assez faible avant de croître de nouveau.

Les dimensions des zones de contact réelles ont été évaluées par des méthodes de calcul qui conduisent à des aires de contact dont le rayon est fonction de la dureté du matériau le plus tendre et le taux de recouvrement des surfaces en oxydes.

On a évalué l'élévation de température à l'interface dans les zones de contact en fonction des conditions expérimentales ce qui permet de mieux comprendre le rôle du comportement plastique de ces zones.

Pour diminuer l'usure et éviter que possible le processus d'oxydation et par conséquent prolonger la durée de fonctionnement du galet, 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.

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 que nous espérons significative à une étude très complexe et dont la compréhension totale du mécanisme mis en jeu et leur influence quantitative ne sont probablement pas du domaine du proche futur.

Enfin, on constate que l'acier XC48 est le plus apte et le mieux adapté aux différentes conditions de fonctionnement des galets. Son traitement thermique améliore d'avantage sa résistance à l'usure et augmente la durée de vie du couple.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] JEAN-MARIE GEORGE  
"Frottement, usure et lubrification".  
Eyrolles, 2000.
- [2] GODET, M.  
"Les fondements mécaniques de la tribologie".  
In : Mécanique Matériaux Électricité, 1972.
- [3] Site Internet  
Élément de tribologie (<http://www.cours.polymtl.ca>).
- [4] José Castillo  
"Dynamic changes of surface films under boundary lubrication : A study using Ellipsométrie".  
Thèse de Doctorat, Université de Michigan, 1997.
- [5] DROUIN et al  
"Manuel éléments de machines"  
Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal, 1986.
- [6] DERRIEN, JACQUES.  
"Surface des solides, propriétés électroniques".  
Paris, Techniques de l'Ingénieur, notice A245, 2, Novembre 1990.
- [7] GEORGES SPINLER  
"Conception des machines".  
Principe et application, 1 Statique 1997.
- [8] K. L. JOHNSON  
"Contact Mechanics".  
Cambridge, 1996.

- [9] JEAN DHERS  
"Usure, avaries et corrosion".  
Facteur de destruction des matériels industriels. Ed 1978.
- [10] PUBLICATIONS DE L'INSTITUT FRANÇAIS DU PETROLE  
"La lubrification industrielle".  
Tome 1, Transmissions, compresseurs et turbines, 1984.
- [11] M. Z. HUQ, J. P. CELIS  
"Wear".  
212, 1997.
- [12] H. MOHRBACHER, J. P. CELIS, J. R. ROOS  
Tribology, Int, 28, 1995.
- [13] J. AYEL  
"Les lubrifiants, moteur et pertes par frottement et usure".  
Institut Français du Pétrole, 1979.
- [14] Technique de l'ingénieur, BM5 067, 2005.
- [15] JEAN BLOUET  
"Usure et frottement" T. ing. A 3139.
- [16] Site Internet de Gordon England : [www.gordonengland.co.uk](http://www.gordonengland.co.uk)
- [17] HTML / french / introduction.fr.html
- [18] B. ARESENAULT, J.G. LEGOUX, H. HAWTHORNE.  
"Slurry Erosion of Arc-Sprayed Metal and Composite Coating".  
A United Forum for Scientific and Technological Advances 1997.

- [19] JOHNSON, K.L  
"The Mechanics of Adhesion, Deformation and Contamination in Friction, Dissipative Processes in Tribology".  
Elsevier Science B.V, Amsterdam, 1994.
- [20] P. DUMON  
"Revêtements par soudage et projection thermique"  
Tome1 Usure – Produit et procédés, Institut de Soudage, 1991.
- [21] E. RABINOWICS  
" Friction and Wear of Materials".  
Wiley, NY, 1966.
- [22] GERALD ZAMBELLI. LEO VINCENT  
"Matériaux et contact".  
Une approche tribologique, 1998.
- [23] 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.
- [24] I. ILIUC  
"Tribology of thin layers".  
Tribology, series 4, Elsevier, 1980.
- [25] O. KUBASCHEWSKI and B.E. HOPKINS  
"Oxidation of metals and alloys".  
Butterworths Scientific Publications, London, 1953.
- [26] S. FAYEULLE, D. TREHEUX et N. MONCOFFRE  
"Microstructure et frottement d'un acier à roulement implanté d'ions d'azote".  
Journal de chimie physique, 84, n° 2, 1987.

