

# THÈSE

## En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences

*Présentée par : Mme. SENHADJI Salima*

### *Intitulé*

*Etude expérimentale du comportement au frottement et à l'usure  
en contact plan du laiton et du bronze en milieu lubrifié*

*Faculté : Physique*

*Département : Physique Energétique*

*Spécialité : Physique*

*Soutenue le 19/04/2018, Devant le Jury Composé de :*

<i>Membres de Jury</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Domiciliation</i>
<i>F. HAMDACHE</i>	<i>Professeur</i>	<i>Présidente</i>	<i>USTO -MB</i>
<i>F. BELARIFI</i>	<i>Professeur</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ -Oran2 MBA</i>
<i>B. AIT SAADI</i>	<i>Professeur</i>	<i>Examineur</i>	<i>USTO -MB</i>
<i>R. ZENASNI</i>	<i>Professeur</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ - Mostaganem AIB</i>
<i>F. BENKHENAFOU</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ - Tlemcen ABB</i>
<i>F. ROBBE-VALLOIRE</i>	<i>Professeur</i>	<i>Invité</i>	<i>Institut Supérieur de Mécanique - Paris</i>

## *Dédicaces*

### *A mes parents*

Aux êtres qui me sont les plus chers  
Devant tous les sacrifices que vous avez consentis pour moi, aucune  
dédicace ne saurait exprimer la grandeur des sentiments  
que j'ai pour vous.

### *A mon très cher fils YOUNES*

Ma raison de vivre

### *A toute ma famille*

## Remerciements

Mes travaux de thèse se sont déroulés au sein du groupe tribologie de l'institut supérieur de mécanique *SUPMECA*, de Paris.

Je tiens à remercier tout d'abord mon directeur de thèse, Monsieur Le Professeur *F. BELARIFI* pour son aide, ses conseils et sa présence tout au long de ce travail de thèse.

Je remercie mon co-directeur de thèse, Monsieur Le Professeur

*F. Robbe Valloire*, pour ses conseils et ses orientations, ainsi que de m'avoir accueilli au sein l'équipe de tribologie et matériaux du laboratoire QUARTZ de l'institut supérieur de la mécanique de Paris (*SUPMECA*), pour l'accomplissement de mes travaux expérimentaux. Dans ce contexte j'exprime toute ma gratitude aux membres de l'équipe Tribologie-Matériaux pour leurs disponibilités ainsi que leurs aides et particulièrement Mme *Durata Katundi*.

J'adresse tous mes remerciements aux membres du jury :

Madame le Professeur *F. HAMDACHE* qui m'a fait l'honneur de présider ce jury, A Monsieur le Professeur *B. AIT SAADI* de l'université de l'USTO, Monsieur le Professeur *R. ZENASNI* de l'université de Mostaganem, Monsieur le Professeur *F. BENKHENAFOU* de l'université de Tlemcen qui ont gentiment accepté de lire mon manuscrit et de l'évaluer.

J'adresse également mes remerciements à l'équipe du Laboratoire *LSMC* de l'Université Oran1 auquel je suis membre.

Un grand merci et toute ma reconnaissance à mon collègue *Mr. R. YAHIAOUI* pour son aide tout au long de ce travail.

Enfin, je n'oublie pas de remercier aussi mes amies de l'institut de maintenance et de sécurité industrielle *IMSI*, Université Oran 2 et mes amies de l'Université de *l'USTO*, pour leur soutien et encouragement.

## Table des matières

<b>Table des figures</b> .....	1
<b>Notations</b> .....	3
<b>Introduction générale</b> .....	5
<b>Chapitre 1 : Etat de l'art sur les systèmes tribologiques</b>	
1. Introduction .....	7
2. Le système tribologique .....	8
2.1 Le concept du troisième corps .....	8
2.2 Accommodation de vitesse .....	9
2.3 Le circuit tribologique .....	10
3. Influence des différents paramètres sur le comportement du contact .....	11
3.1 Influence du matériau .....	12
3.2 Influence de la cinématique du contact .....	12
3.3 Influence de la charge .....	12
3.4 Influence du milieu environnant .....	13
3.5 Influence de la microgéométrie .....	13
4. Phénomènes observables d'un contact .....	13
4.1 Le frottement .....	13
4.2 L'usure .....	14
4.3 Les phénomènes thermiques .....	15
5. Endommagement des surfaces .....	15
5.1 Caractérisation géométrique d'une surface réelle .....	16
5.2 Caractérisation des états de surface .....	19
5.3 Modélisation de la microgéométrie .....	20
5.4 Modélisation des zones de contacts .....	21
5.5 Evolution de la rugosité avec l'usure .....	21
6. Les contacts lubrifiés .....	22
7. Les régimes de lubrification (Courbe de Stribeck) .....	22
8. Conclusion .....	25

## Chapitre 2 : Usure des surfaces en contact lubrifié

1. Introduction .....	26
2. Evolution de l'usure .....	26
2.1 Les différents types d'usure.....	28
2.2 Usure adhésive.....	28
2.3 Usure abrasive .....	30
2.4 Usure par fatigue .....	31
2.5 Usure corrosive ou tribochimique .....	32
3. Approche quantitative de l'usure .....	32
4. Loi d'Archard .....	33
5. Carte d'usure .....	35
6. Comportement au frottement et à l'usure en lubrification mixte .....	37
7. Conclusion.....	40

## Chapitre 3 : Caractérisation du laiton et du bronze

1. Introduction .....	41
2. Comportement au frottement et à l'usure des alliages de cuivre .....	42
3. Effet de la microstructure sur le comportement à l'usure des matériaux .....	44
3.1 Présence d'une seconde phase.....	44
3.2 Influence de la taille des grains .....	45
4. Caractérisation des matériaux d'étude .....	45
4.1 Caractérisation du laiton <b>CuZn39Pb2</b> .....	46
4.2 Caractérisation du bronze <b>CuSn9P</b> .....	48
4.3 Analyse de la composition chimique.....	50
5. Conclusion.....	52

## Chapitre 4 : Etude expérimentale

1. Introduction .....	53
2. Les moyens et les techniques expérimentales .....	53
2.1 Description du tribomètre.....	53
2.2 Techniques de mesure sur le tribomètre .....	55
2.3 Géométrie des éprouvettes.....	56
2.4 Procédure expérimentale des essais d'usure.....	57

3. Préparation des échantillons et moyens de caractérisation .....	59
3.1 Préparation des échantillons .....	59
3.2 Topographie des surfaces .....	60
3.3 Analyse par microscopie électronique à balayage.....	61
3.4 Analyse par microscopie optique .....	61
3.5 Mesure de la microdureté .....	62
4. Comportement au frottement à vitesse variable .....	62
4.1 Influence de la vitesse sur le frottement .....	62
4.2 Courbe de Stribeck expérimentale.....	64
5. Comportement à l'usure à vitesse constante .....	65
5.1 Influence de la rugosité sur le coefficient de frottement .....	65
5.2 Influence de la rugosité sur le coefficient d'usure.....	67
6. Analyse des débris d'usure et des pions .....	69
6.1 Analyse des débris d'usure .....	69
6.2 Observations des faciès des pions .....	72
6.3 Observations des pions en volume .....	73
7. Evolution de l'usure du laiton .....	74
7.1 Résultats du frottement et de l'usure .....	74
7.2 Analyse microscopique.....	76
7.3 Mesure de la microdureté .....	78
8. Conclusion.....	79
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>80</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>82</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>88</b>

## Table des figures

<b>Figure 1.1</b> : Concept triangle illustrant l'interaction des sciences et des paramètres impliqués dans la tribologie.....	7
<b>Figure 1.2</b> : Schéma d'un tribosystème .....	8
<b>Figure 1.3</b> : Mécanisme d'accommodation de vitesse.....	9
<b>Figure 1.4</b> : Circuit tribologique d'un contact .....	11
<b>Figure 1.5</b> : Configuration du contact.....	11
<b>Figure 1.6</b> : Représentation des efforts sur deux solides en mouvement relatif .....	14
<b>Figure 1.7</b> : Vue théorique en coupe transversale d'une surface .....	16
<b>Figure 1.8</b> : Types des défauts géométriques.....	17
<b>Figure 1.9</b> : Paramètres géométriques de rugosité.....	18
<b>Figure 1.10</b> : Modèle du frottement des surfaces en contact .....	19
<b>Figure 1.11</b> : Modélisation d'un contact.....	19
<b>Figure 1.12</b> : Evolution de la rugosité et de l'usure durant le rodage.....	21
<b>Figure 1.13</b> : Effet de la lubrification sur le déplacement des deux solides .....	22
<b>Figure 1.14</b> : Courbe de Stribeck .....	23
<b>Figure 2.1</b> : Evolution de l'usure .....	27
<b>Figure 2.2</b> : Mécanisme de l'usure adhésive .....	29
<b>Figure 2.3</b> : Table de Rabinowitch .....	30
<b>Figure 2.4</b> : Usure par abrasion.....	31
<b>Figure 2.5</b> : Valeurs du coefficient d'usure K présentées pour différentes conditions d'usure.....	34
<b>Figure 2.6</b> : Carte du mécanisme d'usure pour un contact pion (acier)/disque (acier) à sec .....	36
<b>Figure 2.7</b> : Régime de lubrification mixte.....	37
<b>Figure 2.8</b> : Evolution de l'usure et du frottement.....	39
<b>Figure 3.1</b> : Variation de l'usure en fonction de la teneur du phosphore .....	43
<b>Figure 3.2</b> : Dépendance de l'intensité d'usure de la taille des grains .....	45
<b>Figure 3.3</b> : Diagramme de phase du système Cuivre-Zinc.....	46
<b>Figure 3.4</b> : La structure cristalline (a) de la phase $\alpha$ (CFC), (b) de la phase $\beta'$ (CC) ...	47
<b>Figure 3.5</b> : Analyse métallographique du laiton.....	48
<b>Figure 3.6</b> : Diagramme de phase du système Cuivre-Etain .....	49
<b>Figure 3.7</b> : Analyse métallographique du bronze .....	50

<b>Figure 3.8</b> : Analyse EDS d'un échantillon de laiton (a) Analyse cartographique, (b) ponctuelle sur un précipité et (c) spectre obtenu pour l'analyse x .....	51
<b>Figure 3.9</b> : Analyse EDS d'un échantillon de bronze. (a) Analyse cartographique et (b) spectre obtenu pour l'analyse x .....	51
<b>Figure 4.1</b> : Vue générale du Tribomètre Pion-Disque.....	56
<b>Figure 4.2</b> : Bras du tribomètre sans le disque.....	57
<b>Figure 4.3</b> : Photos : (a) du pion, et (b) du disque .....	58
<b>Figure 4.4</b> : Diagramme des vitesses .....	60
<b>Figure 4.5</b> : Etapes de préparation des échantillons .....	61
<b>Figure 4.6</b> : Profilomètre - SURFASCAN 3S .....	62
<b>Figure 4.7</b> : Procédure du filtrage d'huile.....	63
<b>Figure 4.8</b> : (a) Microscope optique, (b) Microduromètre.....	64
<b>Figure 4.9</b> : Evolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement .....	65
<b>Figure 4.10</b> : Influence de la rugosité sur le coefficient du frottement.....	66
<b>Figure 4.11</b> : Coefficient de frottement moyen des couples : laiton / acier et bronze / acier, à V= 0.5 m/s et sous un chargement de (a) 10MPa et (b) 1MPa.....	68
<b>Figure 4.12</b> : Coefficient d'usure moyen des pions laiton et bronze en fonction de la rugosité Ra=0.15µm et Ra=2µm .....	70
<b>Figure 4.13</b> : Image MEB des débris d'usure des pions en laiton .....	72
<b>Figure 4.14</b> : La piste d'usure en acier XC42 frottée contre le pion en laiton.....	72
<b>Figure 4.15</b> : Image MEB des débris d'usure des pions en bronze .....	73
<b>Figure 4.16</b> : La piste d'usure en acier XC42 frottée contre le pion en bronze.....	73
<b>Figure 4.17</b> : Faciès des pions après usure contre les aciers.....	74
<b>Figure 4.18</b> : Image microscopique de la découpe transversale perpendiculairement aux traces d'usure après frottement (a) des pions en laiton (CuZn39Pb2), (b) en bronze (CuSn9P) .....	75
<b>Figure 4.19</b> : Comparaison de l'évolution du coefficient de frottement en fonction de la durée de l'essai sur les pions en laiton (Ra=2µm, P=10MPa) .....	77
<b>Figure 4.20</b> : Image microscopique de la découpe transversale perpendiculairement aux traces d'usure après frottement du couple laiton/lisse à différentes durées d'essai .....	79
<b>Figure 4.21</b> : Evolution de la microdureté en fonction de la profondeur .....	80

## Notations

$f$ :	Coefficient de frottement	[--]
$f_M, f_L$ :	Coefficient de frottement moyen du mode de lubrification en film mince et limite	[--]
$F_N$ :	Force normale au contact	[N]
$F_T$ :	Force tangentielle au contact	[N]
$h_{\min}$ :	Hauteur minimale	[ $\mu\text{m}$ ]
$H$ :	Dureté du pion	[HV]
$K$ :	Coefficient d'usure	[ $\text{mm}^3/\text{N.m}$ ]
$K_M, K_L$ :	Coefficient d'usure moyen du régime en film mince et limite	[ $\text{mm}^3/\text{N.m}$ ]
$L$ :	Longueur de glissement	[m]
$\Delta m$ :	Différence entre la masse initiale et finale	[g]
$n$ :	Nombre de tour	[tr/min]
$N_M, N_L$ :	Force normale des zones travaillant en film mince et limite	[N]
$P$ :	Pression de contact	[MPa]
$P_{\text{app}}$ :	Pression appliquée	[MPa]
$\bar{P}$ :	Pression adimensionnelle	[--]
$r$ :	Rayon du disque	[m]
$R_a$ :	Rugosité moyenne arithmétique	[ $\mu\text{m}$ ]
$R_q$ :	Rugosité moyenne quadratique	[ $\mu\text{m}$ ]
$S$ :	Paramètre de Sommerfeld	[m]
$t$ :	Temps	[s]
$T_M, T_L$ :	Force de frottement des zones travaillant en film mince et limite	[N]
$V$ :	Vitesse linéaire de glissement	[ $\text{m.s}^{-1}$ ]
$\tilde{V}$ :	Vitesse adimensionnelle	[--]
$\Delta V$ :	Volume de matière perdue	[ $\text{mm}^3$ ]

**Lettres grecques**

$\eta$ :	Viscosité dynamique d'huile	[Pa.s]
$\lambda$ :	Parametre des interactions des aspérités en régime lubrifié	[--]
$\rho$ :	Masse volumique	[g.cm <sup>-3</sup> ]
$\sigma^*$ :	Rugosité moyenne de deux surfaces	[ $\mu\text{m}$ ]
$\phi$ :	Fraction de force des zones travaillant en film limite.	[--]
$\omega$ :	Vitesse angulaire	[rd.s <sup>-1</sup> ]

## Introduction générale

L'étude du contact entre deux corps en mouvement met en évidence des phénomènes de frottement et d'usure, qu'il s'agisse d'un contact sec ou lubrifié. Leur degré d'influence dépend des qualités intrinsèques des matériaux, des états de surface ainsi que des lubrifiants. Ces phénomènes s'inscrivent dans une science qui porte le nom de la tribologie. Celle-ci est tout d'abord passée de l'analyse des massifs (ou volume des matériaux, Bowden 1964) à l'analyse des surfaces par Buckeley 1981, puis à celle de la dynamique des interfaces introduite par Godet 1984. Plusieurs notions ont été introduites, par la suite, pour une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et de l'usure (Godet 1984, Berthier 1988). On peut citer la notion du contact à trois corps qui s'articule autour des concepts de triplet tribologique, du circuit tribologique et des mécanismes d'accommodation de vitesse.

Les différents auteurs s'accordent sur le fait que la réduction de l'usure repose sur un choix judicieux des matériaux, sur une forme de pièce minimisant les contraintes et sur un contrôle adéquat de l'environnement. Cependant, il est difficile de trouver un matériau qui répond à toutes les exigences d'une application donnée et possédant une bonne résistance à l'usure.

Dans ce contexte, nous avons réalisé une étude expérimentale pour comparer le comportement tribologique de deux nuances d'alliage de cuivre, de dureté comparable, à savoir : le laiton (CuZn39Pb2) et le bronze (CuSn9P).

Notre objectif est d'étudier l'influence de la microstructure de ces alliages sur leur comportement au frottement et à l'usure, à travers un protocole expérimental rigoureux. L'étude s'est déroulée sur un tribomètre pion disque en mode de contact plan-plan et en régime de lubrification mixte en utilisant un lubrifiant sans additif (Neutral 100). Deux niveaux de pression (1 et 10MPa) ont été choisis avec deux rugosités du disque ( $R_a = 0.15$  et  $2\mu\text{m}$ ) de nuance XC42.

Deux campagnes d'essais ont été menées : la première consiste à tracer la courbe de Stribeck pour déterminer la vitesse adéquate de la stabilité du frottement. La seconde étape étudie l'évolution de l'usure en fonction du temps et de la rugosité des surfaces pour la vitesse obtenue ( $V=0.5\text{m/s}$ ) lors de la première campagne d'essais. Les résultats montrent, que contrairement au bronze, la prépondérance de la microstructure du laiton sur son comportement à l'usure est bien marquée.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres distincts et complémentaires :

Le premier chapitre donne un aperçu de l'état de l'art des concepts tribologiques et de l'influence des états de surface et leurs rôles dans les différents régimes de lubrification. Il présente une synthèse des différents paramètres intervenant dans notre étude expérimentale.

Le second chapitre est consacré à l'étude de l'usure des contacts lubrifiés qui résulte d'un ensemble complexe de mécanismes, souvent difficiles à interpréter. Les différents types d'usure ainsi que leurs quantifications et leurs classifications sont aussi présentés.

Le troisième chapitre traite de la caractérisation des matériaux utilisés dans notre étude expérimentale. Dans ce contexte nous avons présenté une étude détaillée de leur structure métallographique, leur diagramme de phase et leurs propriétés mécaniques, ainsi que l'effet des éléments d'alliage sur leur comportement tribologique.

Le dernier chapitre est divisé en deux parties, la première est consacrée à la présentation de la démarche expérimentale, ainsi que les outils d'analyse et de caractérisation utilisés. Quant à la seconde partie, elle présente les principaux résultats expérimentaux et une discussion détaillée des différents phénomènes observés. L'analyse métallographique des éprouvettes après frottement met en évidence l'impact de la microstructure sur la cinétique d'usure.

Une conclusion générale clôt ce mémoire en faisant ressortir les principaux résultats obtenus.

---

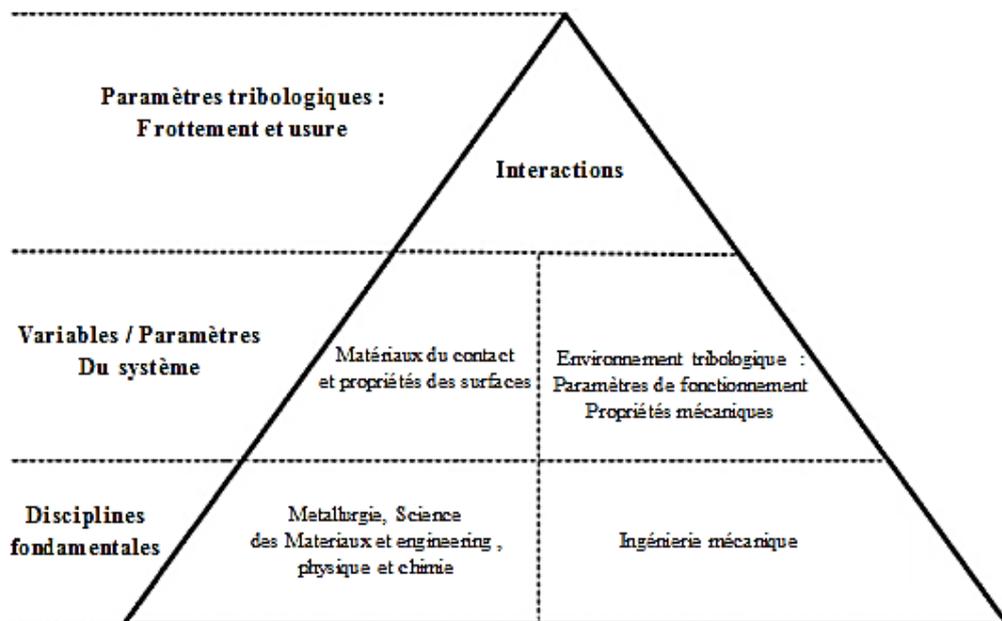
*Chapitre 1*  
*Etat de l'art des systèmes tribologiques*

---

## 1. Introduction

L'analyse des différents paramètres intervenant dans l'étude de l'interface d'un système tribologique, formé par deux corps en mouvement, découle de la tribologie. Cette dernière est une science qui a pour objet l'étude du fonctionnement des contacts existants dans les liaisons ou les mécanismes (figure 1.1) [1]. La tribologie s'appuie à la fois sur les bases fondamentales de la mécanique, sur les acquis récents de la science des matériaux et sur la physico-chimie des surfaces.

Durant ces dernières décennies, les recherches dans le domaine de la tribologie se sont intéressées principalement au volume des matériaux en contact [2][3], par la détermination des lois de comportement de frottement et d'usure (approche mécanique). Puis, la tribologie des surfaces a fait son apparition associée à la physico-chimie des surfaces [4][5] (approche matériaux). L'étude des surfaces n'ayant pas permis d'expliquer tous les phénomènes dus au frottement, la tribologie s'est étendue à l'étude des interfaces (approche complémentaire mécanique/matériaux). Cette dernière notion a permis une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et de l'usure [6][7].

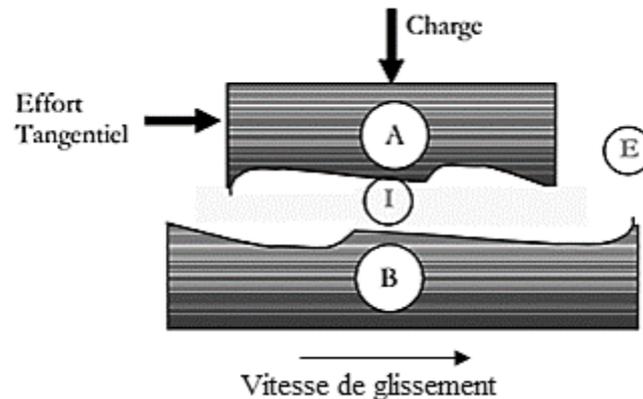


**Figure 1.1 :** Concept triangle illustrant l'interaction des sciences basiques, des disciplines d'ingénierie et de multiples paramètres qui sont impliqués dans la tribologie [1]

## 2. Le système tribologique

Un système tribologique ou tribosystème (figure 1.2) est un système mécanique composé par :

- Les deux premiers corps antagonistes (A,B) en mouvement relatif qui interviennent dans le contact par leur géométrie et leurs propriétés physicochimiques ;
- Le milieu interfacial (I), dit troisième corps, constitue le volume de la matière qui sépare les deux corps en mouvement. Son rôle principal est de transmettre la charge appliquée au contact, de participer à l'accommodation des vitesses des premiers corps et de séparer les corps en contact en réduisant leur interaction ;
- Le milieu ambiant (E) qui constitue le milieu des échanges du contact avec l'extérieur. Cet environnement joue un rôle déterminant suite aux interactions qui peuvent exister en fonction de sa composition, sa température et sa pollution [6].



**Figure 1.2 :** Schéma d'un tribosystème

### 2.1 Le concept du troisième corps

Il a été introduit pour la première fois dans les années 70 par Maurice Godet [7], puis développé par Yves Berthier [8][9] à partir des observations expérimentales. Il permet de réunir dans une même approche les théories de la lubrification, du frottement et de l'usure.

Dans le concept élaboré par l'équipe de Godet, d'un point de vue matériau, le troisième corps est défini comme la zone où la composition chimique est différente de celle des constituants des premiers corps. D'un point de vue cinématique, le troisième corps est

défini comme l'épaisseur dans laquelle la différence de vitesse entre les premiers corps est accommodée, ce qui met en avant son caractère lubrifiant.

Ce milieu interfacial permet aussi la séparation totale ou partielle des premiers corps. Il est introduit dans le contact par entraînement cinématique ou par la formation de particules détachées des premiers corps. Ces particules peuvent soit assurer la protection contre l'usure des surfaces en contact par formation d'un lit de débris, soit contribuer à l'usure si les débris sont évacués de la surface de contact [10]. Les conditions d'enlèvement ou de rétention d'une particule dans le contact ont été définies par Jiant et al. [11] par une étude probabiliste en fonction du diamètre et de la géométrie de la particule. La quantification du troisième corps est relativement difficile et nécessite des travaux expérimentaux de grandes précisions comme les mesures profilométriques et les observations microscopiques.

Deux autres notions ont été introduites suite à la présence du troisième corps et son action sur le frottement et l'usure des corps en contact : l'accommodation de la différence de vitesse et le circuit tribologique.

## 2.2 Accommodation de vitesse

Le déplacement relatif des premiers corps implique un gradient de vitesse à travers le troisième corps. L'accommodation de vitesse peut se localiser à différents sites du contact ( $S_i$ ) qui sont au nombre de cinq (figure 1.3).

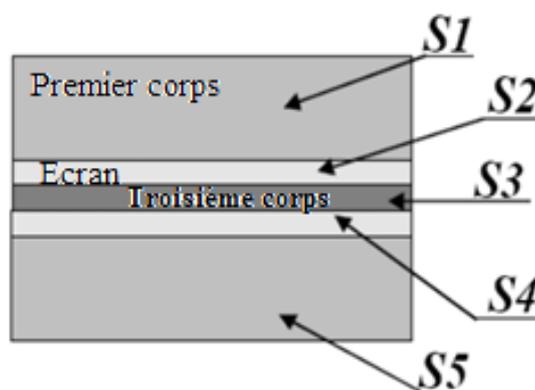


Figure 1.3 : Mécanisme d'accommodation de vitesse

Les sites d'accommodation possibles selon Berthier [8] sont :

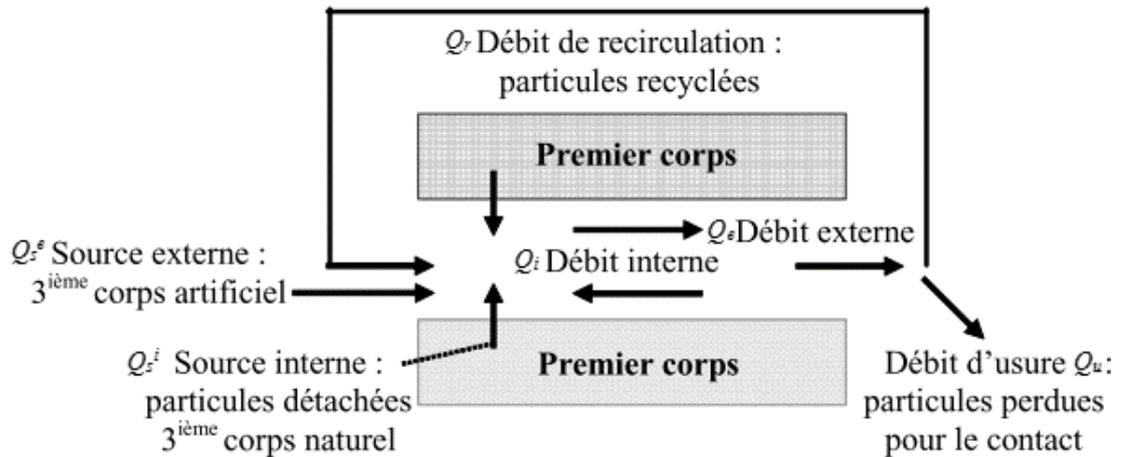
- au niveau des premiers corps (notés  $S_1$  et  $S_5$ ) : sont les parties massives bordant le contact ;
- au niveau du troisième corps (noté  $S_3$ ) : ce sont les particules détachées ou introduites entre les premiers corps ;
- au niveau des interfaces entre premiers corps appelés écrans (notés  $S_2$  et  $S_4$ ) : présentent les couches superficielles des premiers corps (contamination, réaction tribochimique). Leurs propriétés (mécaniques, cristallographiques..) sont différentes du volume du matériau.

### 2.3 Le circuit tribologique

Lors du mouvement, les débris constituant le troisième corps sont soumis à un gradient de vitesse. Par conséquent, les contacts sont le siège de débits de matière activés lors du frottement entre les deux premiers corps. Ce concept, proposé par Berthier [12], permet une meilleure compréhension de la relation entre le troisième corps et l'usure.

Selon ce concept, le circuit tribologique indiqué par la figure 1.4 est constitué par :

- Un débit source ( $Q_s$ ) de particules conduisant à la formation d'un troisième corps et qui se divise en deux débits différents : le premier correspond au débit source interne ( $Q_s^i$ ) et qui est formé par les particules détachées du disque ou du pion, donnant un troisième corps naturel. Ce dernier est dû à l'abrasion, à l'adhésion ou à la fissuration. Le second correspond au débit source externe ( $Q_s^e$ ), formé par les particules introduites dans le contact et représente le troisième corps artificiel ;
- Un débit interne ( $Q_i$ ) dû aux particules du troisième corps piégées dans le contact et qui circulent entre les deux premiers corps ;
- Un débit externe ( $Q_e$ ) qui représente le débit du troisième corps éjecté du contact et qui se divise en deux débits différents. Le premier, dit débit de recirculation ( $Q_r$ ), est composé de particules qui sont momentanément éjectées du contact mais réintroduites par la suite. Le second est le débit d'usure ( $Q_u$ ) qui correspond à la quantité du troisième corps définitivement éjectée du contact, et ne participe plus à l'accommodation de la différence de vitesse entre les premiers corps.



**Figure 1.4** : Circuit tribologique d'un contact

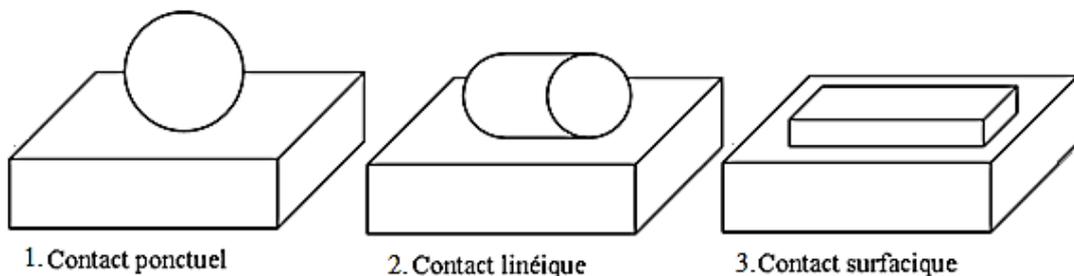
Il existe une relation, entre tous ces débits de troisième corps, basée sur la loi de la conservation de la matière, et dont l'équation du débit interne ( $Q_i$ ) s'écrit :

$$Q_i = Q_s - Q_e \Leftrightarrow Q_i = Q_s^i + Q_s^e - Q_u - Q_r \quad (1.1)$$

Notons qu'il est difficile de quantifier les débits du troisième corps de manière expérimentale [11].

### 3. Influence des différents paramètres sur le comportement du contact

La classification des contacts peut se résumer en trois types, qui peuvent être ponctuel, linéique ou surfacique (figure 1.5).



**Figure 1.5** : Configuration du contact

Il est à remarquer que les deux premiers types sont des contacts Hertiens, dont l'aire de la surface de contact évolue avec l'usure. Cela présente un handicap dans le cas de la lubrification mixte. En effet, le paramètre dominant, dans ce cas est la pression apparente du contact qui est difficilement contrôlée si la surface évolue [13].

Le choix du type de contact dans notre étude est porté sur le type plan /plan, qui permet de maintenir l'aire des surfaces de frottement constante quelle que soit l'usure des interfaces.

Les paramètres prédominants, dans tout type de contact, sont :

- les matériaux ;
- la cinématique du contact ;
- la charge ;
- l'environnement ;
- la microgéométrie.

### **3.1 Influence du matériau**

La nature des matériaux des surfaces en contact a un rôle décisif dans le comportement général du système tribologique. Selon les fonctions tribologiques que doit assurer le contact, le choix des matériaux dépendra de leurs propriétés mécaniques et physicochimiques.

### **3.2 Influence de la cinématique du contact**

La cinématique décrit le mouvement entre les deux surfaces en contact. Il existe trois types de cinématique : roulement, glissement et pivotement.

Le comportement du système tribologique peut être fortement affecté par la fréquence des sollicitations (continues, alternées ou répétées) qui se manifeste par des phénomènes de fatigue ou des difficultés du maintien du film lubrifiant.

### **3.3 Influence de la charge**

La charge et la manière dont elle est appliquée permettent d'évaluer la nature et le niveau des contraintes auxquelles les couches superficielles sont soumises. Le comportement du contact dépend de son intensité et de son évolution au cours du temps.

### 3.4 Influence du milieu environnant

Le milieu dans lequel évolue le contact a une grande influence sur le comportement tribologique du système. Cette influence dépend de :

- sa nature : liquide ou gaz ;
- sa température ;
- ses propriétés mécaniques et physiques : qui interviennent dans le comportement mécanique du contact ;
- ses propriétés chimiques : la réactivité du milieu ambiant avec les matériaux constituant les solides en contact.

### 3.5 Influence de la microgéométrie

La microgéométrie est l'un des éléments d'appréciation de l'aire réelle de contact. Celui-ci met en jeu non seulement les aspects microgéométriques, mais aussi les interactions moléculaires inter-faciales et les forces de surface qui sont largement tributaires de la physicochimie de la surface [14].

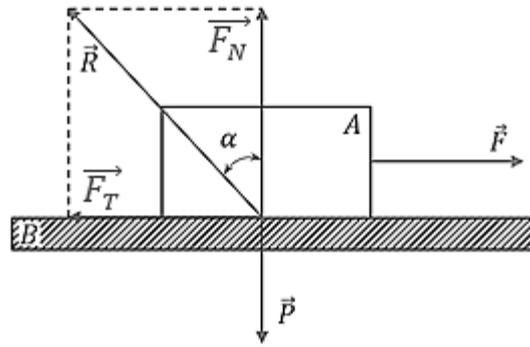
## 4. Phénomènes observables d'un contact

Un certain nombre de phénomènes physiques peut se manifester lors du fonctionnement d'un système tribologique. Les plus évidents sont : le frottement, l'usure et les phénomènes thermiques. L'étude de ces phénomènes a été entamée par plusieurs auteurs Vernotte, Archard, Bowden, Tabor, Jaeger, Kragelski [15][16] durant la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, et qui est poursuivie à l'heure actuelle par de nombreuses équipes scientifiques.

### 4.1 Le frottement

Le frottement est caractérisé généralement par le coefficient de frottement ( $f$ ) qui représente la résistance au déplacement de la force tangentielle ( $F_T$ ) sur la portance global ( $F_N$ ) (figure 1.6).

$$f = \frac{F_T}{F_N} \quad (1.2)$$



**Figure 1.6 :** Représentation des efforts sur deux solides en mouvement relatif

Le coefficient de frottement  $f$  n'est pas une propriété du matériau mais de l'ensemble du système tribologique.

## 4.2 L'usure

L'usure correspond à l'endommagement des surfaces en contact qui se manifeste par une perte de masse et de forme. La quantification de l'usure se fait expérimentalement par la pesée des solides en contact à différents intervalles de temps.

Une classification des types d'usure a été donnée par Stachowiak et al.[17], où on distingue : l'usure due à l'action d'une particule sur la surface d'un solide (usure par abrasion, érosion ou cavitation), l'usure due au passage répété d'un solide sur une surface (usure par fatigue) et l'usure due aux forces d'attraction entre les atomes de deux surfaces (usure adhésive). Viennent ensuite des types d'usure plus spécifiques, comme l'usure corrosive et l'usure par petits débattements (fretting).

En ce qui concerne la quantification de l'usure, d'énormes progrès ont été réalisés dans les dernières décennies. Meng et Ludema [18] citent plus d'une centaine de lois d'usure, dont une grande partie est basée sur la loi d'Archard, qui relie la vitesse d'usure, vitesse de glissement et caractéristiques mécaniques des corps en contact. Cette partie sera développée en détail dans le chapitre deux.

### 4.3 Les phénomènes thermiques

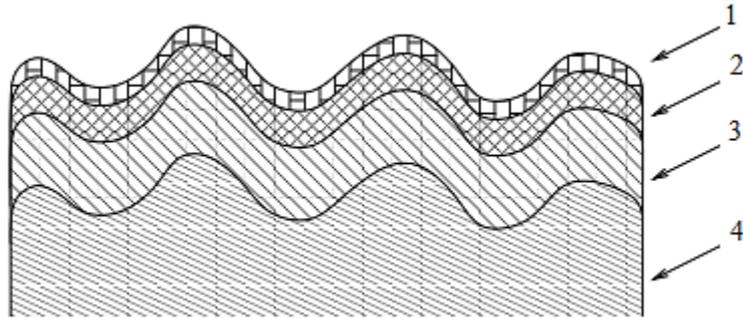
L'échauffement des surfaces de contact, généré par le frottement, présente 95% des pertes énergétiques [19]. La température de surface contribue aux phénomènes chimiques, thermodynamiques et rhéologiques, qui se manifestent dans le contact et jouent un rôle important dans le comportement tribologique des matériaux [20][21]. Cette température englobe la température ambiante, l'échauffement moyen général et l'échauffement local instantané et elle se dissipe dans le milieu environnant et dans chacun des deux solides.

Dans certain cas extrêmes de frottement, la température de l'interface peut atteindre des valeurs très élevées, pouvant conduire à des transformations de phases dans la zone adjacente à la surface de contact [22].

## 5. Endommagement des surfaces

Les pièces mécaniques sont obtenues généralement par deux procédés différents : le formage ou par enlèvement de matière (usinage). Le premier permet d'obtenir un bon état de surface avec un réseau cristallin pratiquement intact. Quant au deuxième procédé, il est obtenu par arrachement de matière avec une structure cristalline qui est profondément modifiée sous l'influence de la pression et de la température.

Les états de surface obtenus à partir de ces différents procédés peuvent être caractérisés par leur aspect microgéométrique et physico-chimique. La figure 1.7 présente les différentes zones qui constituent la surface d'un matériau solide. Ces zones sont de nature, de structure et de composition différente de celles du volume du matériau, et peuvent atteindre une profondeur de  $10^{-2}$  mm. Nous distinguons quatre zones (figure 1.7) :



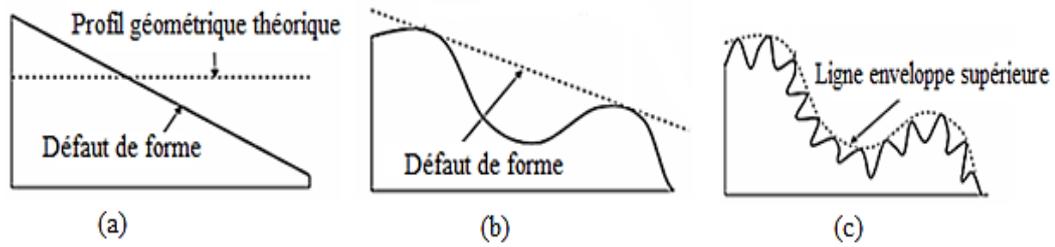
**Figure 1.7 :** Vue théorique en coupe transversale d'une surface

- La première zone formée sur la surface est due principalement aux interactions avec le milieu ambiant (adsorption, chimisorption) d'épaisseur 3 nm ;
- La seconde zone d'épaisseur de 10 nm, correspond à une couche d'oxyde ;
- La troisième zone d'épaisseur de 1  $\mu\text{m}$ , est caractérisée par une structure cristalline écaillée suite aux contraintes superficielles issues du mode d'obtention des pièces (usinage ou formage) ;
- La quatrième zone se forme à partir de 100  $\mu\text{m}$  et correspond au volume du matériau.

Il est à noter que les couches superficielles, ainsi que l'état des surfaces présentes, peuvent évoluer au cours du service. Leurs propriétés différentes de celles du volume du matériau affectent fondamentalement le frottement et l'usure. Lorsque cette dernière est limitée à la surface elle est appelée usure douce et lorsqu'elle s'étend au volume, on aura une usure sévère.

### 5.1 Caractérisation géométrique d'une surface réelle

Chaque surface est composée d'irrégularités de différents ordres qui peuvent être divisées en trois catégories (figure 1.8) :



**Figure 1.8 :** Types des défauts géométriques  
 (a) de forme (d'ordre 1), (b) d'ondulation (d'ordre 2),  
 (c) de rugosités (ordre 3)

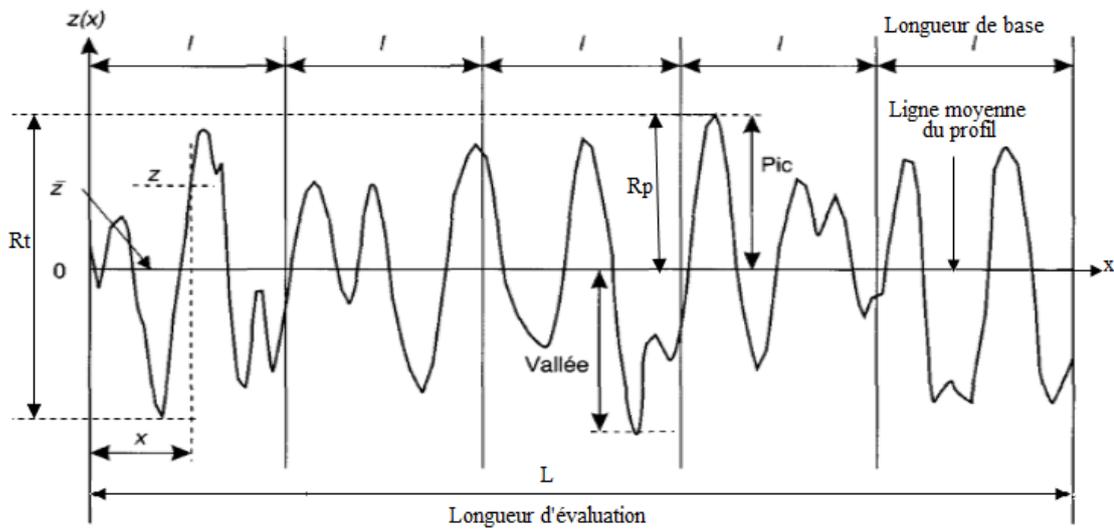
- Les défauts de forme d'ordre 1, appelés généralement des défauts macro-géométriques, représentent la déviation globale par rapport à l'horizontal ;
- Les défauts d'ordre 2, appelés ondulations, sont induits par les vibrations de la machine ou de la pièce ;
- Les défauts d'ordre 3, appelés rugosités, définissent l'état de surface final de la pièce, ils ont une influence sur le comportement au frottement et à l'usure, et plus précisément le mode de contact et le comportement du milieu interfacial (troisième corps).

Il existe deux techniques de mesure des états de surface, sans contact et avec contact. Cette dernière est la technique la plus utilisée actuellement.

Les différents critères de rugosité sont définis selon la norme ISO ou AFNOR [23][24]. Ces normes ont défini une vingtaine de critères de défauts de surface, dont certains sont des critères essentiels normalisés et d'autres complémentaires non normalisés (Annexe 1).

Les paramètres géométriques de rugosité les plus courants sont  $R_t$  et  $R_p$  (figure 1.9), tels que :

- $R_t$  est la différence d'altitude entre le point le plus élevé et le point le plus bas du profil. C'est l'étendu des mesures d'altitude du profil.
- $R_p$  est l'altitude du point le plus élevé du profil par rapport à la ligne moyenne (ou droite des moindres carrés).



**Figure 1.9 :** Paramètres géométriques de rugosité

Les paramètres statistiques de rugosité généralement utilisés sont  $R_a$  et  $R_q$  [25] [26][27], avec :

- $R_a$  est l'écart moyen de rugosité, c'est un paramètre de qualité qui caractérise les variations d'altitude des points de la surface d'un matériau. Ce paramètre est représentatif de l'amplitude verticale, il est couramment mesuré en déplaçant un palpeur sur la surface et il se définit par :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Z(x)| dx \quad (1.3)$$

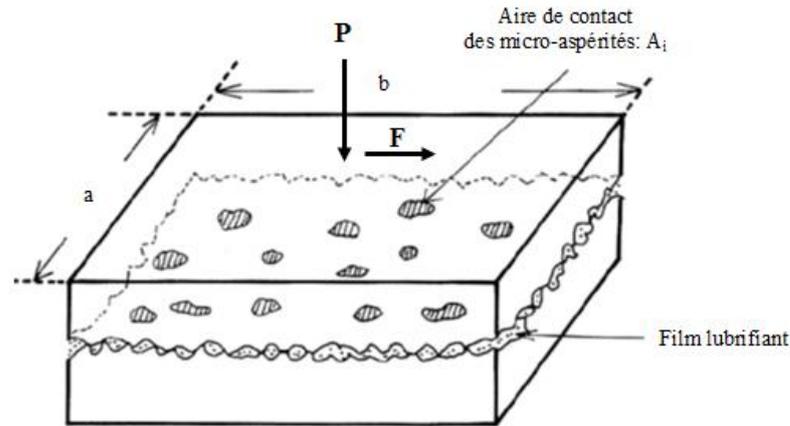
Avec  $x$  le pas du déplacement, et  $Z(x)$  l'altitude qui lui correspond pour une longueur de base  $L$ .

- La rugosité quadratique moyenne ou RMS (Root Mean Square)  $R_q$ , représente la déviation standard de la distribution des hauteurs des profils.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L Z^2(x) dx} \quad (1.4)$$

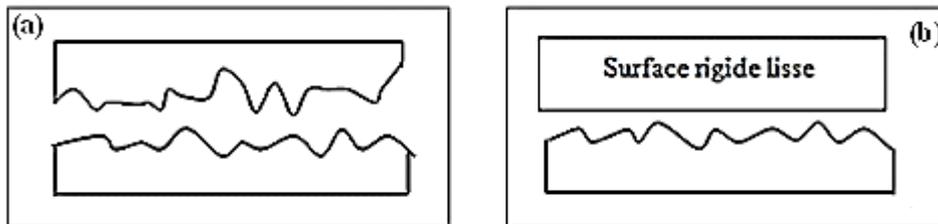
## 5.2 Caractérisation des états de surface

Lorsque deux surfaces rugueuses sont mises en contact sous une charge normale  $P$  (figure 1.10), elles se touchent en de nombreux points. Cependant, l'aire de ces microcontacts ne représente généralement qu'une faible portion de l'aire apparente du contact [28][29].



**Figure 1.10 :** Modèle du frottement des surfaces en contact

Le contact des deux surfaces (figure 1.11.a) est généralement modélisé par un contact équivalent, composé d'une surface rugueuse et d'une autre rigide lisse (figure 1.11.b).



**Figure 1.11 :** Modélisation d'un contact  
(a) Contact rugueux, (b) Contact équivalent

Pour une distance de séparation donnée des deux surfaces rugueuses, F. Robbe-Valloire et al. [30] ont déterminé une charge globale et une surface réelle de contact. Ce modèle a été retenu car il donne non seulement une description réelle du profil mais utilise également le concept de la surface somme.

Woo et Thomas [31], quant à eux, ont fait un inventaire sur les essais de contact rugueux. Ils remarquent que les différentes études expérimentales s'accordent sur quelques aspects :

- l'aire réelle de contact et le nombre des microcontacts qui augmentent avec la charge ;
- la distribution des dimensions des contacts est approximativement une fonction logarithmique ;
- la densité et les dimensions moyennes des microcontacts pour une même charge peuvent varier d'une surface à une autre.

### 5.3 Modélisation de la microgéométrie

Le contact dépend essentiellement de la microgéométrie des surfaces antagonistes et du comportement mécanique des solides. La description de la géométrie et de la répartition des aspérités des surfaces rugueuses est d'une importance capitale pour la modélisation et la bonne compréhension des mécanismes se produisant lors du contact.

Les formes d'aspérités les plus rencontrées dans la littérature, pour la modélisation des contacts, sont de type : sphérique, cylindrique, prismatique et ellipsoïdale. Kragelski [32] propose même des formes coniques et pyramidales.

Le modèle le plus utilisé dans la littérature, et qui a servi de base par la suite à plusieurs d'autres modèles, est celui de Greenwood et Williamson [33]. Il modélise le contact entre un plan et une surface rugueuse, avec des aspérités de forme sphérique, des rayons égaux et des hauteurs différentes.

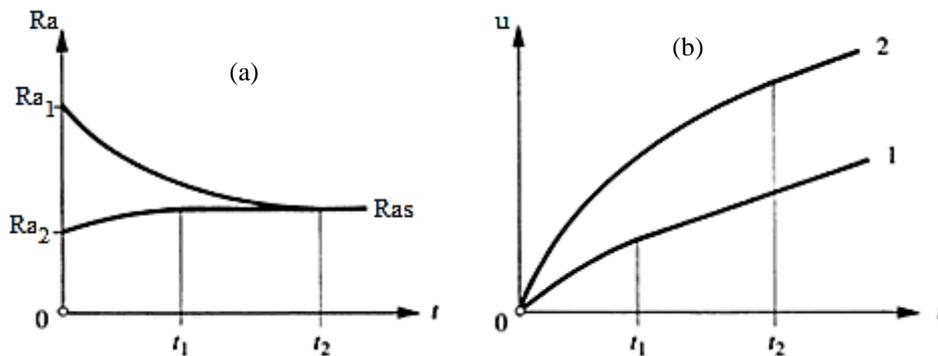
Plusieurs paramètres sont utilisés pour modéliser les problèmes de contact. On trouve ainsi dans les travaux de Greenwood [33] la définition et l'utilisation du rayon de courbure d'aspérités. De même, dans les travaux de Kragelski [34] et de Whitehouse et Archard [29], les fonctions d'auto-corrélation sont employées. Un certain nombre d'articles, comme les travaux de Bishop [35], Moalic [36] et Robbe-Valloire [37], ont montré l'intérêt de disposer de tels paramètres.

## 5.4 Modélisation des zones de contacts

La modélisation des contacts rugueux nécessite la connaissance d'une manière précise des zones de contact, et elle est souvent très délicate et pose divers types de problèmes. Robbe-Valloire & al. ont développé un modèle entre deux surfaces rugueuses, qui utilise une description statistique de la microgéométrie et comprend les distributions du sommet et du rayon [38]. En fonction de ces paramètres géométriques, chaque aspérité fonctionne avec l'un des cinq mécanismes de lubrification suivants : hydrodynamique piézo-visqueux, élastohydrodynamique, élastique, élastoplastique et plastique. Ce modèle est par la suite confronté aux résultats expérimentaux [39] et présente un bon accord sur une large gamme de paramètres (matériau, pression, vitesse de glissement, rugosité). Les différents modèles théoriques de base sont donnés en annexe 2.