- [27] A. POUGET.  
"Conception technologique"  
Géométrie. Cinématique. Matériaux et demi produits. Prédimensionnement.  
Lubrification. Dynamique. Fiabilité des pièces et des liaisons. 1987.
- [28] J. -L. LIGIER  
"Lubrification des paliers moteurs".  
Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs. 1997.
- [29] A. CHEVALIER  
"Guide du dessinateur industriel."  
Pour maîtriser la communication technique, 1999.
- [30] R. BUTIN, M. PINOT  
"Fabrications mécaniques".  
Technologie, tome 1, 1981.
- [31] L. LAKHTINE  
"Métallographie et traitements thermiques des métaux"  
Traduction française, édition Mir, 1986.
- [32] J. LIGNON, R. MAILLEBUAU  
"Métaux ferreux"  
Etude des matériaux. 1, 1983.
- [33] Documents internes du CPG, Constantine, Services B.E.M.
- [34] C. CHAUSSIN, G. HILLY  
"Métallurgie".  
Alliages métalliques, tome 1, 1976.
- [35] R. BUTIN, M. PINOT  
"Fabrications mécaniques".  
Technologie, tome 2, 1981.

[36] C. CHAUSSIN

"Manuel pratique des aciers et de leurs traitements thermiques".  
Manuels pratiques Dunod, 1981.

[37] P. GROSTABUSSIAT SOPHIE

"Conséquences mécaniques des transformations structurales dans les alliages ferreux".  
Thèse de doctorat, INSA Lyon, Déc., 2000.

[38] CETIM / CERMO

"Catalogue tribologique de matériaux pour glissière".  
Première édition, Nov. 1985.

[39] SALMANE NOUROUZI

"Contribution à l'étude du procédé arc-fil pour la réalisation de dépôts métalliques durs résistants à l'usure abrasive".  
Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, nov. 2204.

[40] MICHAEL F. ASHBY. DAVID R.H. JONES

"Matériaux".  
Microstructure et mise en œuvre, 1991.

[41] GEORGES SPINNLER

"Conception des machines".  
Principes et applications, 3 Dimensionnement 1998.



## Annexe

### Valeurs expérimentales

A60 non traité		Charge normale appliquée [N]				
		5	9	13	18	22
Vitesse linéaire du glissement [m/s]	0,080	0,0065	0,0080	0,0098	0,0108	0,0120
	0,160	0,0055	0,0069	0,0083	0,0097	0,0103
	0,240	0,0071	0,0086	0,0105	0,0118	0,0120
	0,320	0,0085	0,0098	0,0114	0,0131	0,0138
	0,400	0,0097	0,0116	0,0129	0,0141	0,0152

Tableau VI.1 : Evolution de l'usure exprimée en [ $10^{-3}$  kg] du pion en acier A60 non traité en fonction de la charge normale et la vitesse de glissement.

XC48 non traité		Charge normale appliquée [N]				
		5	9	13	18	22
Vitesse linéaire du glissement [m/s]	0,080	0,0048	0,0060	0,0074	0,0086	0,0092
	0,160	0,0039	0,0050	0,0064	0,0077	0,0082
	0,240	0,0052	0,0062	0,0078	0,0089	0,0095
	0,320	0,0058	0,0070	0,0083	0,0094	0,0102
	0,400	0,0064	0,0076	0,0090	0,0102	0,0111

Tableau VI.2 : Evolution de l'usure exprimée en [ $10^{-3}$  kg] du pion en acier XC48 non traité en fonction de la charge normale et la vitesse de glissement.

Couple d'aciers pion / disque	Vitesse linéaire du glissement [m/s]	Charge normale appliquée [N]	Dureté du pion [HRC]	Usure [10 <sup>-3</sup> kg]
A60 / XC55	0,240	13	23	0,0058
A60 / XC55	0,240	13	28	0,0051
A60 / XC55	0,240	13	33	0,0042
A60 / XC55	0,240	13	38	0,0019

Tableau VI.3 : Variation de l'usure du pion en acier A60 en fonction de la dureté.