## 5.5 Evolution de la rugosité avec l'usure

Après détérioration des surfaces par enlèvement de matière, la rugosité des surfaces rugueuses mises en contact frottant évolue vers une rugosité commune appelée rugosité de service [40]. La prédiction de cette dernière est très délicate, elle ne dépend ni de la dureté ni de la vitesse mais elle est inversement proportionnelle avec la pression du contact.



**Figure 1.12 :** Evolution de la rugosité et de l'usure durant le rodage  
(a) rugosité (b) usure [40]

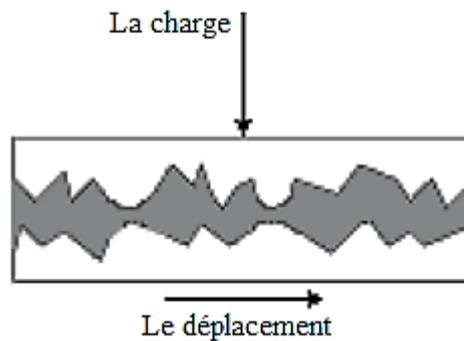
La figure 1.12.a, donne une évolution des rugosités des deux surfaces en contact glissant à une rugosité moyenne, tel que les aspérités de la surface rugueuse en état de déformation plastique sont écrasées et en partie arrachées de sorte que l'aire de contact réelle augmente progressivement. En revanche, la rugosité de la surface lisse augmente du fait du labourage par les aspérités de la surface antagoniste. Au bout d'un certain temps la

rugosité des surfaces se stabilise et tend vers la rugosité de service. Cette dernière est pratiquement indépendante de la rugosité initiale.

Quant à l'usure (figure 1.12.b), elle est beaucoup plus importante lorsque la rugosité initiale s'écarte de celle de service.

## 6. Les contacts lubrifiés

La lubrification consiste à interposer un film lubrifiant entre les surfaces frottantes d'un mécanisme pour faciliter le fonctionnement (figure 1.13). Le principal objectif de la lubrification est de réduire les frottements qui se manifestent lors d'un déplacement relatif de deux surfaces en contact, de façon à limiter les pertes d'énergie, les élévations de température et par conséquent de limiter l'usure. Elle s'appuie à la fois sur de nombreux domaines tels que la mécanique des fluides, la mécanique des milieux déformables, la thermique, la thermochimie, etc.



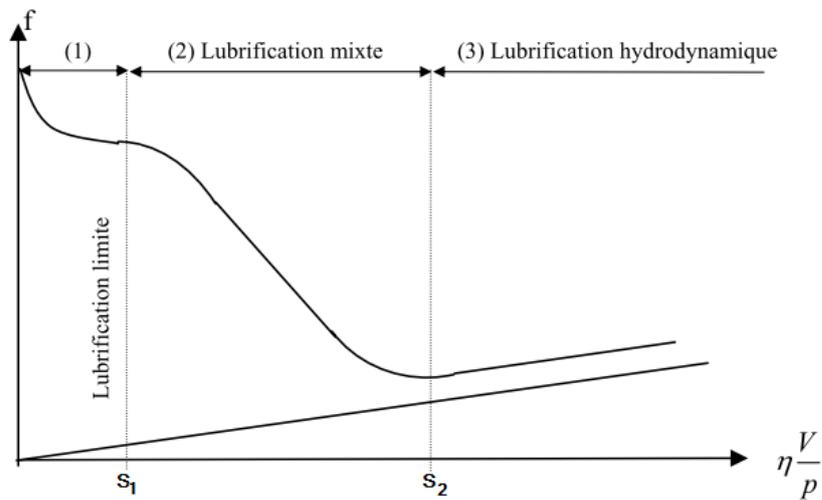
**Figure 1.13 :** Effet de la lubrification sur le déplacement des deux solides

Les lubrifiants peuvent être solides, liquides, ou sous forme de gaz suivant les conditions mécaniques et thermiques du procédé [14][41]. Cependant, les types des lubrifiants et leurs propriétés physicochimiques ne seront pas abordés dans notre étude et nous nous intéresserons qu'aux différents régimes de lubrification et leurs conditions d'existence.

## 7. Les régimes de lubrification (Courbe de Stribeck)

Le contact de deux surfaces en mouvement avec interposition d'un film lubrifiant est régi par le degré d'interaction des aspérités (la rugosité) et de l'épaisseur de ce film [42], cela définit trois régimes de lubrification qui sont représentés par la variation du frottement en

fonction du nombre de Sommerfeld ( $S = \eta v/p$ ), appelée la courbe de Stribeck (1902) (figure 1.14) [43]



**Figure 1.14 :** Courbe de Stribeck

Le passage d'un régime de lubrification à un autre s'accompagne d'une variation du coefficient de frottement. Or, ce dernier nécessite la définition de l'interface entre les deux corps en contact, surtout dans le cas où un film fluide est interposé entre eux. Cependant, une des difficultés rencontrée est de caractériser l'épaisseur du film lubrifiant par rapport à la rugosité de la surface. L'une des solutions a été apportée par la courbe de Stribeck, représentant la variation du coefficient de frottement non pas avec l'épaisseur du film, mais plutôt par le nombre de Sommerfeld. Cette courbe conserve toujours la même allure quel que soit la nature du contact lubrifié, comme indiqué par la figure 1.14. Nous remarquons sur cette figure que, pour un lubrifiant de viscosité donnée, le paramètre  $(v/p)$  est responsable de l'augmentation ou de la diminution du nombre de Sommerfeld ( $S$ ).

La courbe de Stribeck présente généralement trois zones distinctes (figure 1.14) :

➤ **Zone de lubrification limite**

Lorsque la valeur de  $S$  est inférieure à  $S_1$  et tend vers des valeurs très faibles, le coefficient de frottement ( $f$ ) ne varie que légèrement. Dans ce cas, on est en présence du régime de lubrification limite. Celui-ci s'établit lorsqu'on a un déplacement de surface à très faibles vitesses. Il est caractérisé par un film lubrifiant mince qui se rompt en raison des très fortes pressions générées lors du contact direct des aspérités. Dans ce régime, la charge est intégralement transmise par ces derniers, et il est considéré comme

étant le plus sévère, puisqu'il entraîne la détérioration quasi-systématique des surfaces. La présence du lubrifiant (même très mince) permet quand même le refroidissement du contact et l'évacuation des débris d'usure.

Dans les applications industrielles, on rencontre ce régime dans trois cas principaux : le démarrage d'une machine, la période de rodage ou une surcharge occasionnelle.

Le coefficient de frottement, associé à ce régime, présente une valeur intermédiaire entre celles du régime sec et mixte (de l'ordre de 0.1), et il est relativement constant. Le choix du lubrifiant a une grande influence sur le régime de lubrification limite. En effet, le lubrifiant doit former une couche adhérente aux surfaces qui permet de limiter les contacts entre elles.

➤ **Zone de lubrification mixte**

Lorsque la valeur de  $S$  est comprise entre les valeurs de  $S_1$  et  $S_2$ , le coefficient de frottement diminue rapidement, on est dans un régime de lubrification mixte. On admet que pour ce régime, la portance peut être en partie prise par les aspérités. Ce régime sera traité en détail dans le chapitre 2.

➤ **Zone de lubrification hydrodynamique ou élastohydrodynamique**

Lorsque la valeur de  $S$  est supérieure à la valeur de  $S_2$ , on atteint le régime hydrodynamique ou élastohydrodynamique, où les deux surfaces en mouvement sont séparées par un film d'huile complet. Dans ce régime, le film lubrifiant est suffisamment épais pour assurer une séparation complète des surfaces en contact, et de transmettre la charge. Le type de contact et l'intensité de la pression appliquée, ainsi que la viscosité du lubrifiant jouent un rôle déterminant dans ce régime, où on trouve :

- La lubrification hydrodynamique : souvent observée dans le cas des contacts surfaciques pour les faibles pressions et fortes vitesses. Ce régime est caractérisé par une épaisseur du film supérieure à dix fois la valeur moyenne quadratique de la rugosité des deux surfaces. L'équation de Reynolds [44] est la base de la théorie de la lubrification hydrodynamique.
- La lubrification élastohydrodynamique : ce régime concerne tous les contacts pour lesquels la pression du film lubrifiant est suffisamment élevée pour déformer élastiquement les surfaces, ce qui permet au processus hydrodynamique de se développer. Ce type de lubrification est rencontré surtout pour les contacts

Hertziens linéiques ou ponctuels. Le coefficient de frottement associé à ce régime fluide est très faible, de l'ordre de 0.01, et l'usure est quasi négligeable.

La transition de ce type de lubrification au régime mixte dépend d'une valeur critique  $\lambda$ , qui est en fonction non seulement de l'épaisseur du film mais aussi de la microgéométrie des surfaces. Ce paramètre est donné par [45][46]:

$$\lambda = \frac{h_{min}}{\sigma^*} \quad (1.5)$$

$\sigma^*$  : La rugosité moyenne composée des deux surfaces (Root Mean Square, *RMS*), elle est définie par :

$$\sigma^* = \sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2} \quad (1.6)$$

## 8. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions de la tribologie, ainsi que le concept du troisième corps qui permet d'éclaircir les phénomènes existants au niveau des premiers corps. Ces derniers reçoivent les sollicitations transmises par le mécanisme et y répondent par des transformations aussi bien en surface qu'en volume. Ce phénomène étant régi par le comportement des surfaces, nécessite la caractérisation de la microgéométrie des surfaces. Celle-ci a un impact direct sur le comportement à l'usure des surfaces lubrifiées, d'où la nécessité de connaître les différents régimes de lubrification qui ont été définis en fin de chapitre. Nous remarquons l'aspect prédominant des états de surface dans le comportement à l'usure en mode lubrifié qui sont responsables de l'apparition des différents régimes.

---

*Chapitre 2*  
*Usure des surfaces en contact lubrifié*

---

## 1. Introduction

L'usure est un phénomène et non une grandeur physique. Elle résulte d'un ensemble complexe de mécanismes qui sont souvent difficiles à interpréter. Son occurrence conduit inévitablement à des pertes de côtes et de formes, qui affecte le bon fonctionnement des pièces en service.

L'usure des systèmes tribologiques lubrifiés est fortement marquée pour les régimes limite et mixte. Plusieurs études ont été menées pour étudier ce domaine d'usure, surtout depuis qu'il a fait l'objet d'étude lors du 11eme symposium sur la tribologie en 1984 [47]. Les résultats de ces travaux montrent que le frottement et le taux d'usure dépendent principalement de la rugosité des surfaces, de la vitesse de glissement, de la nature du matériau, et de la viscosité du lubrifiant ainsi que de la force normale appliquée.

Les différents auteurs s'accordent sur l'influence des états de surface sur la performance du contact et la formation ou la décomposition du film lubrifiant [48]. Ce paramètre est responsable d'un côté du type et de la sévérité de l'usure, et d'un autre côté de la partition des deux modes locaux de la lubrification mixte, fonctionnant en régime limite et en film mince.

## 2. Evolution de l'usure

L'usure est une conséquence du frottement qui conduit à une dégradation progressive dans le temps, interprétée par l'estimation de la perte de masse au cours du temps. L'évolution de cette dernière présente généralement trois phases distinctes (figure 2.1).

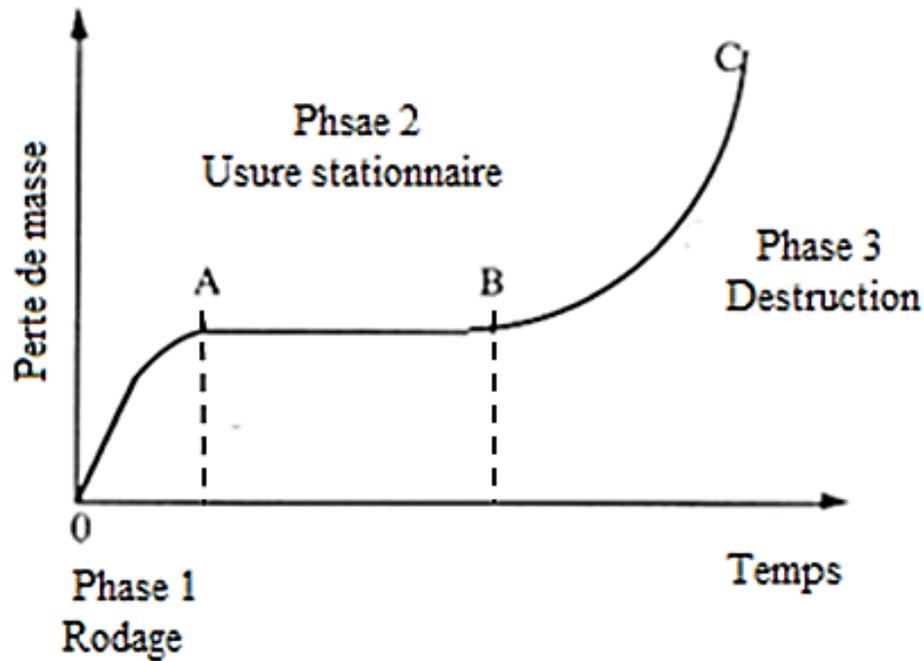


Figure 2.1 : Evolution de l'usure

- **La Phase 1** : correspond à l'adaptation des surfaces en contact souvent appelée phase de rodage. Elle est caractérisée par une diminution de la vitesse avec une augmentation de la quantité d'usure. Les couches superficielles des pièces en contact peuvent subir non seulement des pertes de poids mais aussi des déformations plastiques.
- **La Phase 2** : appelée régime d'usure stationnaire, correspond à l'utilisation normale de l'organe mécanique. Cette phase est caractérisée par une perte de masse faible, régulière et elle est sensiblement linéaire en fonction du temps.
- **La phase 3** : dite phase d'usure catastrophique ou usure grippante. Elle traduit la mise hors service du composant due à une usure exagérée, dont la vitesse augmente exponentiellement et tend à modifier les conditions nominales de fonctionnement. L'augmentation des jeux et des efforts peut conduire à la disparition des films lubrifiants, et par la suite à la détérioration des surfaces qui deviennent fragiles et rugueuses.

La quantification de l'usure fait appel à des lois empiriques dont quelques exemples seront présentés par la suite.

## 2.1 Les différents types d'usure

La détérioration des surfaces, dans les mécanismes, est provoquée généralement par un processus d'usure dont la principale particularité est le détachement des particules des premiers corps. En 1957, Burwell [49] a classifié les principaux types d'usure comme étant l'usure adhésive, abrasive, par fatigue et corrosive (ou tribochimique).

Les trois premiers types sont des processus mécaniques alors que le dernier est un processus chimique. A cela s'ajoutent des formes secondaires d'usure : corrosion de contact, usure par cavitation, usure d'origine électrique, etc.

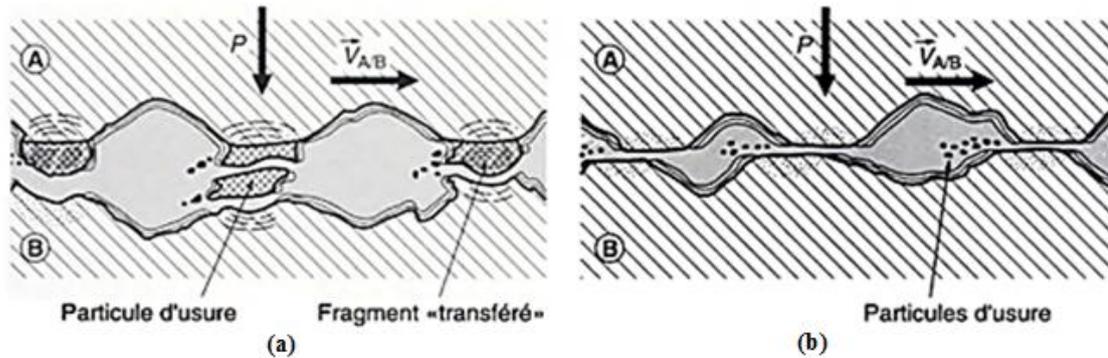
Ces phénomènes, repérés dans différents cas de contacts, peuvent se produire simultanément, et certains d'entre eux peuvent être prépondérants par rapport aux autres selon les conditions opératoires. D'autre part, ces phénomènes dépendent non seulement des conditions d'utilisation mais aussi d'autres facteurs, comme la nature des matériaux en contacts, les conditions d'utilisation ainsi que les états de surface.

## 2.2 Usure adhésive

L'usure adhésive est le type d'usure le plus fondamental. Elle est due au cisaillement par frottement des microsoudures ou jonctions qui se forment entre deux aspérités en contact direct [50]. Elle se manifeste par un transfert de matière d'une des deux surfaces en contact sur la surface antagoniste (de la face la plus tendre sur la plus dure). Elle est à la fois d'origine mécanique et physicochimique.

L'intensité de l'usure dépend principalement du type de liaison d'adhésion. En effet, dans le cas d'une liaison peu résistante le transfert de matière est limité, avec à un échauffement léger. Les particules détachées du contact, quant à elles, sont de très petites dimensions de l'ordre de  $100\text{Å}$ , on parle alors d'une usure douce. Par contre, l'usure sévère apparaît lorsqu'il y a arrachement de matière de l'une des surfaces, dont les débris sont des fragments métalliques de dimensions relativement importantes. Ce processus produit un échauffement important du contact. Cependant, la forme extrême de l'usure adhésive est caractérisée par des températures très élevées dans tout le volume, et un transfert intense

de matière conduisant à la détérioration des matériaux en contact. Ce processus est connu sous le nom de grippage.



**Figure 2.2** : Mécanisme de l'usure adhésive. (a) usure sévère, (b) usure douce

L'usure adhésive est surtout observée dans le cas de contact sec ou de lubrification insuffisante (mixte ou limite). Elle peut être minimisée par la réduction de l'échauffement de l'interface des surfaces en contact, en limitant les conditions d'utilisation (la distribution des pressions de contact, les vitesses de glissement) et en réduisant la rugosité des surfaces [51].

Le choix des matériaux utilisés joue à son tour un grand rôle dans le degré d'usure, où il est préférable d'utiliser des couples de matériaux possédant de faibles interactions (une faible énergie d'adhésion), appelés couples compatibles tribologiquement. Ces derniers sont formés par des métaux insolubles ou par ceux qui donnent formation à des composés intermétalliques à caractère chimique. Rabinowitch [52] propose une table de compatibilité des couples les plus utilisés (figure 2.3), tels que : bronze- acier, chrome-fonte, matériaux plastiques – métaux, etc. Cependant, la compatibilité tribologique des alliages métalliques n'est pas encore bien établie, et en général les alliages suivent le comportement du constituant principal.

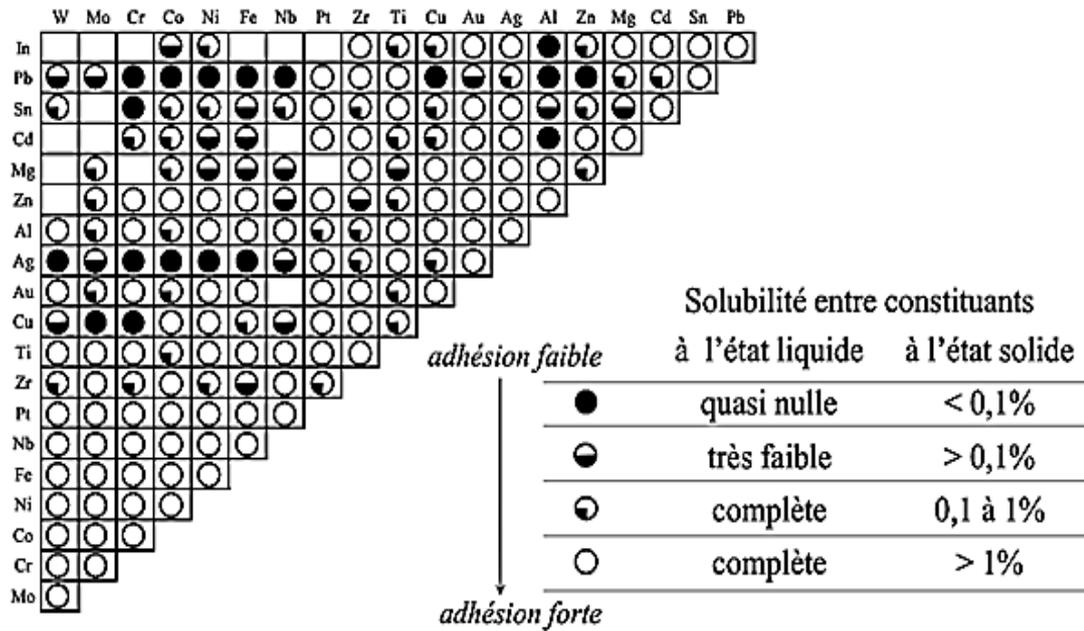


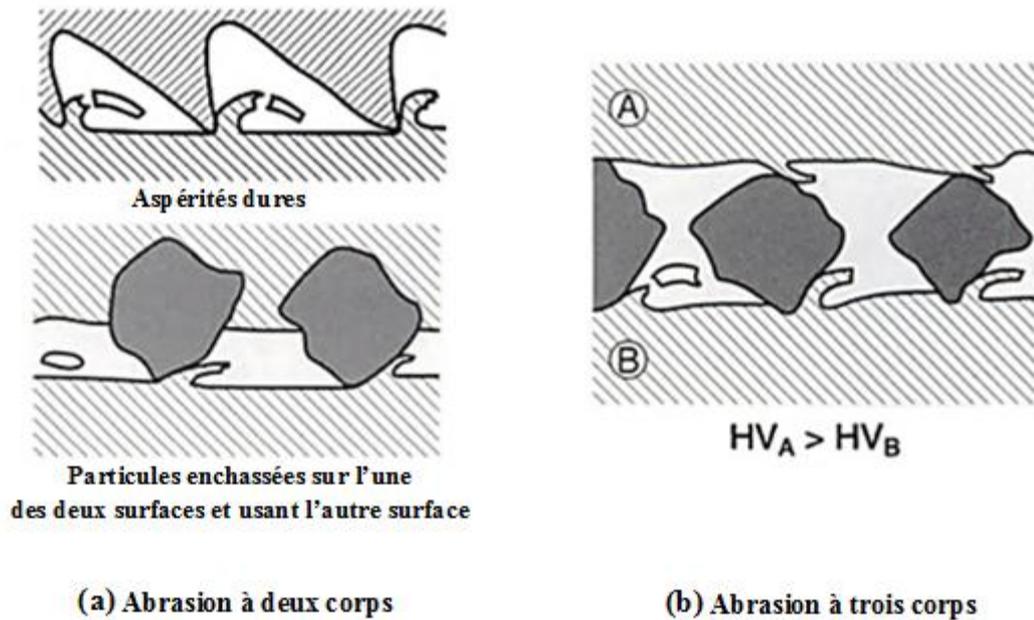
Figure 2.3 : Table de Rabinowitch [52]

D'autre part, la dureté des matériaux affecte aussi le processus d'usure, puisque les matériaux avec une grande dureté minimisent à la fois le taux d'usure et la grosseur des particules d'usure [52][53].

### 2.3 Usure abrasive

Elle consiste dans la dégradation des surfaces par déplacement ou enlèvement de matière sous l'action de particules dures. Ce mécanisme de dégradation fait intervenir en premier temps uniquement les corps antagonistes (figure 2.4.a). Il devient par la suite une usure avec un troisième corps (figure 2.4.b) qui provient des surfaces de contact ou de la pollution du milieu.

Cette forme d'usure se manifeste par des sillons formés parallèlement au sens de glissement, des micro-labourages, de griffures, par un effet de polissage ou des arrachements de particules. Elle peut provoquer ainsi des modifications marquées dans la structure et l'orientation des couches superficielles.



**Figure 2.4 :** Usure par abrasion (a) Abrasion à deux corps, (b) Abrasion à trois corps [54]

La résistance à l'usure abrasive dépend de la dimension du grain abrasif et de sa forme, de la charge appliquée, de la vitesse de glissement et de la structure du métal. Cette usure peut être diminuée en ayant recours à des matériaux durcis au moins en surface. Pour cela, des traitements thermiques de surface sont souhaités. Bien que l'usure abrasive soit connue pour ses aspects négatifs, elle présente tout de même un aspect positif recherché dans de nombreux procédés d'usinage par enlèvement de matière ou par polissage.

Ce type d'usure est affecté par l'épaisseur du film d'huile, la pollution du lubrifiant, la dimension et les formes des particules abrasives, ainsi que la rugosité des surfaces en contact.

## 2.4 Usure par fatigue

L'usure par fatigue est liée à l'action d'un mouvement cyclique et à la capacité des matériaux à absorber les énergies des déformations et les contraintes thermiques générées par frottement. Ce phénomène se manifeste par la formation et la propagation de fissures en profondeur qui remontent par la suite en surface. Ce mode de fissuration conduit à un détachement de matière qui provoque un fragment d'usure appelé « écaille », dont la taille peut atteindre le millimètre [55]. Ce fragment peut à son tour donner naissance à de l'abrasion à trois corps ou de l'érosion. Le site d'initiation de la fissuration dépend de l'homogénéité du matériau, de l'effort normal appliqué et de la sévérité des contraintes

tangentielles induites par le glissement. Ce type d'usure peut aussi se manifester par des changements de structure métallurgique du matériau. Il est particulièrement fréquent dans le cas du frottement sec et des matériaux céramiques.

### 2.5 Usure corrosive ou tribochimique

Elle consiste dans l'apparition d'un processus chimique lorsque le frottement a lieu dans un environnement réactif. Deux cas peuvent se présenter : la formation du film réactionnel et sa destruction par frottement, formant ainsi des débris de caractère stables et durs. Ces derniers jouent alors un rôle abrasif et viennent dégrader les surfaces antagonistes et donc entretenir l'usure. D'un autre côté, on peut rencontrer une configuration moins agressive suite à l'oxydation de ces débris. Celle-ci peut conduire à la formation d'un film d'oxydes, de faible épaisseur, adhérent à la surface de l'un des antagonistes et qui joue un rôle protecteur contre l'usure adhésive. La cinétique de ce phénomène est gouvernée par la compétition entre la formation du film réactionnel et sa destruction par frottement.

### 3. Approche quantitative de l'usure

L'étude des différents types d'usure montre que leurs mécanismes associés peuvent être très variés par leurs conditions d'apparition et par leurs effets. L'étude prédictive de l'usure, quant à elle, dépend à son tour du type d'usure et fait intervenir des paramètres propres aux matériaux (ductilité, limite élastique, dureté, ...) et des paramètres de fonctionnement (vitesse, géométrie, charge,...). Ces paramètres peuvent évoluer durant le processus d'usure ce qui rend encore plus difficile sa quantification.

Afin de pouvoir quantifier ce phénomène, l'usure a été largement étudiée durant ces dernières décennies et plusieurs modèles ont été développés. Cependant, aucune de ces lois n'est générale et la plupart d'entre elles ont été développées pour des conditions bien spécifiques. H.C. Meng et K.C. Ludema ont recensé dans la littérature plus de 300 lois relatives au frottement et à l'usure [18]. Ils ont proposé par la suite une classification chronologique de ces lois en trois catégories :

- Les lois à caractère empirique, qui ont vu le jour entre les années 1950 et 1970. Elles prennent en compte principalement des paramètres relatifs aux conditions de tests. Barwell [56] propose une loi où le taux d'usure est identifié par le volume d'usure ( $V$ ) exprimé en fonction du temps. Rhee [57] propose une loi d'usure sur

la masse perdue où interviennent l'effort normal, la vitesse de glissement et des coefficients empiriques. Ces lois sont bien précises mais ne sont valables que pour les tests où elles ont été établies.

- Entre les années 1970 et 1980 sont apparues les lois basées sur la mécanique du contact. Certaines d'entre elles tiennent compte des propriétés des matériaux en contact, comme leur module de Young ou bien leur dureté, qui ont un impact sur la cinétique d'usure.
- Enfin, depuis les années 1980 les lois basées sur les mécanismes d'endommagement (mécanique de la rupture) se sont développées. Elles incluent les mécanismes de dislocations, les propriétés en fatigue et la rupture en cisaillement.

#### 4." Loi d'Archard

En 1953, Archard a étudié le phénomène de l'usure de plus près et a établi l'une des lois les plus usuelles, en se basant sur les travaux antérieurs de Holm (1946) [53][58][16]. Une loi empirique qui permet d'estimer la perte de masse du matériau usé dans le cas d'un contact de glissement pour des matériaux de dureté très différente. Cette loi est basée sur le fait que le contact des surfaces ne se fait que par un nombre réduit d'aspérités, réparties aléatoirement sur la surface (surface réelle de contact). D'autre part, ces aspérités doivent supporter la charge et maintenir les déformations dans le domaine d'élasticité.

La forme la plus courante de la loi d'Archard est exprimée en fonction d'un coefficient d'usure  $k$  sans dimension, de la force normale appliquée  $F_N$ , de la distance de glissement  $L$  et de la dureté du matériau le plus mou  $H$ . Ce modèle de base a été appliqué initialement dans le cas de l'usure adhésive à sec [59], et s'exprime comme suit :

$$V = k \frac{F_N \cdot L}{H} \quad (2.1)$$

Il a été montré que la loi d'Archard peut être étendue à d'autres mécanismes, notamment celui de l'abrasion. Moyennant une redéfinition de certains paramètres, l'équation précédente peut s'écrire :

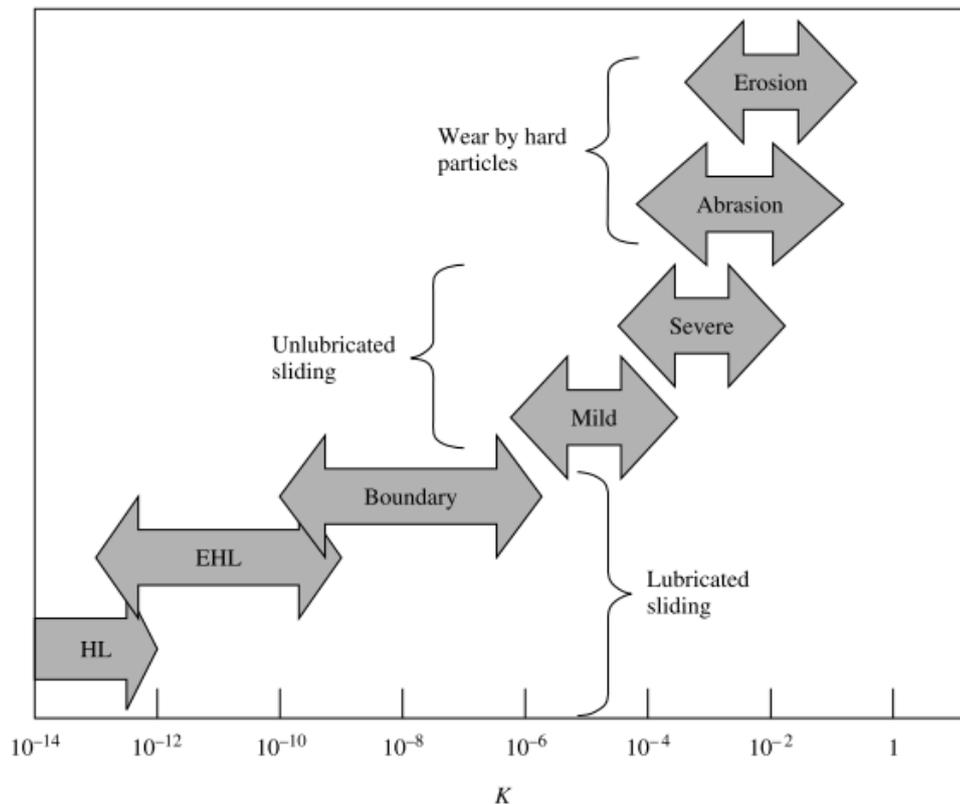
$$V = KF_N L \quad (2.2)$$

Où  $K$  est un coefficient d'usure souvent exprimé en  $mm^3 N^{-1} m^{-1}$ .

Ce coefficient, dont la valeur ne dépasse pas l'unité, nous donne une indication sur l'amplitude du phénomène (usure sévère - usure modérée) et il n'est obtenu que par le biais de l'expérience (figure 2.5).

Les faibles valeurs du coefficient d'usure  $K$  sont obtenues pour les conditions de glissement lubrifié, où on a une faible proportion d'aspérités en contact. Alors que dans les conditions de glissement non lubrifié,  $K$  peut varier de  $10^{-6}$  à  $10^{-2} mm^3 N^{-1} m^{-1}$  et atteint son maximum dans les conditions de régime sévère.

Ce coefficient est différent pour chacun des corps en contact et dépend des conditions géométriques et thermodynamiques [60].



**Figure 2.5 :** Valeurs du coefficient d'usure  $K$  présentées pour différentes conditions d'usure.

HL = lubrification hydrodynamique ;  
EHL = lubrification élastohydrodynamique [53]

Une forme dérivée de la première loi d'Archard fait intervenir l'énergie dissipée dans le contact par le biais du produit  $PV$  (pression x vitesse de glissement), qui est proportionnelle à la vitesse d'usure  $dh/dt$  ( $h$  étant la profondeur de la piste d'usure).

$$\frac{dh}{dt} = a.P.V \quad (2.3)$$

En 1984, Frick a donné une forme plus simplifiée de la loi d'Archard, en introduisant le concept du travail d'usure, soit  $W = F_T.L$  ce qui conduit à la relation suivante :

$$V = K.W \quad (2.4)$$

Ces modèles, conçus à partir d'expériences simples en utilisant souvent des tribomètres de type pion-disque, nécessitent des sollicitations simples pour l'étude de l'usure. Mais à cause de la diversité des mécanismes contenant le contact, qui offrent souvent des sollicitations variables et multidirectionnelles, la mise en œuvre d'une loi d'usure universelle reste difficile à établir. Il est plus adapté d'associer un modèle d'usure à un type de dégradation afin de limiter le nombre de paramètres et de conserver une loi aisément utilisable en laboratoire.

## 5. Carte d'usure

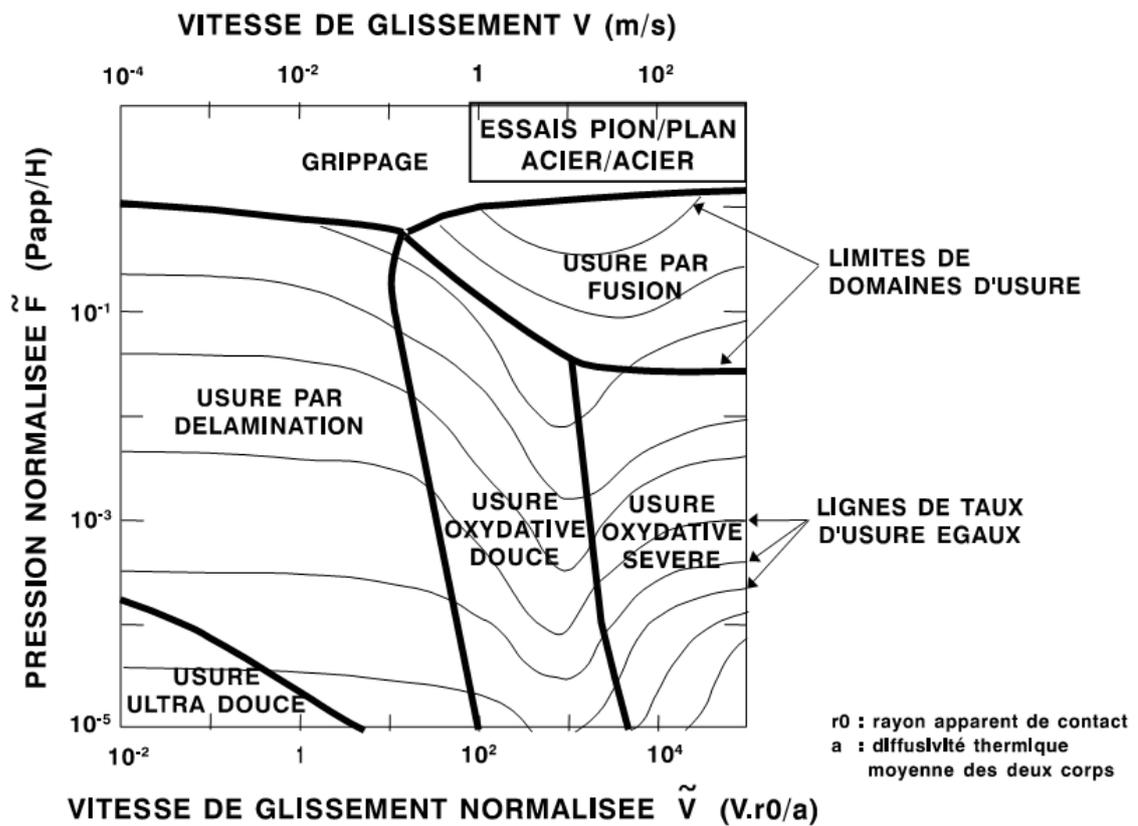
Afin de mieux comprendre les relations relatives entre les différents modes d'usure, le concept de « la carte usure » a été introduit. En 1987, Lim et Ashby [61][62] ont tenté de regrouper sur une carte d'usure (figure 2.6), tous les résultats des essais obtenus sur des tribomètres de types pion-disque, et des modèles théoriques recueillis à partir de la bibliographie. Cette carte fournit la vitesse et le régime de prédominance de chacun des mécanismes d'usure sèche. Cette méthode établie aux aciers glissants, pour une large gamme de vitesses de frottement et de pressions normales, a été ensuite étendue pour d'autres matériaux avec différentes sollicitations de contact et différentes conditions environnementales.

Pour pouvoir comparer les résultats de différents auteurs, travaillant avec des éprouvettes de dimensions et de nuances variables, les grandeurs utilisées en abscisses et en ordonnées ont été adimensionnées. L'abscisse utilisée est la vitesse adimensionnée, exprimée en fonction de la vitesse de frottement, du rayon de contact et de la diffusivité du pion ( $a$ ).

$$\tilde{V} = \frac{Vr_0}{a} \quad (2.5)$$

L'ordonnée correspond à la pression adimensionnée exprimée par :

$$\tilde{P} = \frac{P_{app}}{H} \quad (2.6)$$



**Figure 2.6 :** Carte du mécanisme d'usure pour un contact pion (acier)/disque (acier) à sec [61]

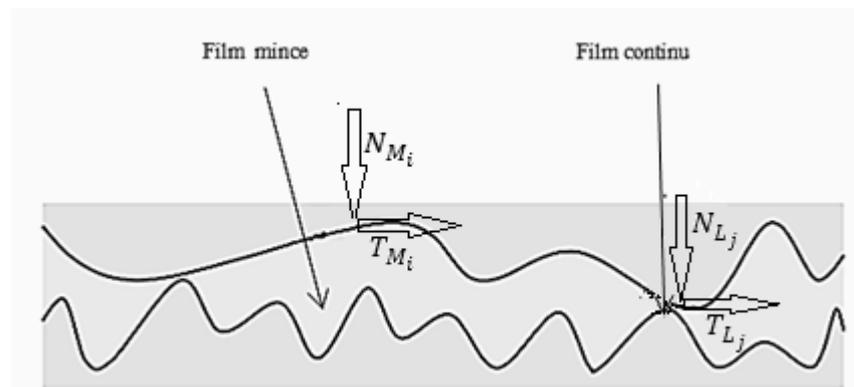
Sur cette carte, on distingue plusieurs zones correspondant à la prédominance de chacun des mécanismes d'usure classiques. Les frontières indiquées en gros traits sur la carte sont les lignes où deux mécanismes ont des actions égales. Les lignes correspondant aux "isotaux d'usure" sont tracées en plus fin sur la carte, les valeurs données pour chaque ligne sont sans dimension. Pour des valeurs suffisamment élevées de la charge et de la vitesse adimensionnées, on a une zone que les auteurs ont appelé zone d'usure par liquéfaction. C'est dans cette zone que se situent les phénomènes de frottement à grande vitesse. Le domaine d'usure par oxydation correspond à l'apparition d'une couche d'oxyde à

l'interface, et celui de l'usure par liquéfaction correspond à la formation d'une couche de métal liquide. Selon les auteurs, on a grippage quand la surface de contact réelle est égale à la surface de contact apparente.

Toutefois, cette manière de présenter les résultats apparaît extrêmement intéressante, mais cela ne doit pas masquer le fait que le comportement tribologique d'un couple de matériaux n'est pas intrinsèque. Il peut dépendre de plusieurs paramètres (raideur du contact imposé par le banc d'essai, disposition horizontale ou verticale du contact pion-disque...) qui ne sont pas pris en compte et se révèlent importants sur l'usure.

## 6. Comportement au frottement et à l'usure en lubrification mixte

Le régime de lubrification mixte est caractérisé par la coexistence, dans le contact, de deux modes locaux de lubrification limite et en film mince continu (figure 2.7). La présence de ces derniers est due principalement à la rugosité, qui est à l'origine des variations géométriques de la morphologie de l'interface entre les deux pièces en contact. A cet effet, le comportement de frottement et de l'usure présente une certaine particularité dans l'interface, telles que les valeurs varient dans un large domaine en fonction de la proportion de ces deux modes locaux, toute en conservant un comportement fiable et durable.



**Figure 2.7 :** Régime de lubrification mixte

Le coefficient de frottement global est exprimé par la relation :

$$f = (1 - \Phi)f_M + \Phi f_L \quad (2.7)$$

Avec

$$\Phi = \frac{N_L}{F_N} \quad (2.8)$$

La grandeur  $\Phi$  représente la fraction de force transmise par les zones travaillant en film limite. On retrouve le frottement limite lorsque  $\Phi$  tend vers 1 et le frottement du régime en film mince continu quand  $\Phi$  tend vers 0.

Le coefficient d'usure global, quant à lui, est déduit de la loi d'Archard généralisée sur l'ensemble des sites dans le contact (sites avec film mince continu et sites avec film limite). Il est similaire à celui du frottement et s'exprime par :

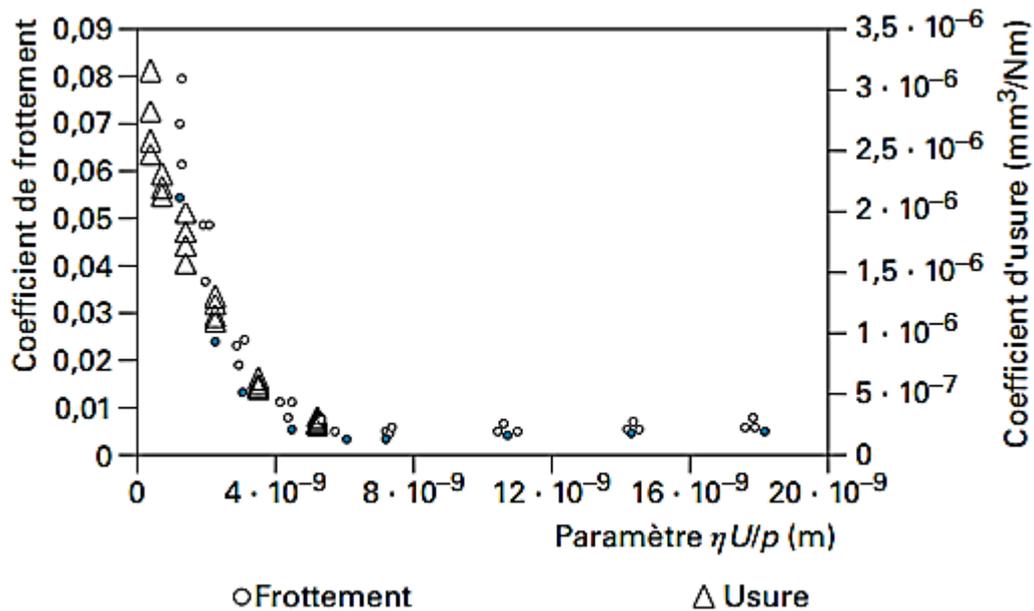
$$k = k_M (1 - \Phi) + k_L \Phi \quad (2.9)$$

$k_M$  et  $k_L$  présentent respectivement les coefficients d'usure moyens des modes de lubrifications en film mince continu et en film limite.

Vu que le taux d'usure lié au régime en film mince ( $k_M$ ) est souvent négligeable par rapport à celui du régime limite ( $k_L$ ), le coefficient d'usure globale dans le régime de lubrification mixte devient :

$$k = k_L \Phi \quad (2.10)$$

On retrouve expérimentalement, dans le régime de lubrification mixte, une évolution similaire du coefficient de frottement et du taux d'usure en fonction du paramètre de Sommerfeld  $\frac{\eta V}{P}$  (figure 2.8) ce qui est conforme aux relations (2.7) et (2.10).



**Figure 2.8** : Evolution de l'usure et du frottement dans le régime de lubrification mixte [13]

La prise en compte de la rugosité est faite de manière empirique par Emmens [63] et Felder [64], par l'introduction de nouveaux paramètres de rugosité au paramètre traditionnel de Sommerfeld  $\frac{\eta V}{P}$ .

Dans le cas de faibles pressions de contact, Emmens [63] a représenté la courbe de Stribeck en fonction du paramètre  $H_e$ , qui relie le paramètre de Sommerfeld avec  $R_p$  (l'altitude du point le plus élevé du profil par rapport à la ligne moyenne).

Ce paramètre reste homogène à une longueur et il est donné par :

$$H_e = \frac{\eta V}{p R_p^2} \quad (2.11)$$

D'autre part, Felder [64] a proposé un autre paramètre adimensionnel  $H_f$  qui s'écrit

$$H_f = \frac{3\eta V l}{p R_a^2} \quad (2.12)$$

Avec  $R_a$  : La moyenne arithmétique des sommets du profil

$l$  : La distance entre deux aspérités consécutives.

Ces deux approches utilisent des paramètres de rugosité calculés sur l'ensemble du profil. Sur la base de leurs expériences, l'utilisation de ces paramètres permet d'avoir une courbe expérimentale comparable à la courbe maitresse de Stribeck.

## 7. Conclusion

Nous constatons dans l'étude de l'usure la prédominance d'un certains nombres de paramètres. Ainsi, le choix du matériau est un élément déterminant dans le processus de l'usure, et ce par sa nature microstructurale et la compatibilité tribologique du couple de matériaux. Toutefois, le choix du matériau n'est pas le seul élément qui contrôle l'évolution de l'usure, étant donné que cette dernière s'opère qu'au niveau des surfaces de contact. Dès lors, la dureté de la couche superficielle, l'épaisseur du film lubrifiant et la rugosité des surfaces en contacts sont des éléments qui affectent considérablement le taux d'usure.

L'usure en lubrification mixte met en évidence la rugosité de la surface, qui est l'élément contrôlant la partition des deux modes locaux fonctionnant en régime limite et en film mince. Cette partition se retrouve aussi dans l'expression des coefficients de frottement et d'usure, puisqu'ils sont composés de deux termes : l'un dépend de la contribution du régime limite et l'autre du film mince.

---

*Chapitre 3*  
*Caractérisation du laiton et du bronze*

---

## 1. Introduction

Le cuivre et ses alliages sont des matériaux qui trouvent un large domaine d'application dans le secteur industriel. En effet, le cuivre lui-même est caractérisé par une bonne conductivité électrique et thermique, et une résistance à la corrosion supérieure à la moyenne. Dans le domaine de la mécanique, on ne peut pas utiliser le cuivre pur vu sa non usinabilité. De ce fait, il est associé au zinc pour des concentrations allant de 5 à 45% afin d'obtenir la famille des laitons, qui possède de bonnes propriétés mécaniques associées à une bonne résistance à la corrosion.

Pour améliorer certaines propriétés du laiton, exigées dans la fabrication de nombreux composants de l'industrie électrique, de l'automobile et de la fabrication de vannes et accessoires, d'autres éléments d'addition sont ajoutés en faibles proportions, tels que : le plomb, l'étain, le manganèse, l'aluminium, le silicium, le fer et le nickel. Ces éléments ont tous un effet sur la solubilité du zinc dans le cuivre et l'amélioration des propriétés inhérentes de cet alliage [65][66].

Lorsque le cuivre est associé à l'étain, on obtient du bronze auquel on peut additionner du phosphore pour améliorer ses caractéristiques mécaniques. Les bronzes, contenant environ 10% d'étain, étaient probablement les premiers alliages à être utilisés par l'homme [67]. Ils présentent une bonne tenue à la corrosion, de bonnes propriétés de frottement leur assurant une grande résistance à l'usure et des caractéristiques mécaniques élevées, et ils sont utilisés surtout en fonderie grâce à leurs bonnes propriétés de moulage.

Dans la pratique, on utilise uniquement les bronzes avec une teneur en étain ( $Sn$ ) qui n'excède pas 12 %, car les alliages les plus riches en étain sont très fragiles. Bien que de nombreuses études ont été menées pour étudier et améliorer les propriétés de ces matériaux, le comportement au frottement et à l'usure de ces alliages n'a jamais été clairement établi [68].

## 2. Comportement au frottement et à l'usure des alliages de cuivre

La compréhension du comportement au frottement et à l'usure des matériaux a été une grande préoccupation scientifique. Le fait que le frottement et l'usure des pièces

mécaniques lors du glissement sont très sensibles aux propriétés des matériaux et aux conditions opératoires, il devient nécessaire d'examiner les principaux facteurs responsables du contrôle de la résistance à l'usure.

Parmi les alliages de cuivre qui ont pris une large utilisation industrielle, spécialement dans les applications d'automobiles et de machines, on trouve le bronze et le laiton qui sont souvent utilisés dans la fabrication des roulements à billes, des coussinets,... [69]. Le choix de ces matériaux est dû à leurs bonnes caractéristiques de conductivité thermique et électrique, leur propriété d'autolubrification due aux éléments d'alliage et leur bonne résistance à la corrosion [70]. Rapoport et al. [71] et Gronostajski et al. [72] ont trouvé un coefficient de frottement d'environ 0.08 pour les paliers en bronze. Türk et al.[73], quant à eux, ont trouvé un coefficient de frottement de 0.25 avec un taux d'usure de 25 mg/km pour les roulements en bronze dans les conditions de lubrification, avec une vitesse de glissement de 0.5 m/s et 30 N de charge. Ils ont constaté que le taux d'usure croît avec l'augmentation de la charge appliquée et diminue avec l'augmentation de la distance de glissement.

J.P. Davim [74] a étudié le comportement du laiton contre l'acier à sec avec un tribomètre pion disque. Il a montré que le frottement et l'usure sont sensiblement affectés par la charge appliquée, la vitesse de glissement et la température.