Couple d'aciers pion / disque	Vitesse linéaire du glissement [m/s]	Charge normale appliquée [N]	Dureté du pion [HRC]	Usure [10 <sup>-3</sup> kg]
XC48 / XC55	0,240	13	28	0,0048
XC48 / XC55	0,240	13	32	0,0039
XC48 / XC55	0,240	13	38	0,0016
XC48 / XC55	0,240	13	43	0,0007

Tableau VI.4 : Variation de l'usure du pion en acier XC48 en fonction de la dureté.

Couple d'aciers pion / disque	Vitesse linéaire du glissement [m/s]	Charge normale appliquée [N]	Temps [sx60]	Usure [10 <sup>-3</sup> kg]
A60 / XC55	0,240	13	10	0,0020
A60 / XC55	0,240	13	20	0,0045
A60 / XC55	0,240	13	30	0,0078
A60 / XC55	0,240	13	40	0,0102
A60 / XC55	0,240	13	50	0,0116
A60 / XC55	0,240	13	60	0,0128
A60 / XC55	0,240	13	70	0,0144
A60 / XC55	0,240	13	80	0,0162
A60 / XC55	0,240	13	90	0,0183
A60 / XC55	0,240	13	100	0,0195
A60 / XC55	0,240	13	110	0,0207
A60 / XC55	0,240	13	120	0,0218

Tableau VI.5 : Evolution de l'usure du pion A60 non traité en fonction du temps.

Couple d'acier pion / disque	Vitesse linéaire du glissement [m/s]	Charge normale appliquée [N]	Temps [sx60]	Usure [10 <sup>-3</sup> kg]
XC48 / XC55	0,240	13	10	0,0014
XC48 / XC55	0,240	13	20	0,0036
XC48 / XC55	0,240	13	30	0,0054
XC48 / XC55	0,240	13	40	0,0080
XC48 / XC55	0,240	13	50	0,0092
XC48 / XC55	0,240	13	60	0,0109
XC48 / XC55	0,240	13	70	0,0123
XC48 / XC55	0,240	13	80	0,0140
XC48 / XC55	0,240	13	90	0,0160
XC48 / XC55	0,240	13	100	0,0178
XC48 / XC55	0,240	13	110	0,0191
XC48 / XC55	0,240	13	120	0,0198

Tableau VI.6 : Evolution de l'usure du pion XC48 non traité en fonction du temps.

Couple d'acier pion / disque	Vitesse linéaire du glissement [m/s]	Charge normale appliquée [N]	Temps [sx60]	Dureté [HRC]	Usure [10 <sup>-3</sup> kg]
A60 / XC55	0,240	13	10	38	0,0006
A60 / XC55	0,240	13	20	38	0,0014
A60 / XC55	0,240	13	30	38	0,0018
A60 / XC55	0,240	13	40	38	0,0022
A60 / XC55	0,240	13	50	38	0,0028
A60 / XC55	0,240	13	60	38	0,0034
A60 / XC55	0,240	13	70	38	0,0040
A60 / XC55	0,240	13	80	38	0,0043
A60 / XC55	0,240	13	90	38	0,0048
A60 / XC55	0,240	13	100	38	0,0053
A60 / XC55	0,240	13	110	38	0,0057
A60 / XC55	0,240	13	120	38	0,0060

Tableau VI.7 : Evolution de l'usure du pion A60 traité en fonction du temps.

Couple d'aciers pion / disque	Vitesse linéaire du glissement [m/s]	Charge normale appliquée [N]	Temps [sx60]	Dureté [HRC]	Usure [10 <sup>-3</sup> kg]
XC48 / XC55	0,240	13	10	38	0,0004
XC48 / XC55	0,240	13	20	38	0,0008
XC48 / XC55	0,240	13	30	38	0,0013
XC48 / XC55	0,240	13	40	38	0,0017
XC48 / XC55	0,240	13	50	38	0,0020
XC48 / XC55	0,240	13	60	38	0,0026
XC48 / XC55	0,240	13	70	38	0,0029
XC48 / XC55	0,240	13	80	38	0,0035
XC48 / XC55	0,240	13	90	38	0,0039
XC48 / XC55	0,240	13	100	38	0,0043
XC48 / XC55	0,240	13	110	38	0,0048
XC48 / XC55	0,240	13	120	38	0,0053

Tableau VI.8 : Evolution de l'usure du pion XC48 traité en fonction du temps.