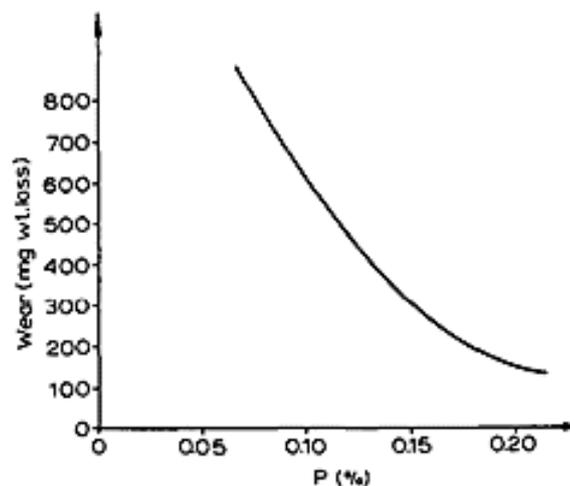
T. Küçükömeroğlu et al.[68] ont étudié le comportement au frottement et à l'usure en glissement de l'alliage CuZn39Pb3 en conditions atmosphérique et sous vide, avec une vitesse de 1 m/s et une pression de 0.3, 1, et 2 MPa. Ils ont constaté, d'un côté, que l'augmentation de la pression appliquée a considérablement augmenté l'usure de l'alliage dans les conditions atmosphériques. D'un autre côté, l'augmentation de la pression de contact entraîne une déformation plastique sévère, avec apparition d'une sous-couche de structure granulaire fine.

B.K. Prasad et al. [75] ont montré dans leur étude comparative de l'usure par glissement en lubrification mixte, d'un alliage à base de zinc et les bronzes conventionnels pour palier, que le taux d'usure augmente avec la vitesse et la pression, et qu'une faible modification de ces paramètres affecte fortement la réponse au frottement et à l'usure du matériau. D'autre part, ils ont constaté que les résultats obtenus en présence de lubrification sont meilleurs comparés à ceux obtenus pour un contact sec.

L'usure des matériaux étant localisée principalement à la surface, un grand intérêt c'est porté alors sur l'ingénierie de surface, qui offre beaucoup d'amélioration à la résistance à l'usure du cuivre et ces alliages, tout en laissant les propriétés en volume relativement inchangées. Dans cette optique, beaucoup d'études [76][77][78] ont été menées sur la caractérisation microstructurale des couches superficielles, et qui ont permis une meilleure compréhension du comportement à l'usure.

D'un autre côté, la résistance à l'usure des alliages de cuivre dépend du type d'alliage, de ses propriétés mécaniques et de la rugosité de l'antagoniste. Dans le cas du laiton, on trouve que la résistance à l'usure est fortement influencée par sa structure et ses éléments d'alliage. Ces derniers ne participent pas tous de la même manière dans le phénomène de l'usure. Une bonne résistance à l'usure est obtenue avec une teneur en zinc supérieure à 30%, alors que l'addition de petites quantités d'éléments (~ 2%), tels que : l'étain, le plomb ou le phosphore, améliore cette résistance à l'usure [14].

On trouve aussi, dans le cas des bronzes au plomb, au phosphore ou au manganèse, une moindre aptitude au grippage que les laitons et un faible taux d'usure. Daniel et Graham ont trouvé que l'usure du bronze diminue avec l'augmentation de la teneur du phosphore, figure 3.1, et qu'elle ne dépend pas de celle de l'étain [79].



**Figure 3.1** Variation de l'usure en fonction de la teneur du phosphore [79]

En étudiant l'usure d'un alliage de zinc, Prasard [75] montre que l'analyse des débris générés lors de l'usure contribue à la bonne compréhension des mécanismes impliqués dans le processus d'usure.

### 3. Effet de la microstructure sur le comportement à l'usure des matériaux

A l'échelle microscopique, les caractéristiques mécaniques d'un alliage ont pour origine l'interaction entre le mouvement des dislocations et leur «environnement» microstructural (structure cristallographique, particules de secondes phases, etc.). A titre d'exemple, la ductilité intrinsèque du cuivre s'explique par sa structure cristallographique cubique à face centrée (c.f.c), qui possède le plus de directions denses et selon lesquelles le mouvement des dislocations est facilité.

Afin d'améliorer le comportement mécanique d'un alliage, plusieurs techniques sont utilisées pour modifier ses propriétés et répondre aux exigences d'une application spécifique. Ces techniques consistent à gêner le mouvement des dislocations sans totalement l'entraver au risque d'obtenir un alliage fragile. Les traitements thermiques représentent une solution des plus intéressantes, qui permettent les transformations de phase à l'état solide afin de modifier la microstructure de l'alliage et de freiner le mouvement des dislocations [80][81].

#### 3.1 Présence d'une seconde phase

La présence d'une seconde phase dans un matériau affecte considérablement ses propriétés. La réponse du matériau à la présence d'une phase dure dépend de la dimension de celle-ci en comparaison avec la déformation causée par les particules abrasives. Lorsque la seconde phase a une dimension inférieure à celle de la déformation causée par usure, elle ne peut pas empêcher la coupe ou le labourage du matériau. Par contre, si la phase a une dimension supérieure à celle de la particule abrasive sa présence dans le matériau peut avoir un effet bénéfique sur la résistance à l'usure.

La résistance à l'usure des laitons est fortement influencée par la structure et les éléments d'alliage [82][83][84]. Une bonne résistance à l'usure est constatée dans le cas des alliages de cuivre à teneur en zinc supérieure à 30%. Les structures monophasiques de type  $\alpha$ , plus déformables, sont moins favorables que les structures biphasiques  $\alpha + \beta$ .

### 3.2 Influence de la taille des grains

L'usure du laiton et du bronze dépend de la taille, de la structure et de la composition des phases de l'alliage. Les travaux de Daniel et Graham ont montré que le bronze à l'étain, avec une taille des grains fine, présente une résistance à l'usure supérieure à celui ayant une taille grossière des grains [79].

De même F.A. Sadykov [83] a mené une étude sur l'influence de la taille des grains sur l'intensité de l'usure dans le cas du cuivre, du laiton et du bronze (figure 3.2). L'auteur montre que pour le laiton et le bronze l'intensité d'usure augmente avec la taille des grains, ce qui n'est pas le cas du cuivre. Cela implique que la résistance à l'usure ne dépend pas seulement de la taille des grains mais peut être liée à d'autres paramètres structurels et aux propriétés mécaniques du matériau.

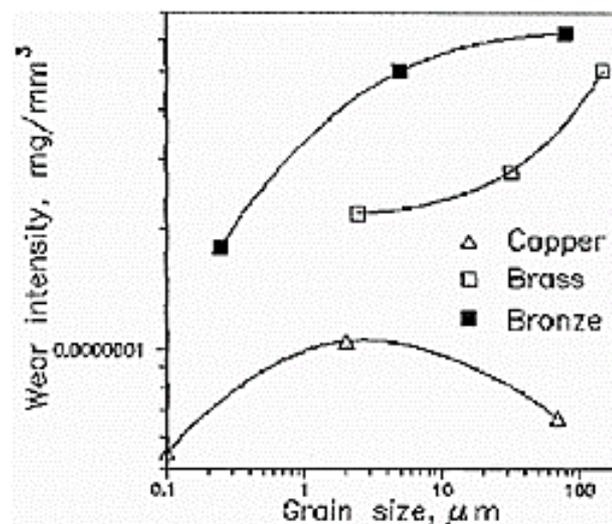


Figure 3.1 : Dépendance de l'intensité d'usure de la taille des grains du cuivre, laiton et bronze [83]

## 4. Caractérisation des matériaux d'étude

Nous nous intéresserons à la caractérisation de deux alliages de cuivre, le premier est le laiton défini par sa composition  $\text{CuZn39Pb2}$  et le second est le bronze défini par sa composition  $\text{CuSn9P}$ .

#### 4.1 Caractérisation du laiton $CuZn39Pb2$

Le laiton utilisé pour la réalisation de nos échantillons est de type  $CuZn39Pb2$ , qui contient 39% de zinc et 2% de plomb. D'après le diagramme de phase Cu-Zn (figure 3.3), ce type de laiton est de nature biphasé. Une phase  $\alpha$  qui est une solution de zinc dans le cuivre, riche en cuivre et d'une structure cubique face centrée (CFC). Une deuxième phase  $\beta$ , correspondant à la matrice, a une teneur en zinc plus élevée avec un réseau cubique centrée (figure 3.4). Cette dernière phase se manifeste aux températures élevées et se caractérise par une distribution désordonnée des atomes. Aux températures inférieures à  $454 \sim 468^\circ C$ , la disposition des atomes de cuivre et de zinc dans cette phase devient ordonnée et la phase  $\beta$  est alors notée  $\beta'$ . Celle-ci est plus dure et plus fragile. Des particules de plomb peuvent être observées dans les phases et plus particulièrement à l'interface des phases  $\alpha/\beta$

La phase  $\alpha$  se caractérise par une bonne ductilité et une aptitude à la déformation à froid, alors que la phase  $\beta$  est dure et fragile permettant ainsi, l'augmentation de la dureté du matériau et favorisant le fractionnement des copeaux.

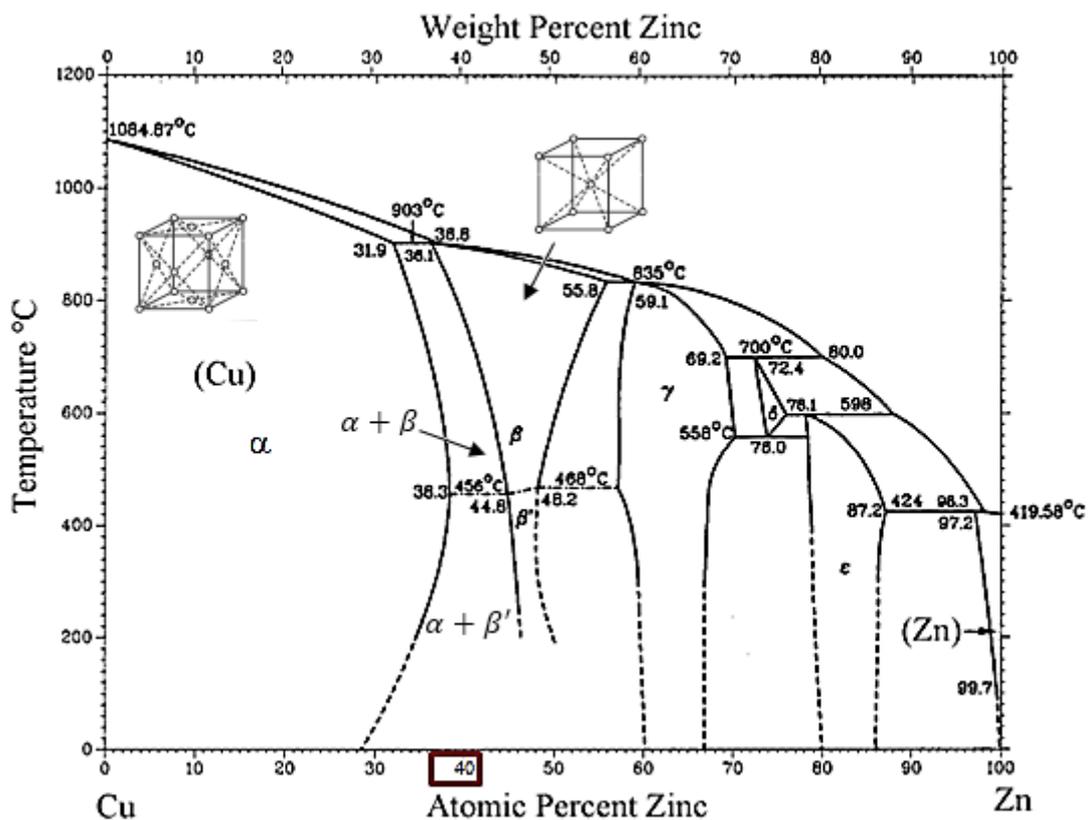
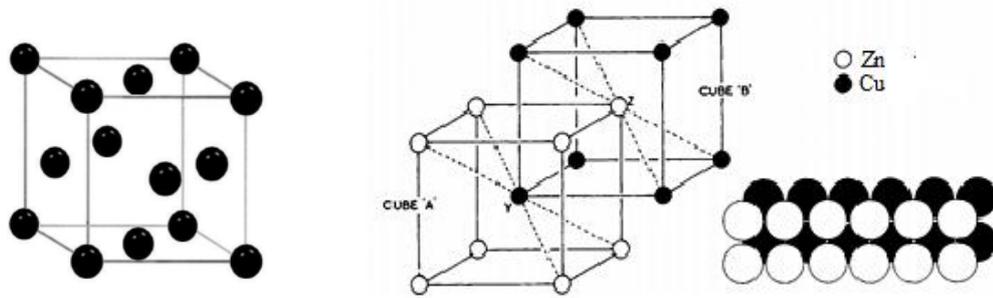


Figure 3.3 : Diagramme de phase du système Cuivre-Zinc



**Figure 3.4** : La structure cristalline (a) de la phase  $\alpha$  (CFC) (b) de la phase  $\beta'$ (CC)

Les principaux paramètres du laiton sont présentés dans le Tableau 3.1 :

Paramètres		Valeur	Unité
Dureté	$HV$	170	Vickers
Masse volumique	$\rho$	8.45	$g/cm^3$
Module de Young	$E$	107	GPa
Limite élastique	$\sigma_y$	300	MPa
Résistance mécanique à la rupture	$R_m$	430	MPa
Coefficient de Poisson	$\nu$	0.31	--
Allongement	$A\%$	8	--

**Tableau 3.1** : Propriétés du laiton

Différents travaux ont montré que la plupart des propriétés physiques des laitons sont influencées par la teneur du zinc. L'addition du plomb (jusqu'à 3%), contrairement aux autres éléments d'addition, ne modifie pratiquement pas les propriétés du laiton. Le plomb est soluble dans le laiton fondu mais précipite aux limites des grains pendant la solidification, formant généralement des particules de 1 à 10  $\mu m$  de diamètre [66][85]. Il favorise ainsi la fragmentation des copeaux lors de l'usinage. De plus, il intervient en tant que lubrifiant en raison de son bas point de fusion, comme c'est indiqué dans les travaux de N. Gane [86] pour un frottement en glissement sec, où le coefficient de frottement est passé de 0.62 pour un laiton ( $\alpha/\beta$ ) sans plomb à 0.32 avec le plomb. En fait, le plomb

forme une phase discontinue sur tout le matériau et permet la diminution du coefficient de frottement entre la pièce et l'outil, et de réduire par conséquent leur usure.

L'analyse métallographique du pion en laiton ( $CuZn39Pb2$ ) montre la présence des deux phases (figure 3.5) :  $\alpha$  constituée de dendrites claires riches en cuivre et  $\beta$  qui apparaît en brun foncé. Les taches noires observées sur la photographie représentent le plomb.

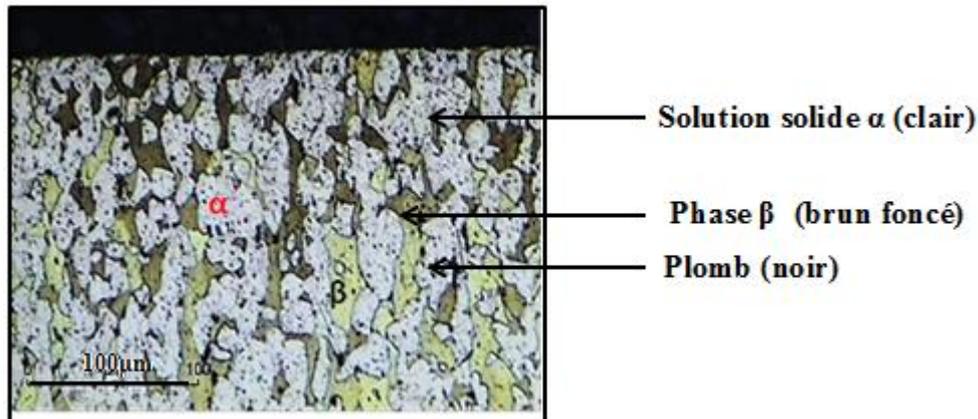


Figure 3.5 : Analyse métallographique du laiton

#### 4.2 Caractérisation du bronze $CuSn9P$

Le bronze utilisé est le  $CuSn9P$ , dont le diagramme de phase Cu-Sn (figure 3.6) indique qu'il est de nature monophasé ( $\alpha$ ). Cette phase, d'une structure cubique à faces centrées (CFC), est une solution solide de l'étain dans le cuivre.

Les bronzes au plomb, au phosphore et au manganèse ont en général une moindre aptitude au grippage que les laitons et un faible taux d'usure. L'addition d'étain donne une phase dure tandis qu'une addition de phosphore supérieure à 0.3% produit un composé intermétallique  $Cu3P$  (le phosphure) qui améliore les propriétés élastiques et antifrictions et assure une structure résistante.

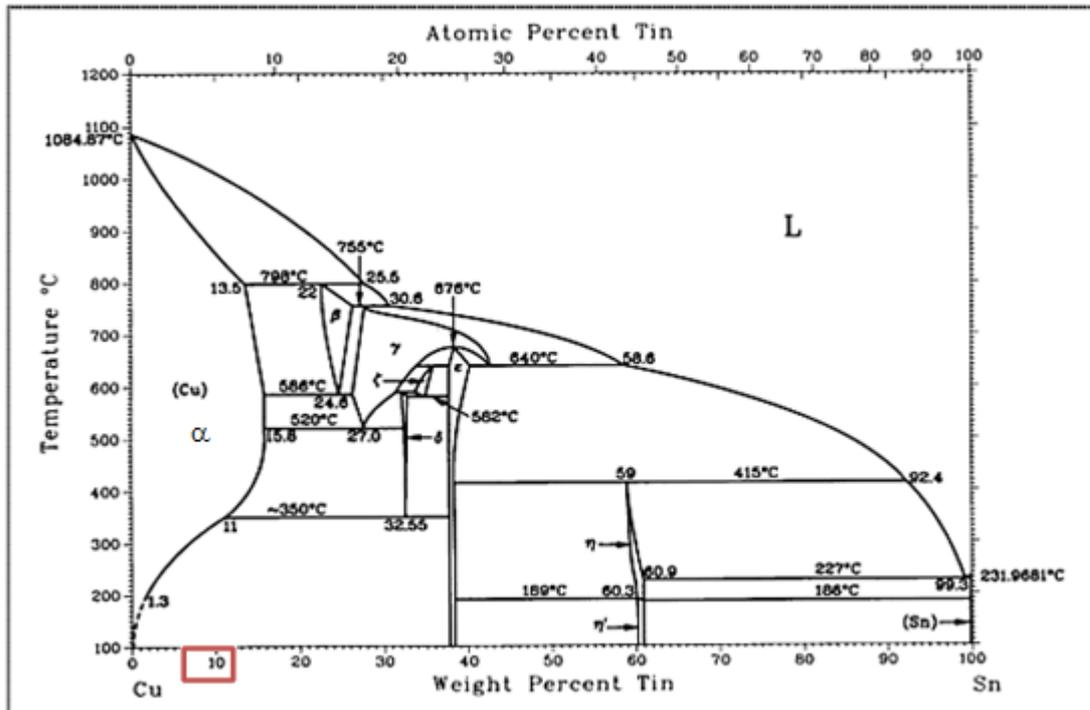


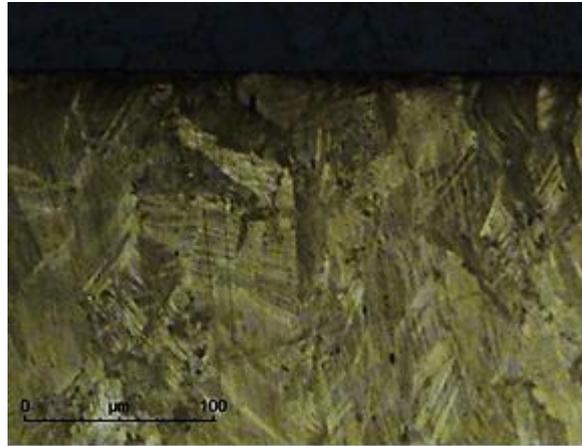
Figure 3.6 : Diagramme de phase du système Cuivre-Etain

Les principales caractéristiques de cet alliage sont indiquées par le tableau 3.2.

Paramètres		Valeur	Unité
Dureté	$HV$	190	Vickers
Masse volumique	$\rho$	8.8	$g/cm^3$
Module de Young	$E$	100	GPa
Limite élastique	$\sigma_y$	490	MPa
Résistance mécanique à la rupture	$R_m$	570	MPa
Coefficient de Poisson	$\nu$	0.31	--
Allongement	$A\%$	20	--

Tableau 3.2 : Propriétés du bronze

L'analyse métallographique du bronze (figure 3.7) indique qu'il a une structure monophasée (phase  $\alpha$ ), avec une taille de grain assez grossière.



**Figure 3.7 :** Analyse métallographique du bronze

#### 4.3 Analyse de la composition chimique

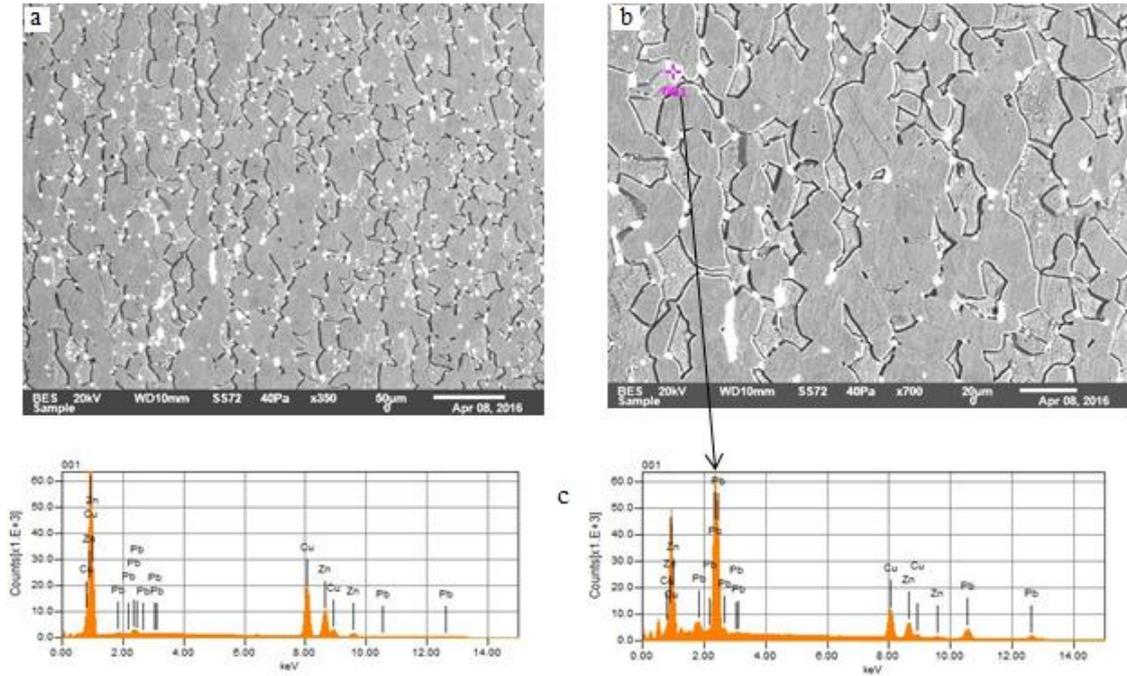
La composition chimique du laiton et du bronze, contrôlée par analyse EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) avant usure, est présentée par le tableau suivant :

	<b>Laiton <math>CuZn39Pb2</math></b>			<b>Bronze <math>CuSn9P</math></b>		
<b>Eléments</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Pb</b>	<b>Cu</b>	<b>Sn</b>	<b>P</b>
<b>Quantité (%)</b>	61	37	2	91	8	1

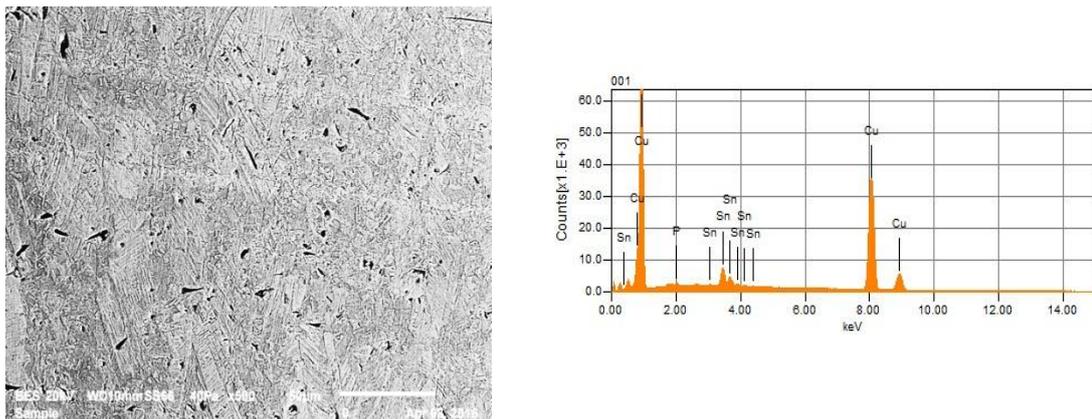
**Tableau 3.3 :** Composition chimique du laiton et du bronze

- En ce qui concerne le laiton, la figure 3.8 indique que celui-ci contient environ 37% atomique de zinc avec des précipités de plomb sous forme d'inclusions. Les autres impuretés présentes en faible quantité ne peuvent pas être détectées par EDS. D'après les résultats obtenus et le diagramme de phase présenté sur la figure 3.3, il s'agit donc bien d'un laiton binaire  $\alpha + \beta$

- En ce qui concerne du bronze, la figure 3.9 révèle que celui-ci contient environ 8% atomique d'étain et d'après le diagramme de phase présenté sur la figure 3.6, il s'agit d'un bronze monophasé.



**Figure 3.9 :** Analyse EDS d'un échantillon de laiton  
**(a)** Analyse cartographique, **(b)** ponctuelle sur un précipité  
 et **(c)** spectre obtenu pour l'analyse x



**Figure 3.9 :** Analyse EDS d'un échantillon de bronze.  
**(a)** Analyse cartographique  
 et **(b)** spectre obtenu pour l'analyse x

## 5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté en deux parties les matériaux d'étude. La première consiste en une synthèse bibliographique sur le comportement au frottement et à l'usure du laiton et du bronze. Il est établi pour la majorité des chercheurs que le comportement à l'usure, des alliages cuivreux, est affecté non seulement par les conditions opératoires (vitesse de glissement, pression appliquée, et le lubrifiant), mais qu'il est aussi lié aux propriétés des matériaux (composition chimique, la teneur des différents constituants d'alliage, la microstructure..).

La seconde partie présente l'analyse microscopique des découpes transversales des pions et l'analyse EDS, effectuées avant les tests tribologiques. L'analyse montre que le laiton (CuZn39Pb2) présente une structure biphasée ( $\alpha/\beta$ ), et que le bronze (CuSn9P) a une structure monophasé ( $\alpha$ ).

L'étude des différentes phases montre aussi que la phase  $\alpha$  est caractérisée par une bonne ductilité et une aptitude à la déformation, contrairement à la phase  $\beta$  qui présente un caractère dur et fragile, permettant l'augmentation de la dureté du matériau et favorisant le fractionnement des copeaux.

Les différentes caractérisations décrites dans ce chapitre constituent la base de toutes les interprétations des résultats expérimentaux qui vont être présentées dans la suite de ce mémoire.

---

*Chapitre 4*  
*Etude Expérimentale*

---

## 1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre l'étude expérimentale du comportement au frottement et à l'usure du laiton et du bronze en régime de lubrification mixte. Les essais ont été menés sur un tribomètre pion-disque avec un mode de contact plan sur plan.

Les pions en laiton ( $CuZn39Pb2$ ) et en bronze ( $CuSn9P$ ) frottent sur des disques en acier de type XC42 et de rugosité  $R_a = 0.15$  et  $2 \mu m$ . La pression de contact appliquée est de 1 et 10 MPa, avec des vitesses de glissement variant de 0.15 à 2 m/s.

Les résultats des différents essais nous ont permis de tracer la courbe de Stribeck et par la suite l'évaluation de l'usure en fonction du temps et de la rugosité des surfaces, pour une vitesse fixe de 0.5 m/s.

L'objectif de cette étude est la mise en évidence de l'influence de la microstructure sur le comportement à l'usure du laiton et du bronze, qui ont une dureté proche et qui sont soumis aux mêmes conditions d'essais. Contrairement au bronze, nous avons constaté la prépondérance de la microstructure du laiton sur son comportement à l'usure.

## 2. Les moyens et les techniques expérimentales

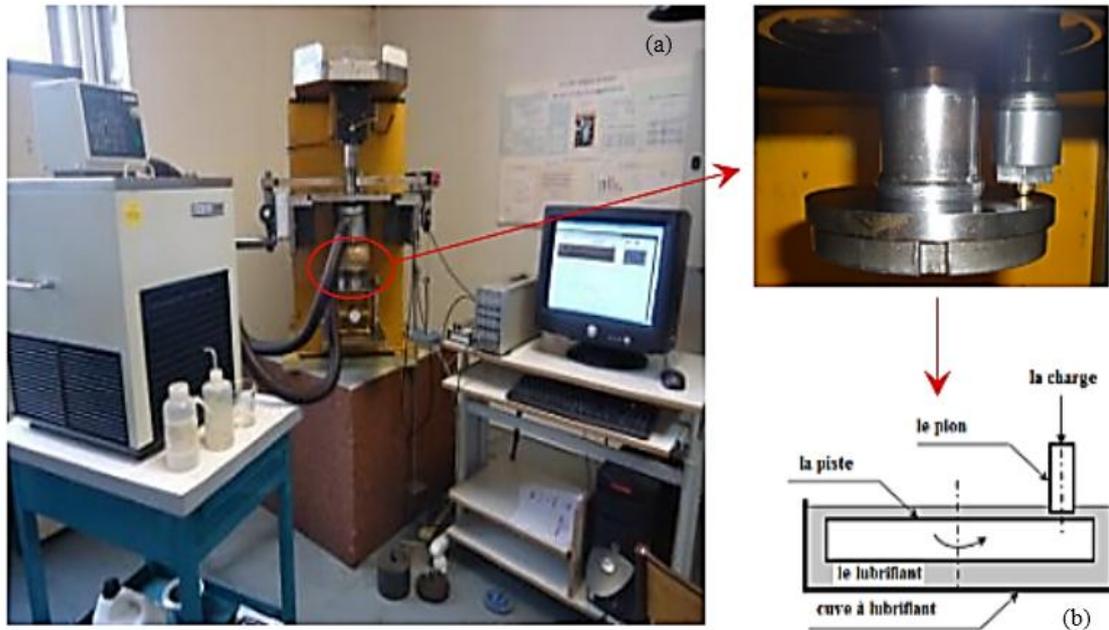
Les essais ont été menés sur un tribomètre pion disque dans la configuration de lubrification mixte.

### 2.1 Description du tribomètre

Le tribomètre utilisé, indiqué par la figure 4.1, permet de mesurer les variations de la force de frottement en fonction de la vitesse et de l'effort normal. Le principe de fonctionnement de ce tribomètre consiste à la mise en contact de deux surfaces : un pion fixe sur un arbre, qui supporte la charge appliquée, et un disque placé sur une broche en rotation reliée au moteur par un système de poulie et courroie. Le tribomètre permet une plage de vitesses de glissement comprises entre 0.1 et 3.0 m/s. Cette variation est obtenue par un moteur à courant continu asservi, et la mesure de la vitesse de rotation du disque se fait au niveau de la broche par un tachymètre électronique à capteur inductif.

La force tangentielle de frottement est mesurée par un capteur de force extenso-métrique. Le signal issu du capteur de force est amplifié et envoyé vers une carte d'acquisition qui le transforme sous forme graphique ou numérique.

La force normale est appliquée par des masses suspendues à l'extrémité du bras articulé.



**Figure 4.1 :** Vue générale du Tribomètre Pion-Disque (a),  
Représentation du contact lubrifié (b)

Le pion et le disque sont totalement immergés dans l'huile contenue dans une cuve thermostatique en acier inoxydable et d'une contenance ne dépassant pas 0.5 l. Cette cuve présente la particularité d'avoir une double paroi dans laquelle circule en continu un fluide permettant une plage de température de -50 à 150 °C. Nos essais sont conduits à température constante (25°C), avec un contact de type plan-plan entre le pion et le disque. La force normale et la vitesse de rotation sont réglées en fonction des conditions expérimentales requises.

La vitesse de glissement est obtenue par la relation suivante :

$$v = r\omega = \frac{\pi r n}{30} \quad (4.1)$$

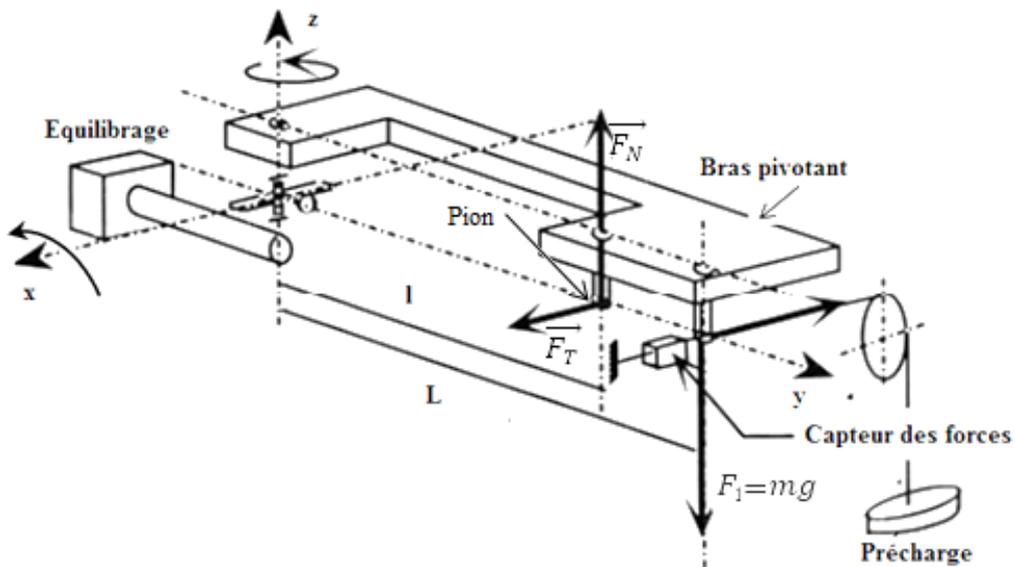
Les principaux réglages du tribomètre et les conditions d'essais utilisés sont présentés par le tableau 4.1 :

Caractéristiques géométriques et microgéométriques				Dureté $Hv$	Lubrifiant $\eta$ (Pa.s)	Conditions du test	
Pion	Matériaux	$R_a$ ( $\mu m$ )	$\phi$ (mm)			Pression (MPa)	Vitesse (m/s)
		CuZn39Pb2	0.436	5	170		
	CuSn9P	0.185	190				
Disque	XC42	0.15	65	250	0.034		
		2					

**Tableau 4.1 :** Caractéristiques des éprouvettes utilisées et conditions des essais

## 2.2 Techniques de mesure sur le tribomètre

Lors des essais on mesure la variation du coefficient de frottement en fonction de la variation de la vitesse de glissement pour une charge pré-établi. La figure 4.2 indique le schéma de mesure du frottement [87].



**Figure 4.2 :** Bras du tribomètre sans le disque

Le coefficient de frottement  $f$  est donné par le rapport de l'effort tangentiel de frottement  $F_T$  à la charge normale  $F_N$ .

$$f = \frac{F_T}{F_N} \quad (4.2)$$

La force  $F_N$  appliquée sur le pion est calculée à partir de l'équilibre des moments :

$$F_N \cdot l = F_1 \cdot L \quad (4.3)$$

D'où l'effort normal appliqué sur le pion :

$$F_N = mg \frac{L}{l} \quad (4.4)$$

$m$  : La masse suspendue.

### 2.3 Géométrie des éprouvettes

Pour nos différents essais, nous avons utilisé des pions et des disques qui sont présentés par la figure 4.3 (Les dimensions des éprouvettes sont données en annexe 3) :



(a)



(b)

**Figure 4.3** : Photos : du pion (a) et du disque (b)

## 2.4 Procédure expérimentale des essais d'usure

Les essais se sont déroulés de la manière suivante :

### ➤ Avant essai

- Numérotation des pions ;
- Nettoyage des éprouvettes avec l'éthanol ;
- Pesée des pions à l'aide d'une balance électronique sensible à  $10^{-4}$  g ;
- Mesure des états de surfaces des pions et des disques ;
- Montage du pion et du disque sur le tribomètre ;
- Réglage de l'orthogonalité du montage entre le pion et le disque ;
- Etalonnage de la machine ;
- Immersion dans le bain lubrifiant ;
- Application de la charge.

### ➤ Après l'essai

- Démontage des éprouvettes ;
- Dégraissage des éprouvettes à l'éthanol ;
- Pesée des pions ;
- Mesure des états de surfaces ;
- Analyse des résultats des coefficients de frottement.

Les essais ont été reproduits deux fois pour chaque couple laiton/acier et bronze/acier afin de vérifier la reproductibilité des résultats. Pour ne pas altérer les mesures d'usure, le bain lubrifiant est changé après chaque essai du couple laiton/acier et bronze/acier, et la cuve est nettoyée et dégraissée à l'éthanol.

### ➤ Le protocole des essais

Les essais ont été effectués à température ambiante de  $25^{\circ}\text{C}$ , en utilisant le lubrifiant *Neutral 100*. Ils consistent à faire varier les vitesses d'une manière croissante, puis décroissante sur huit paliers avec un temps de maintien par palier ( $\Delta t$ ) égal à 5 minutes. Cette opération est précédée d'un rodage à une vitesse de  $0.5$  m/s durant  $50$  min pour la mise en conformité des surfaces.

Les temps du palier et du rodage sont déterminés après un certain nombre d'essais préliminaires, ce temps correspond à la stabilité du coefficient frottement.

Nous avons utilisé pour nos essais, des vitesses allant de 0.15 à 2 m/s et on s'est limité à la vitesse maximale de 2 m/s à cause de l'apparition des vibrations au-delà de cette vitesse.

Cette évolution de vitesse de glissement par palier nous permet de tracer les courbes de Stribeck du contact étudié.

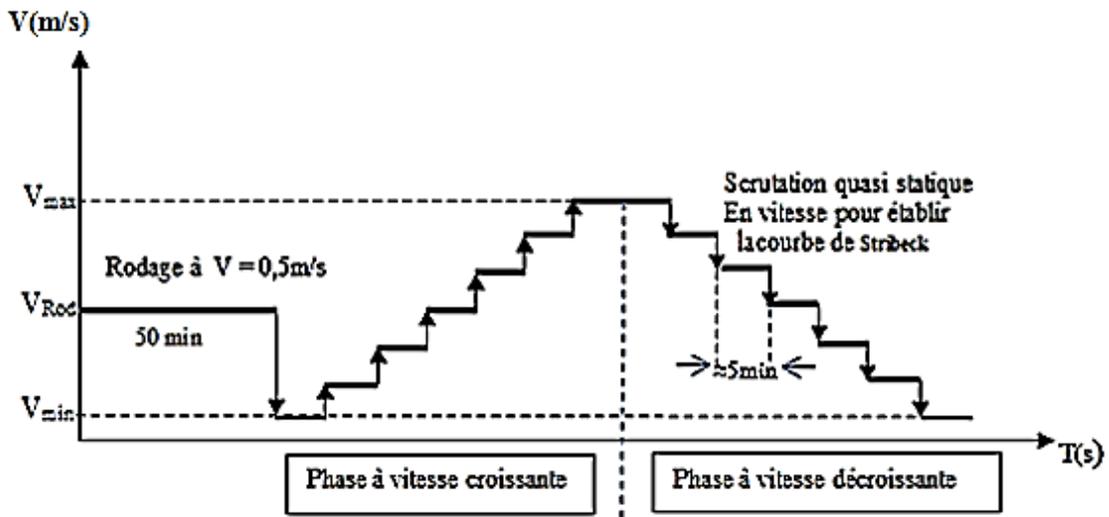


Figure 4.4 : Diagramme des vitesses

#### ➤ Le calcul du Taux d'usure

Des essais interrompus à vitesse constante ont été menés afin de déterminer le taux d'usure. A chaque arrêt de l'essai, le disque et le pion sont nettoyés avec de l'éthanol et les pions sont pesés. Cette opération est effectuée sur deux intervalles de temps de 60 mn chacun ( $T_1$  et  $T_2$ ).

Les paramètres d'essais ( $V = 0.5 \text{ m/s}$ ,  $P = 1 \text{ et } 10 \text{ MPa}$ ) sont choisis à partir des essais préliminaires nous permettant d'avoir des frottements correspondant au régime de lubrification mixte.

Le coefficient d'usure est calculé à partir de la loi d'Archard générale [59] :

$$k = \frac{\Delta V}{F_N \cdot L} \quad (4.5)$$

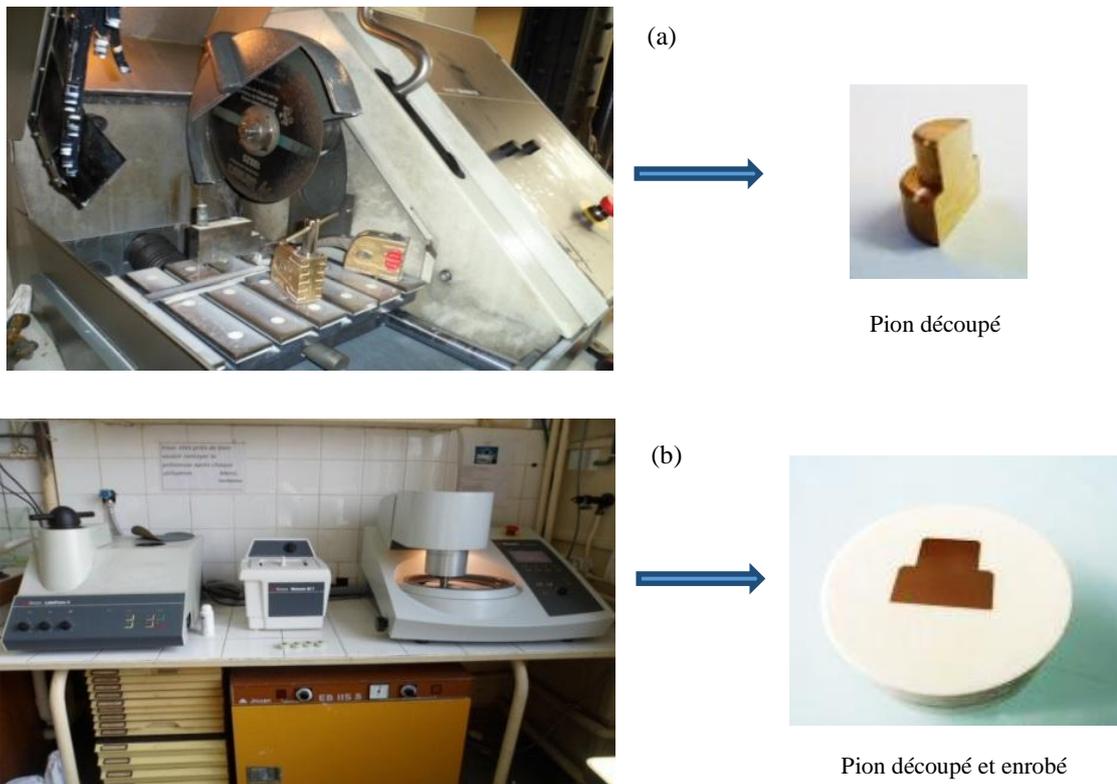
Le volume de matière perdue est calculé à partir de la perte de masse obtenue par pesée du pion et donné par l'équation :

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} \quad (4.6)$$

### 3. Préparation des échantillons et moyens de caractérisation

#### 3.1 Préparation des échantillons

Afin d'observer le changement de la microstructure en volume du pion après essai, des coupes transversales et perpendiculaires aux stries d'usure ont été réalisées par une meule de 1,5 mm sur une tronçonneuse de type Strues discoton-50, figure 4.5.a.



**Figure 4.5 :** Etapes de préparation des échantillons  
En (a) Tronçonneuse, en (b) Enrobeuse et Polisseuse

Les échantillons découpés ont été ensuite enrobés avec une résine époxy, puis polies avec des papiers abrasifs de grades 320, 800, 1200, 2400, 4000, puis sur des draps de feutre imbibés de pâte diamantée de grades 3 et 1  $\mu\text{m}$  pour avoir un poli miroir. Entre chaque étape, les échantillons ont été nettoyés et séchés.

Une attaque chimique adaptée aux alliages de cuivre a été utilisée pour révéler la microstructure. Le réactif d'attaque utilisé est le chlorure de fer (III). Cette solution contient 5g de chlorure de fer (III), 2 ml d'acide chlorhydrique (HCl) et 95 ml d'éthanol. Les échantillons sont plongés une dizaine de secondes dans la solution, et après être nettoyés à l'eau et à l'éthanol puis séchés, on les observe en microscopie optique.

### 3.2 Topographie des surfaces

Les états de surface ont été mesurés par un profilomètre de surface 'SURFASCAN 3S' (figure 4.6), qui utilise le principe de mesure par contact. Un palpeur muni d'un stylet, équipé d'une pointe pyramidale en diamant et tronquée par une calotte sphérique de diamètre 2 à 15  $\mu\text{m}$ , est déplacé perpendiculairement aux stries d'usure. Le palpeur est maintenu en contact de la pièce par un effort normal constant de l'ordre du milli-Newton.



**Figure 4.6 :** Profilomètre - SURFASCAN 3S

### 3.3 Analyse par microscopie électronique à balayage

Des observations par Microscopie Electronique à Balayage (MEB) sont réalisées sur les faciès d'usure, pour analyser leur aspect microgéométrique et microstructurale. Les images du MEB ont été réalisées en contraste topographique (électrons secondaires) et en contraste chimique (électrons rétrodiffusés). A ces observations sont couplées des analyses EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) qui nous permettent d'identifier la nature des particules observées.

Les débris d'usure récupérés après filtrage d'huile, durant 24 heures et par utilisation de filtres en papier de diamètre 25, 16 et 8  $\mu\text{m}$  (figure 4.7), sont observés à leur tour au MEB après avoir été déposés sur une pastille adhésive conductrice en carbone.



**Figure 4.7 :** Procédure du filtrage d'huile

### 3.4 Analyse par microscopie optique

Des analyses microstructurales, par un microscope optique Zeiss Axioplan (figure 4.8.a), ont été menées sur les faces des pions découpés afin de déterminer l'évolution de l'usure en volume pour les deux matériaux d'étude. Ce microscope permet un grossissement optique maximum  $G \times 100$  et il est doté d'une caméra CCD permettant l'acquisition numérique des images observées.

### 3.5 Mesure de la microdureté

La mesure de la microdureté des pions usés a été faite à l'aide d'un pénétrateur de type Vickers (HV), figure 4.8.b. La charge appliquée est de 10 g, vu la faible épaisseur de la surface attaquée par l'usure. Le temps de maintien de la charge est de 15 s pour garantir la stabilité de la mesure.



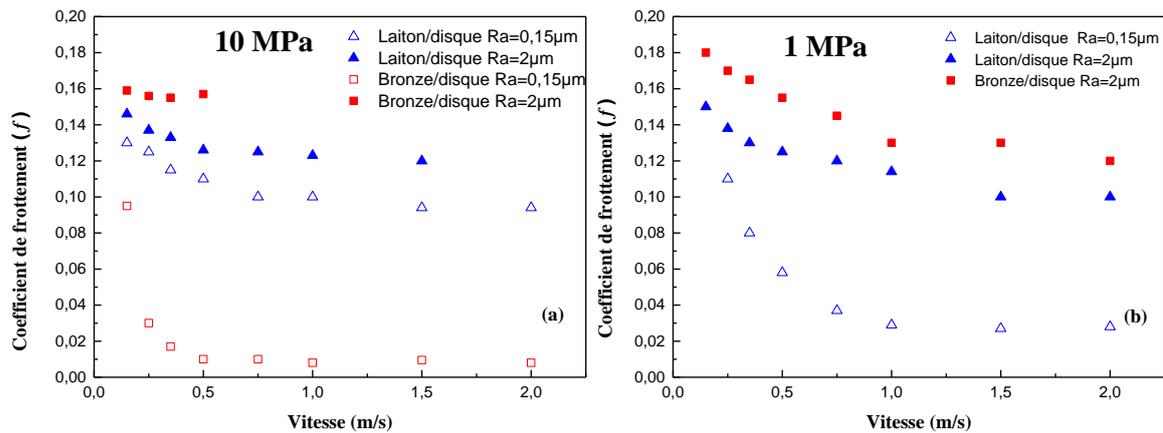
Figure 4.8 : (a) Microscope optique, (b) Microduromètre

## 4. Comportement au frottement à vitesse variable

Des essais de frottement ont été effectués en fonction d'une vitesse de glissement variable (0.15 à 2 m/s) et d'une pression de 1 et 10 MPa, avec des disques ayant deux rugosités différentes ( $Ra = 0.15$  et  $2 \mu m$ ). Les résultats obtenus sont représentés en fonction de la vitesse et du nombre de Sommerfeld ( $S = \eta V/P$ ).

### 4.1 Influence de la vitesse sur le frottement

L'évolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement est indiquée par la figure 4.9 pour les deux niveaux de pression, qui sont de 10 MPa et 1MPa.



**Figure 4.9** : Evolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement

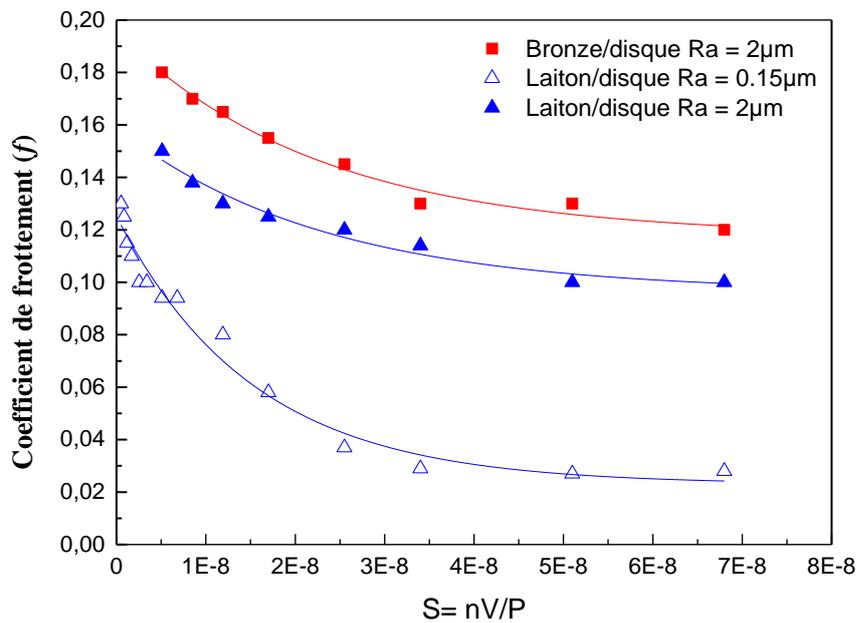
Les résultats obtenus montrent que :

- Pour le couple laiton/disque rugueux ( $Ra=2\mu\text{m}$ ) le coefficient de frottement, enregistré à 10MPa (figure 4.9.a), varie de 0.15 à 0.12 et celui du couple laiton/ disque lisse ( $Ra=0.15\mu\text{m}$ ) varie de 0.13 à 0.1. Tandis que pour la pression de 1MPa (figure 4.9.b), nous remarquons une légère diminution du frottement avec le disque rugueux ( $Ra= 2\mu\text{m}$ ). Par contre, cette variation est beaucoup plus marquée pour le disque lisse ( $Ra=0.15\mu\text{m}$ ), où ce coefficient varie de 0.11 à 0.03. Cela s'explique par la grande proportion de contact solide quand la charge normale augmente et par conséquent les interactions entre les aspérités en contact sont de plus en plus importantes.
- Concernant le comportement du bronze, nous remarquons que pour la pression de 10MPa (figure 4.9.a), le frottement du disque rugueux a été étudié que pour la plage de vitesse de 0.15 à 0.55m/s, dans laquelle le coefficient de frottement reste sensiblement le même (de l'ordre de 0.16). Au-delà de cette plage de vitesse il y a apparition de vibrations qui est responsable de l'instabilité du coefficient de frottement. Par contre, le frottement du couple bronze/disque lisse ( $Ra=0.15\mu\text{m}$ ) n'est observé que pour les faibles vitesses. Il devient négligeable au-delà de 0.5m/s, des valeurs qui correspondent au régime hydrodynamique (de l'ordre de 0.01), où le contact entre les deux solides est pratiquement inexistant. Cela est dû au fait que les surfaces sont séparées par un film d'huile complet. Pour la pression de 1MPa (figure 4.9.b), le frottement a été étudié que pour le couple bronze/ disque rugueux ( $Ra=2\mu\text{m}$ ) où il présente une variation de 0.18 à 0.12.

Les essais de frottement effectués sur les deux matériaux, avec les rugosités des disques et les pressions choisies, nous permettent de constater que le coefficient de frottement se stabilise à partir d'une vitesse de l'ordre de 0.5 m/s. Cette dernière sera utilisée lors de nos essais d'usure.

#### 4.2 Courbe de Stribeck expérimentale

La figure 4.10 représente l'évolution du coefficient de frottement avec le paramètre de Sommerfeld.



**Figure 4.10** : Influence de la rugosité sur le coefficient du frottement en fonction de  $\eta V/P$

Nous remarquons une diminution du frottement avec la croissance du nombre de Sommerfeld, ce qui correspond à l'allure de la courbe de la lubrification mixte (figure 1.14). Ces courbes montrent que la rugosité a un rôle prédominant dans le comportement au frottement des deux matériaux, où la faible rugosité du disque entraîne une diminution considérable du coefficient de frottement.

## 5. Comportement à l'usure à vitesse constante

L'étude de l'usure a été menée à une vitesse de glissement constante pour analyser l'évolution de la morphologie et de la microgéométrie des surfaces des pions. La vitesse d'essai ( $V= 0.5\text{m/s}$ ) a été choisie à partir de la courbe de Stribeck dans le domaine du régime mixte.

### 5.1 Influence de la rugosité sur le coefficient de frottement

Les essais d'usure consistent dans l'étude de l'évolution du frottement en fonction du temps à vitesse constante. Des essais de deux heures (2h) sont effectués pour la quantification de l'usure, avec des pesées des pions au début, après une heure (1h) et à la fin de chaque essai.

L'évolution du coefficient de frottement montre la présence de deux zones bien distinctes [88] (figure 4.11) :

- Une première zone d'instabilité (I) correspondant au rodage des pièces en contact.
- Une deuxième zone de stabilité (II) qui marque la fin du rodage et dans laquelle le coefficient de frottement devient relativement constant.

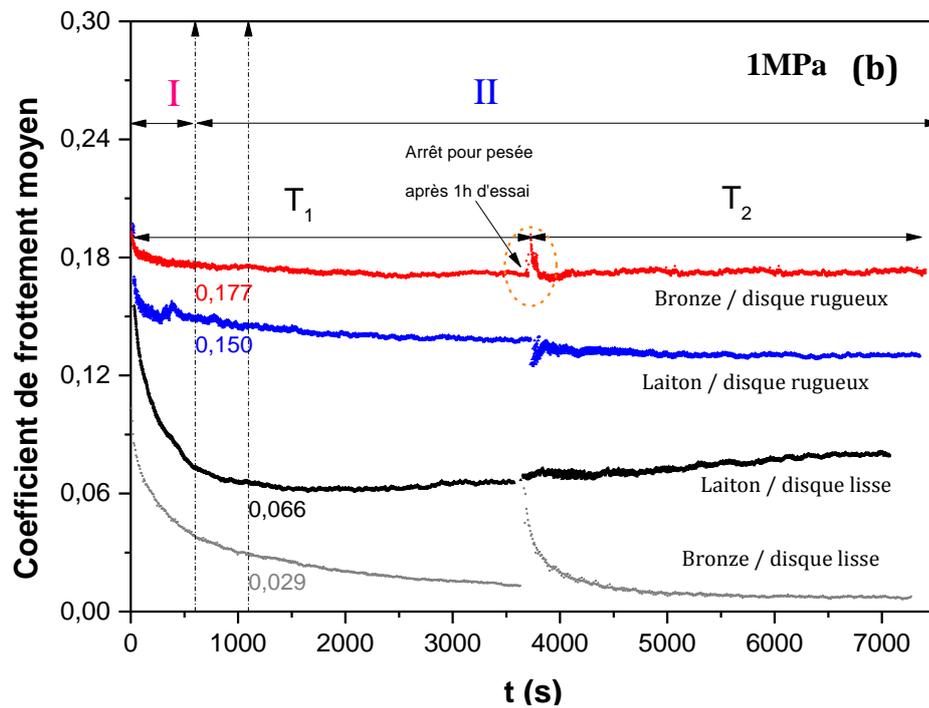
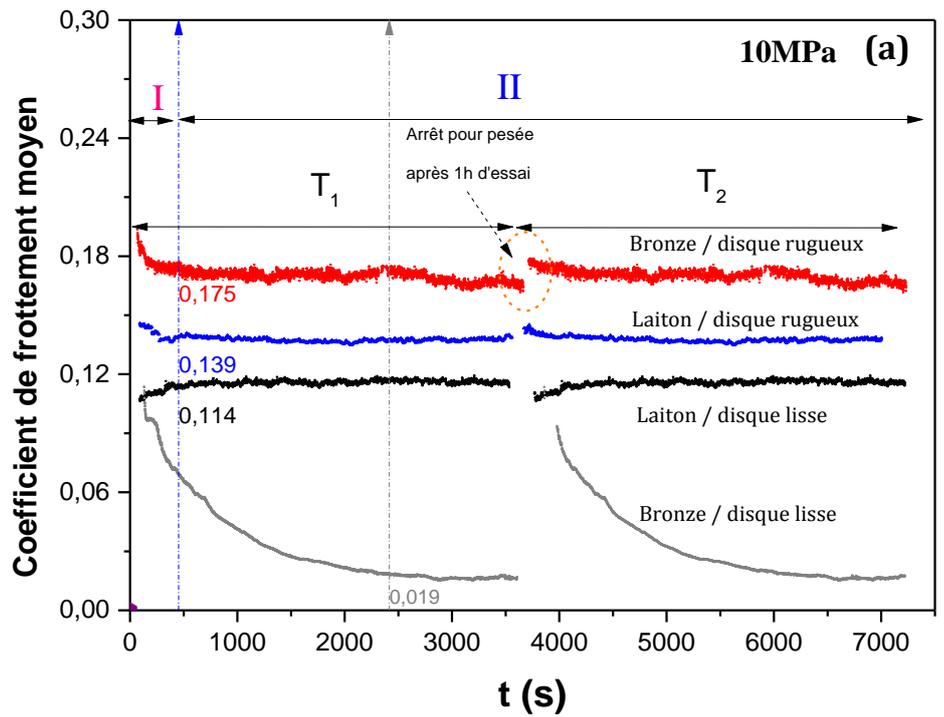


Figure 4.11 : Coefficient de frottement moyen des couples : laiton/acier et bronze/acier, à  $V = 0,5$  m/s et sous un chargement de (a) 10MPa et (b) 1MPa

Le frottement pour la pression de 10 MPa (figure 4.11.a) nous indique que, contrairement au bronze, le laiton n'est pas très affecté par la rugosité des disques. Cependant, des temps de rodage très proches d'environ 500 s sont enregistrés pour les deux matériaux, comme il est indiqué par le tableau 4.2. Pour le couple bronze/disque lisse, nous remarquons une valeur du coefficient de frottement de 0.02 correspondant au régime hydrodynamique.

En ce qui concerne le comportement au frottement des deux matériaux à la pression de 1MPa, dont les résultats sont représentés par la figure 4.11.b, on remarque que la rugosité du disque joue un rôle important. En effet, des coefficients de frottement et des temps de rodage comparables sont observés pour les mêmes rugosités comme indiqué par le tableau 4.2.

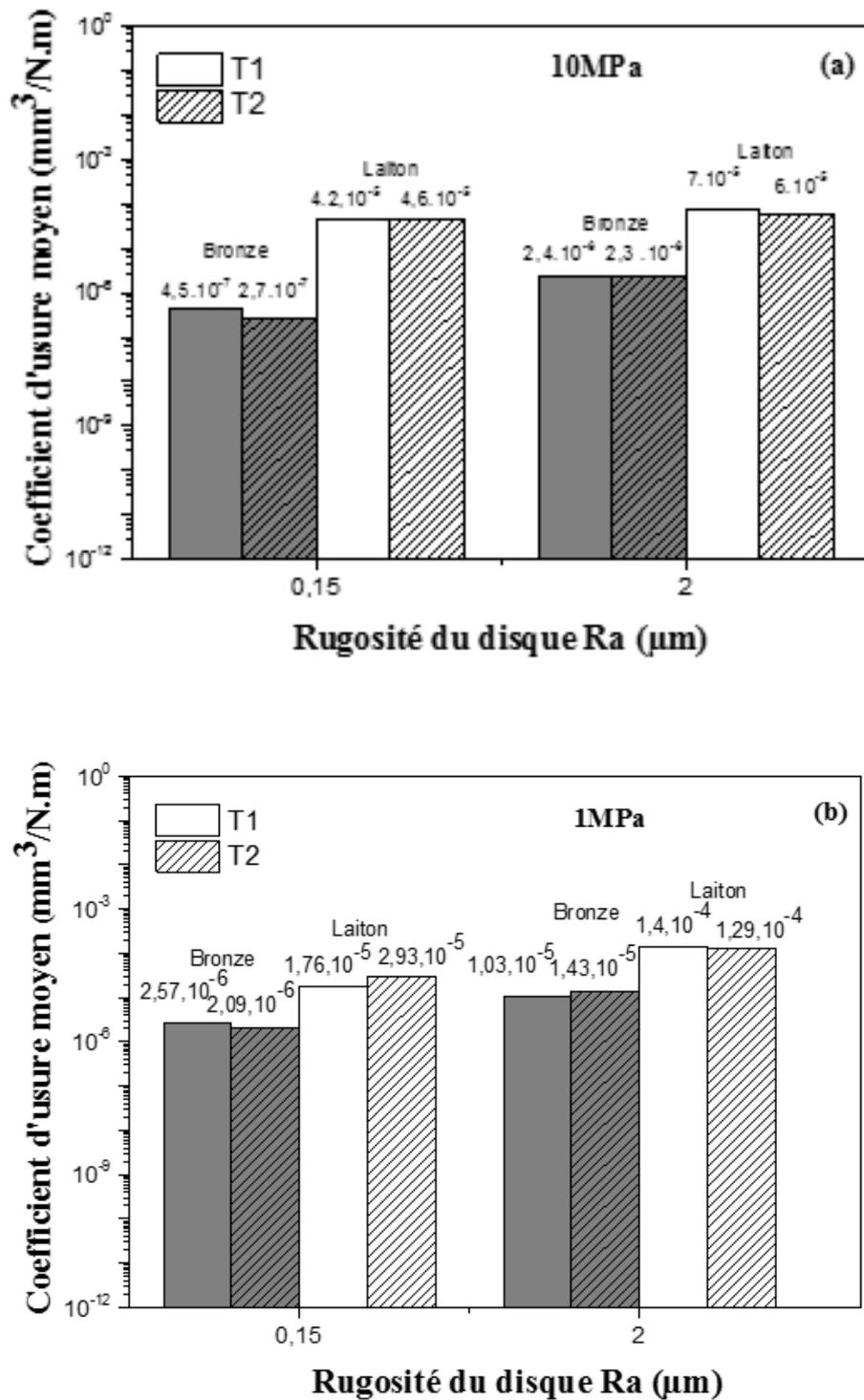
Rugosité du disque	<b>Ra = 0.15 µm</b>				<b>Ra = 2 µm</b>			
	<b>Coefficient de frottement (f)</b>		<b>Temps de rodage T (s)</b>		<b>Coefficient de frottement (f)</b>		<b>Temps de rodage T (s)</b>	
Pression	10MPa	1MPa	10MPa	1MPa	10MPa	1MPa	10MPa	1MPa
Laiton	0.11	0.06	540	1500	0.14	0.14	524	820
Bronze	0.02	0.01	2000	2500	0.17	0.17	580	700

**Tableau 4.2 :** Valeurs des coefficients du frottement moyens et des temps de rodage

Les essais d'usure à vitesse constante nous indiquent que, pour une faible pression (1MPa), le temps de rodage et le coefficient de frottement dépendent considérablement de la rugosité des surfaces, cette influence devient beaucoup plus faible pour la forte pression (10MPa).

## 5.2 Influence de la rugosité sur le coefficient d'usure

La figure 4.12 représente les valeurs moyennes du coefficient d'usure obtenues à partir des résultats du frottement. On constate que la rugosité affecte le comportement à l'usure des matériaux étudiés. Cet effet est indiqué par le rapport de la perte de masse sur la masse initiale ( $\frac{\Delta m}{m}$ ) (tableau 4.3). Celui-ci est plus important pour la forte rugosité du disque (Ra=2µm) pour les deux matériaux. D'autre part, on note que la perte de masse du bronze est beaucoup plus faible comparée à celle du laiton pour lequel l'usure a atteint le corps du pion.



**Figure 4.12** : Coefficient d'usure moyen des pions laiton et bronze en fonction de la rugosité  $Ra=0.15\mu\text{m}$  et  $Ra=2\mu\text{m}$  : (a) pour un chargement de 10MPa et (b) pour un chargement de 1MPa

	Laiton					Bronze			
	Rugosité du disque	$\Delta m$	$\Delta m/m$	k	$k_2/k_{0,15}$ par 1h	$\Delta m$	$\Delta m/m$	k	$k_2/k_{0,15}$ par 1h
P=10MPa	0,15	$1,24 \cdot 10^{-1}$	1,55%	$4,17 \cdot 10^{-5}$	1,7	$1,40 \cdot 10^{-3}$	0,02%	$4,50 \cdot 10^{-7}$	5,2
	2	$2,10 \cdot 10^{-1}$	2,63%	$7,04 \cdot 10^{-5}$		$7,30 \cdot 10^{-3}$	0,09%	$2,35 \cdot 10^{-6}$	
P=1MPa	0,15	$5,25 \cdot 10^{-3}$	0,07%	$1,76 \cdot 10^{-5}$	8,0	$8,00 \cdot 10^{-4}$	0,01%	$2,57 \cdot 10^{-6}$	4,0
	2	$4,19 \cdot 10^{-2}$	0,52%	$1,40 \cdot 10^{-4}$		$3,20 \cdot 10^{-3}$	0,04%	$1,03 \cdot 10^{-5}$	

**Tableau 4.3** : Valeurs des pertes des masses et des coefficients d'usure après une heure (1h) d'essai

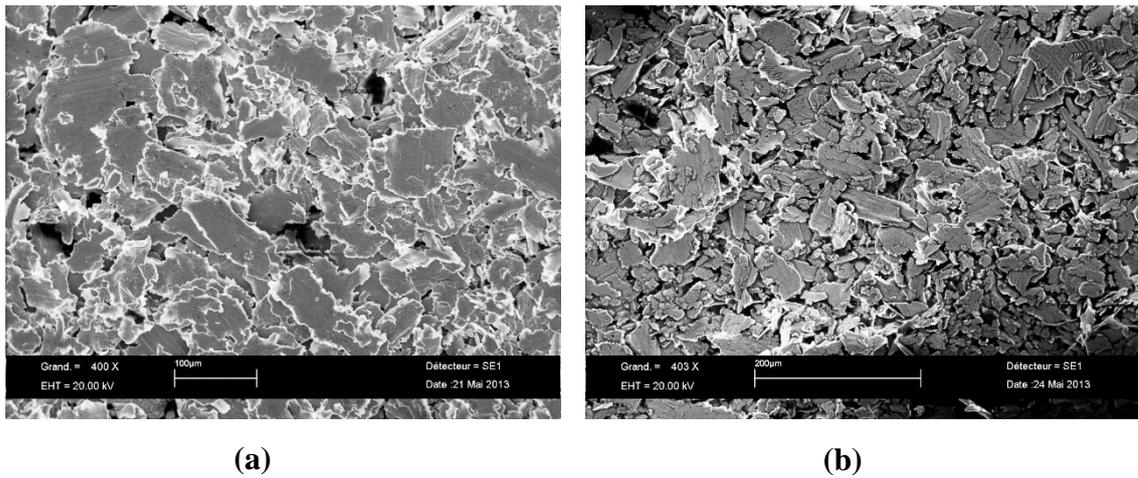
## 6. Analyse des débris d'usure et des pions

L'étude de l'usure des pions est suivie par une analyse microscopique, en surface et en volume, pour voir la morphologie et la microstructure des zones affectées suite aux essais de frottement. Les débris générés sont à leur tour analysés pour mieux comprendre le processus d'usure et sa sévérité.

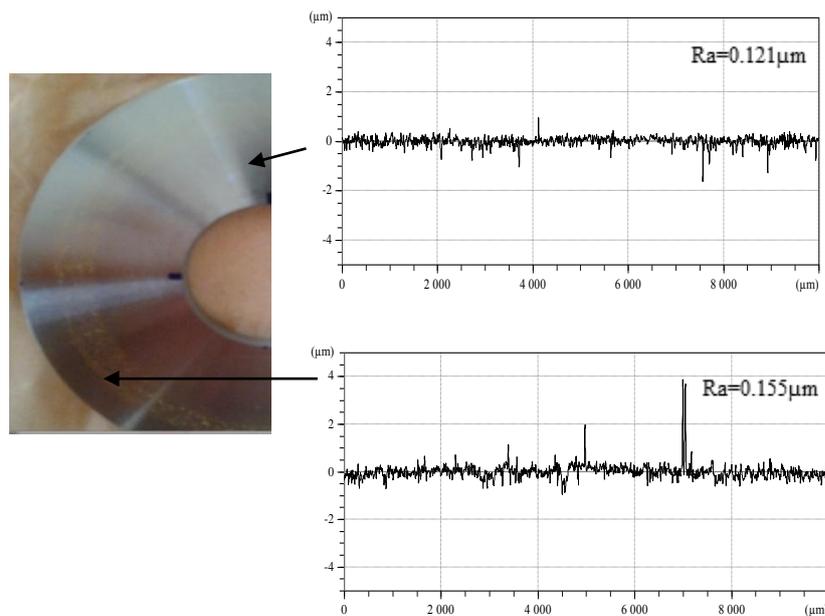
Etant donné que les essais d'usure pour la faible pression (1MPa) n'ont pas montré une usure significative des pions, l'analyse microscopique portera que sur les pions usés sous la pression de 10 MPa.

### 6.1 Analyse des débris d'usure

Les débris d'usure générés lors des essais d'usure sont récupérés par filtrage de l'huile et sont analysés par microscopie électronique à balayage. Cette analyse montre que la forme et la quantité des débris du laiton dépendent de la rugosité du disque. Ils sont d'une forme aplatie avec des contours rugueux pour le disque lisse (figure 4.13.a), et d'une forme allongée et de petite taille pour le disque rugueux (figure 4.13.b). Une partie des débris générés est transférée sur le disque. Elle est indiquée par une trace visible à l'œil nu, figure 4.14, d'une largeur d'environ 5mm (diamètre du corps du pion) et de couleur dorée.

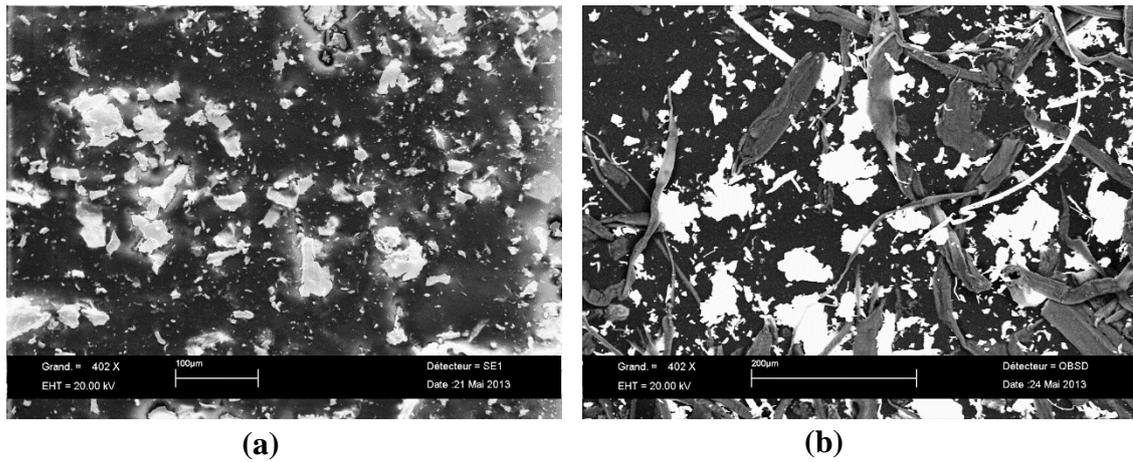


**Figure 4.13** : Image MEB des débris d'usure des (a) Pion laiton/acier lisse, (b) Pion laiton/acier rugueux

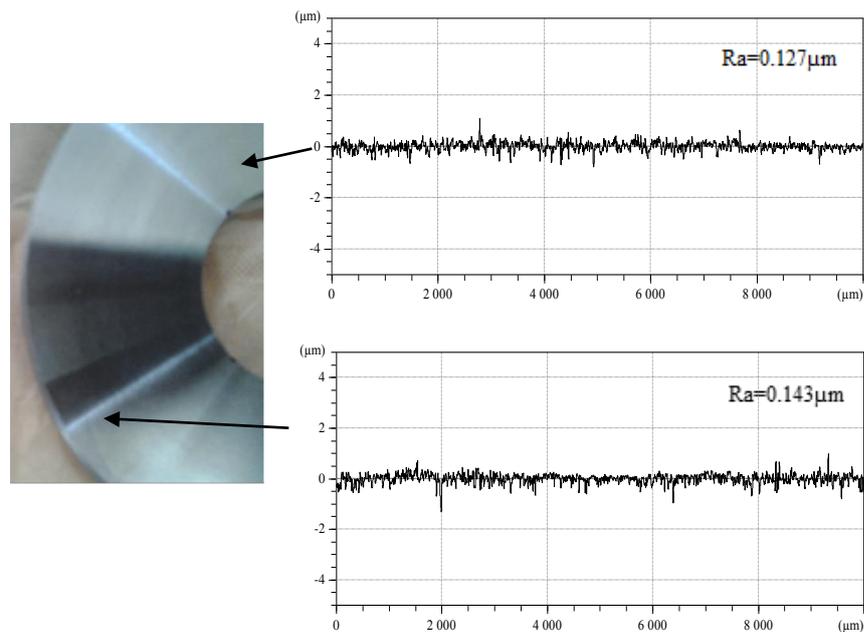


**Figure 4.14** : La piste d'usure en acier XC42 frottée contre le pion en laiton

La quantité de débris récupérés du couple bronze/acier est très faible, avec une forme plate aléatoire (figure 4.15 : a et b). La trace d'usure sur le disque, quant à elle, est pratiquement indécélable (figure 4.16). Cela indique que pour les mêmes conditions d'essai, le bronze offre une meilleure résistance à l'usure adhésive par rapport au laiton.



**Figure 4.15** : Image MEB des débris d'usure des  
**(a)** Pion bronze/acier lisse, **(b)** Pion bronze/acier rugueux

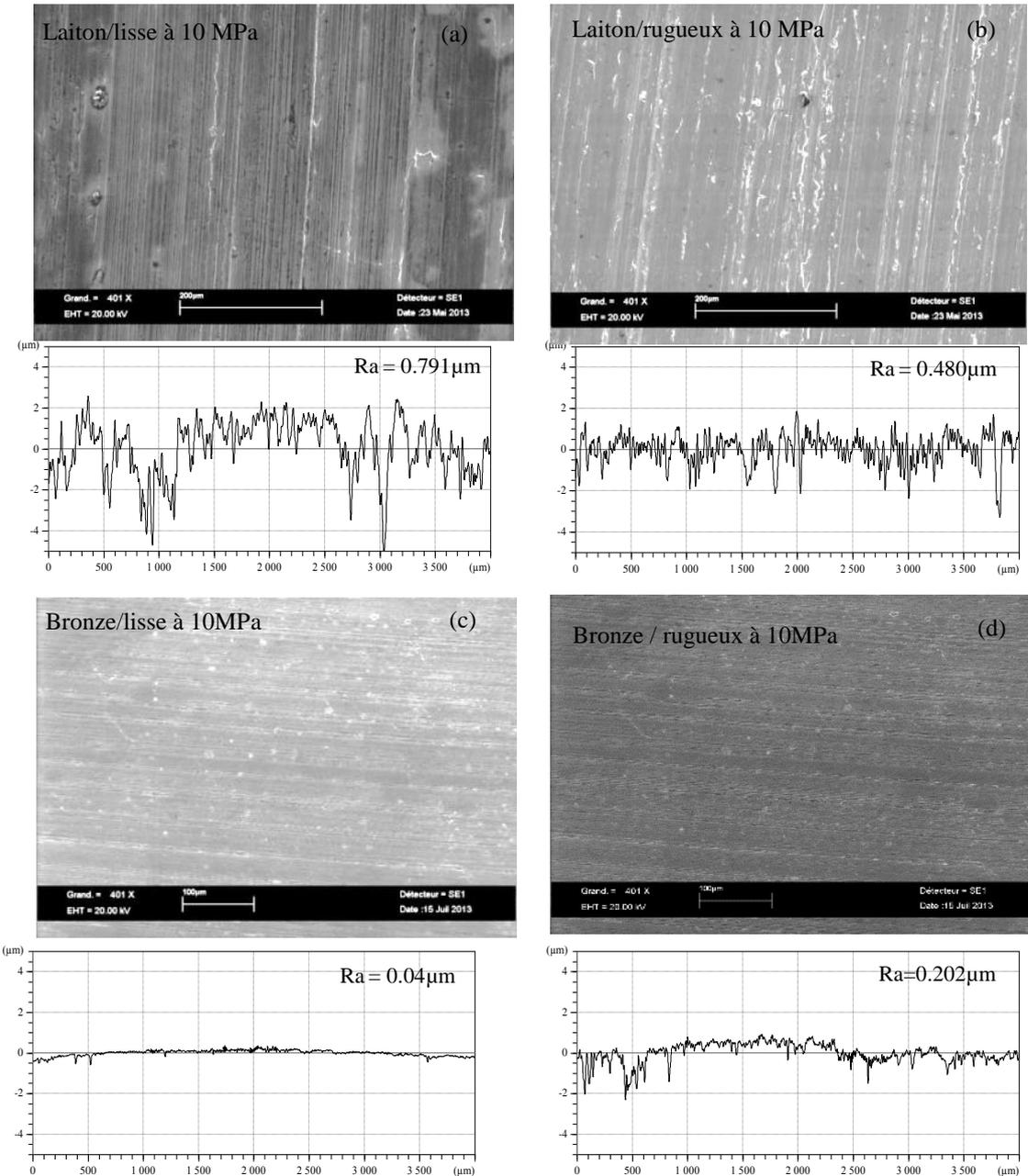


**Figure 4.16** : La piste d'usure en acier XC42 frottée contre le pion en bronze

La faible quantité de débris générés lors de l'usure du bronze est due principalement à ces propriétés mécaniques élevées (limite élastique, résistance à la rupture,...) qui lui confèrent une bonne rigidité [89]. On suppose que la pression exercée conduit à un aplatissement des sommets des aspérités, ce qui réduit en conséquence la rugosité de la surface et explique la faible quantité de débris.

## 6.2 Observations des faciès des pions

L'observation au MEB des faciès d'usure des pions, à la fin de l'essai, montre la formation des sillons labourés dans le sens de glissement (figure 4.17). Ces derniers sont dus aux aspérités de l'antagoniste (le disque en acier) et au mouvement des débris d'usure. Les mesures profilométriques montrent à leur tour que le laiton a subi une usure plus sévère que celle du bronze.

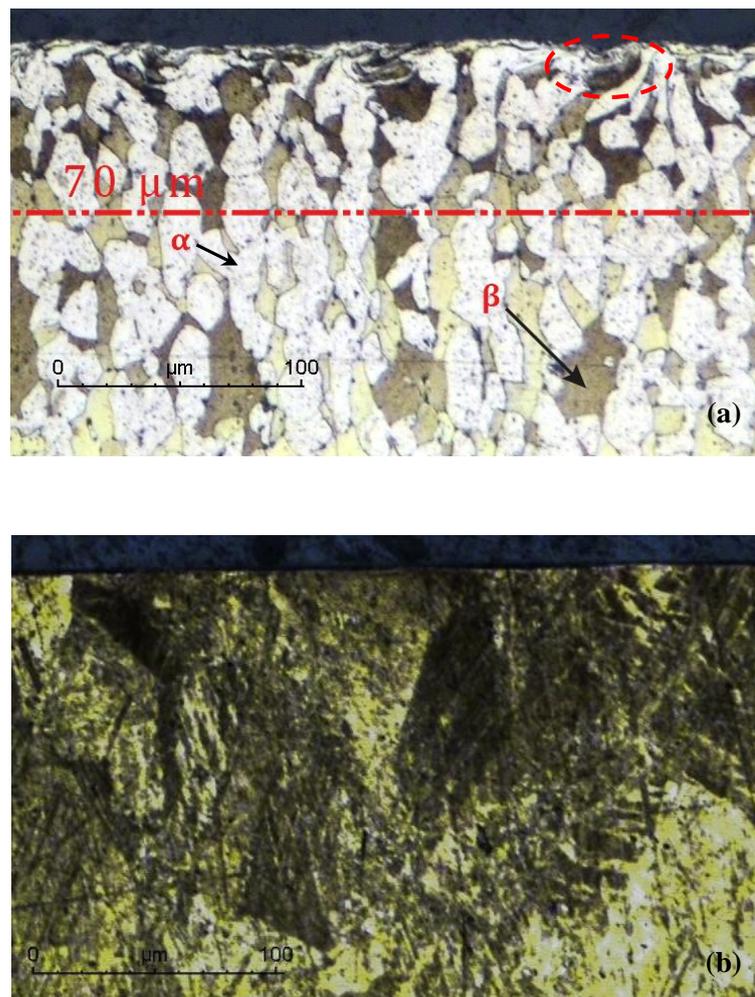


**Figure 4.17 :** Faciès des pions après usure contre les aciers  
**(a)** Pion laiton/acier lisse, **(b)** Pion laiton/acier rugueux,  
**(c)** Pion bronze/acier lisse, **(d)** Pion bronze/acier rugueux

La présence des stries et des débris d'usure sur les faciès observés, pour les deux matériaux d'étude, nous permet de constater que le type d'usure qui se produit lors du frottement est une usure abrasive.

### 6.3 Observations des pions en volume

L'observation de la découpe orthogonale aux traces d'usure, des pions en laiton (figure 4.18.a), montre une déformation plastique des couches superficielles qui s'étend à une profondeur d'environ  $70\ \mu\text{m}$ , avec une déformation plus intense autour des stries d'usure. La phase  $\alpha$  du matériau a subi un fort cisaillement, puisque celle-ci se caractérise par une bonne ductilité et une aptitude à la déformation à froid. La phase  $\beta$  par contre ne montre pas de déformation notable, vu son caractère dur et fragile. Ce résultat est constaté pour les deux rugosités du disque étudiées ( $R_a = 0.15$  et  $2\ \mu\text{m}$ ).



**Figure 4.18 :** Image microscopique de la découpe transversale perpendiculairement aux traces d'usure après frottement (a) des pions en laiton (CuZn39Pb2), (b) en bronze (CuSn9P)

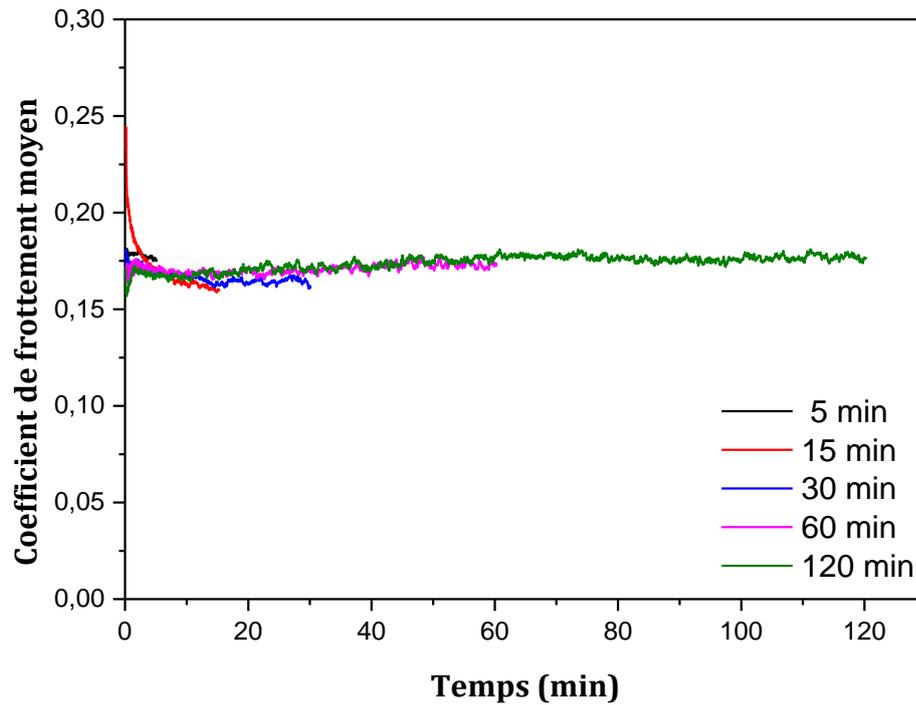
Le bronze, ayant montré une bonne résistance à l'usure, ne semble pas avoir subi de déformation visible des couches superficielles (figure 4.18.b), ce qui suppose qu'elle est localisée plutôt sur les sommets des aspérités.

## **7. Evolution de l'usure du laiton**

L'étude comparative du comportement du bronze et du laiton à l'usure a montré que ce dernier présente une moindre résistance à l'usure par rapport au bronze. D'où le choix de ce matériau pour l'analyse de l'évolution de l'usure, avec la condition la plus sévère de pression (10 MPa). Des essais à différents intervalles de temps (5, 15, 30, 60 et 120 mn) sont effectués pour suivre l'évolution de la déformation plastique en volume du pion et du taux d'usure. Ces essais sont conduits dans les mêmes conditions opératoires ( $V=0.5$  m/s,  $P=10$  MPa et  $T=25^{\circ}\text{C}$ ) et pour la rugosité du disque  $R_a = 2 \mu\text{m}$ . A la fin de chaque essai, le pion est découpé et observé par microscope optique [90].

### **7.1 Résultats du frottement et de l'usure**

Les résultats des essais d'usure à différents intervalles de temps, indiqués par la figure 4.19, montrent une bonne reproductibilité des résultats obtenus, avec des coefficients de frottement très proches. La pesée des pions à la fin de chaque essai permet de calculer la perte de masse correspondant aux intervalles de temps choisis. Les pertes de masse obtenues sont présentées dans le tableau 4.4, où on constate que celles-ci augmentent avec la durée de l'essai. Le taux d'usure, exprimant la perte de masse par unité de temps, demeure pratiquement constant sauf pour l'essai de 120 min où ce taux augmente légèrement, ce qui peut être expliqué par l'évolution de la surface de contact.



**Figure 4.19 :** Comparaison de l'évolution du coefficient de frottement en fonction de la durée de l'essai sur les pions en laiton ( $R_a=2\mu\text{m}$ ,  $P=10\text{MPa}$ )

Durée de l'essai $\Delta t$ (min)	Coefficient de frottement $f$	Perte de masse $\Delta m$ (g)	Taux d'usure $\Delta m/\Delta t$ (mg/min)
5	0.17	0,0094	1,880
15	0.165	0,0284	1,893
30	0.165	0,055	1,833
60	0.17	0,107	1,783
120	0.174	0,264	2,200

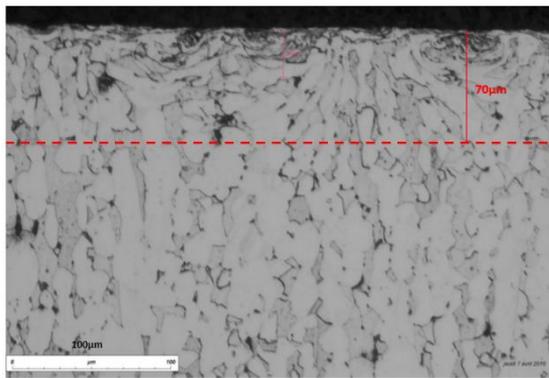
**Tableau 4.4 :** Valeurs des pertes de masse et du taux d'usure pour le laiton ( $R_a=2\mu\text{m}$ ,  $P=10\text{MPa}$ )

## 7.2 Analyse microscopique

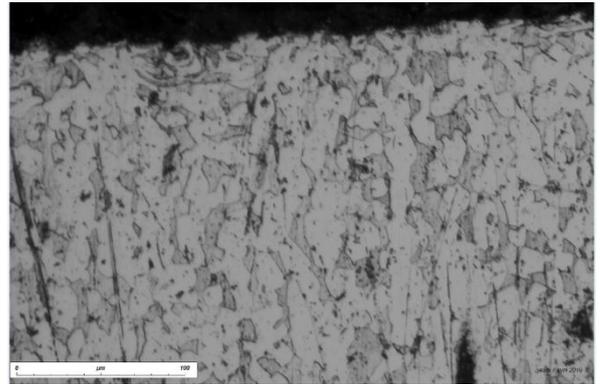
L'observation des découpes des pions pour les différents intervalles de temps étudiés a permis de constater que la déformation plastique s'étend pratiquement sur une profondeur de l'ordre de  $70\mu\text{m}$ , et ce dès le premier intervalle de temps choisi (5min). Cette profondeur de la déformation plastique demeure pratiquement constante, et peut être expliquée par l'introduction de la notion du cycle d'endommagement comme a été proposé aussi par O. Barrau [91].

En effet, avant d'émettre des particules d'usure, la surface du pion se déforme en compression-cisaillement. Cette déformation s'accumule jusqu'à un niveau critique ou seuil de déformation maximale au-delà duquel le cumul de déformation n'est plus possible et la rupture de la couche déformée intervient.

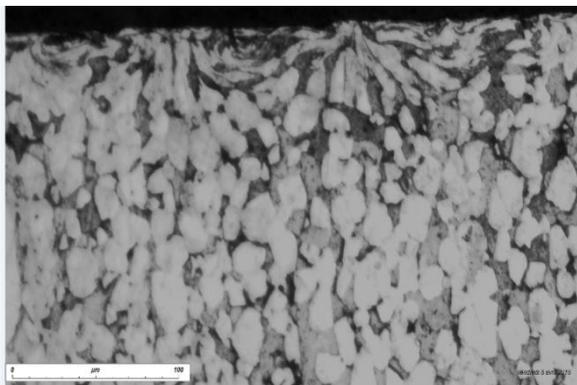
Le niveau de la déformation n'étant pas le même en profondeur, ce qui implique que toute la couche déformée n'atteint pas le seuil critique de déformation maximale. Dès lors, on suppose que seule la partie en extrême surface est enlevée lors de l'émission des débris, et que la couche sous-jacente (moins déformée) devient la nouvelle surface de contact. Ce cycle de renouvellement des surfaces de contact se répète continuellement durant toute la période de l'essai d'usure.



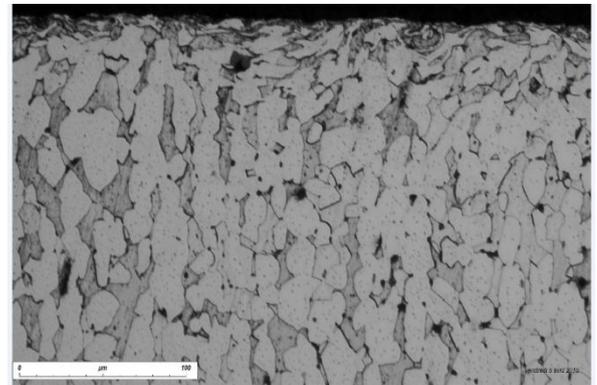
(a) Après 5 min



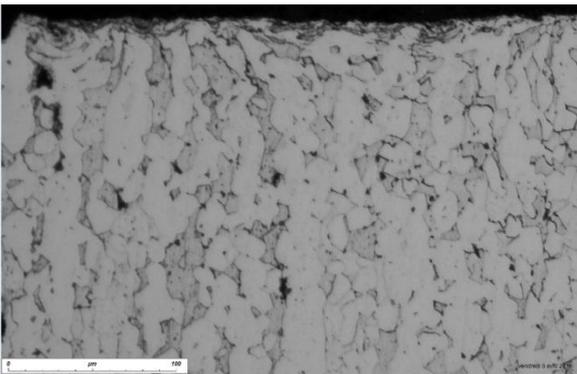
(b) Après 15 min



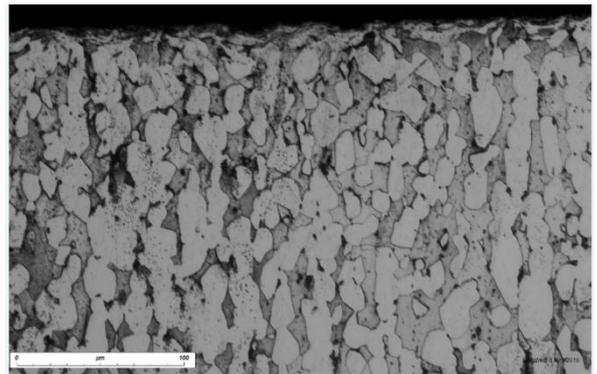
(c) Après 30 min



(d) Après 60 min



(e) Après 120 min



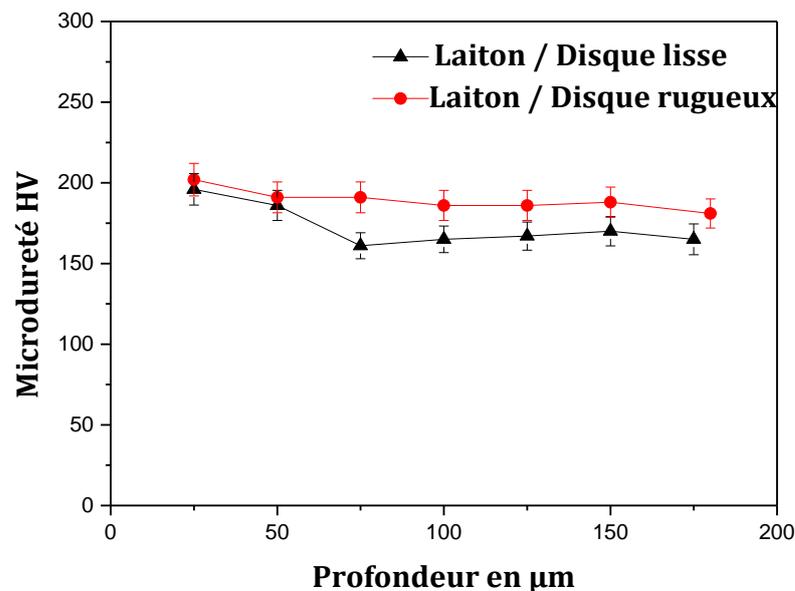
(f) Après 4 heures

**Figure 4.20 :** Image microscopique de la découpe transversale perpendiculairement aux traces d'usure après frottement du couple laiton/lisse à différentes durées d'essai

### 7.3 Mesure de la microdureté

Une série de micro-indentation a été effectuée sur la coupe métallographique de chaque échantillon. Les mesures sont prises par un pas de 25  $\mu\text{m}$  entre les empreintes d'indentation pour minimiser l'interaction des zones déformées plastiquement, induites par les indentations adjacentes.

La figure 4.21 représente le profil, après essai, de la microdureté en fonction de la profondeur par rapport à la surface de contact. On remarque que la dureté des couches superficielles a augmenté par rapport à celle du volume du matériau, bien que cette variation soit très légère dans le cas du disque rugueux. Ce durcissement qui s'étend à une profondeur d'environ 70  $\mu\text{m}$  est dû principalement à la déformation plastique résultante (figure 4.20).



**Figure 4.21** : Evolution de la microdureté en fonction de la profondeur (Pions en laiton après essai)

## 8. Conclusion

L'étude de l'usure du laiton et du bronze a été effectuée en deux campagnes d'essais. La première vise à déterminer la vitesse de glissement à partir de la courbe de Stribeck, permettant d'avoir une usure suffisante avec un coefficient de frottement stable. La seconde campagne d'essais, qui consiste à l'étude de l'usure, nous permet de comparer le comportement au frottement et à l'usure des deux matériaux étudiés.

L'analyse des pions après essais révèle que les deux matériaux présentent une usure abrasive. Cela est indiqué par la présence des stries d'usure développés en surface et des débris en suspension dans l'huile. Les mesures profilométriques et l'analyse quantitative des débris montrent que le laiton présente une usure plus sévère que celle du bronze.

L'analyse microscopique de la découpe des pions permet de suivre l'évolution de l'usure en volume du matériau. Cette dernière montre que le bronze n'a pas été largement affecté par l'usure, contrairement à ce qui a été observé dans le cas du laiton.

Cette observation a été confirmée par les essais interrompus qui montrent une saturation de la déformation plastique en sous-couche, et qui s'étale à une profondeur d'environ 70  $\mu\text{m}$  et reste constante quel que soit la durée de l'essai, ce qui laisse supposer la présence d'un cycle répétitif d'endommagement.

---

*Conclusion générale*

---

## Conclusion générale

L'étude de l'usure des matériaux reste un problème difficile malgré les progrès considérables accomplis, d'où l'intérêt de ce travail de thèse qui va contribuer à la bonne compréhension du comportement au frottement et à l'usure du laiton et du bronze. Parmi les plus utilisés dans l'industrie, on retrouve les deux nuances des alliages cuivreux : le CuZn39Pb2 et le CuSn9P qui font l'objet de notre étude.

L'étude bibliographique a montré que la microgéométrie de la surface, la nature microstructurale du matériau et ses propriétés mécaniques jouent un rôle déterminant dans le phénomène d'usure. Pour cela, ces facteurs ont constitué la base de notre étude comparative du comportement à l'usure des matériaux étudiés dans le régime de lubrification mixte. Les résultats obtenus expérimentalement montrent que ces deux matériaux présentent un comportement tribologique différent.

Les essais de frottement, menés avec deux pressions (1 et 10 MPa) et deux états de surface ( $Ra = 0.15$  et  $2 \mu m$ ), ont montré que le bronze présente un coefficient de frottement très faible comparé à celui du laiton. Une valeur de l'ordre de 0.02, qu'on retrouve généralement dans le régime hydrodynamique, est obtenue dans le cas du bronze pour la faible rugosité. Par contre, le frottement du laiton atteint une valeur de 0.12 qui correspond à celle du régime de lubrification mixte.

L'observation des faciès des pions usés révèle que les deux matériaux présentent une usure abrasive, avec une présence intense des stries d'usure pour le laiton, induisant une forte rugosité et une quantité de débris importante.

Pour la pression de 10 MPa la mesure de l'étendue de la déformation plastique, sur la découpe transversale des pions en laiton, montre que celle-ci est de l'ordre de  $70 \mu m$  ce qui est en bonne cohérence avec les mesures de la microdureté en volume.

La saturation de la déformation plastique, confirmée par les essais interrompus, nous laisse supposer la présence d'un cycle d'endommagement. Contrairement au laiton, le bronze ne présente pas de déformation plastique notable, ce qui traduit sa bonne résistance à l'usure.

Notre étude montre aussi que la dureté des matériaux ne peut être considérée comme le critère principal définissant leur comportement à l'usure. En effet, bien que les matériaux étudiés possèdent des duretés assez proches, leur comportement à l'usure est différent. Ainsi, il est nécessaire de tenir compte des propriétés mécaniques du matériau, tel que la limite élastique, pour avoir un meilleur choix des matériaux antifrictions et une bonne compréhension du phénomène d'usure.

L'utilisation du laiton comme remplacement du bronze met en évidence l'augmentation de sa résistance à l'usure qui ne peut être obtenue que par un traitement de surface ou par un revêtement par un film mince, qui fera l'objet de la suite de ce travail.

---

*Références bibliographiques*

---

## Références bibliographiques

- [1] M. K. Bikramjit Basu, “Tribology of ceramics and composites: A Materials Science Perspective”, The American Ceramic Society, Ed. John Wiley & Sons, 2011.
- [2] F. P. Bowden et D. Tabor, “ The friction and lubrication of solids ”, p. 28- 31, Ed. Oxford, Clarendon Press (1954).
- [3] J. Halling, “Principles of Tribology”, The MacMillan Press, 1975.
- [4] D.H. Buckley, “Surface effects in adhesion, Friction, Wear, and Lubrication”, Elsevier, Amsterdam, 1981.
- [5] J.M. Georges, “Microscopic aspects of adhesion and lubrication”, Proceedings of The 34th International Meeting Of The Société de Chimie Physique, Paris 14-18 September 1981, 1982, P. 812.
- [6] M. Delqué, “Influence de la microstructure sur le comportement tribologique de depots composites projetés plasma”, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2007.
- [7] M. Godet, “The third-body approach: a mechanical view of wear”, Wear, Vol. 100, pp. 437–452, 1984.
- [8] Y. Berthier, L. Flamand, J.-M. Georges, D. Dowson, C.M. Taylor et A.A. Lubrecht, editeurs, “The third body concept interpretation of tribological phenomena”, Volume 31 of Tribology Series, pages 21–30. Elsevier, 1996.
- [9] Y. Berthier, "Background on friction and wear", Lemaître Handbook of materials behavior models, Academic Press San Diego (USA), section 8.2, p. 676-699, 2001.
- [10] P. Blanchard, “Usure induite en petits débattements : Transformation tribologique superficielle d’alliages de titane”,Thèse de doctorat, Ecole Centrale De Lyon, 1991.
- [11] P. Lepasant, “Mécanismes d’accommodation et débits de premiers et de troisième corps à haute température : Etude et modélisation phénoménologique”, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2013.
- [12] Y. Berthier, “Experimental evidence for friction and wear modelling”, Wear, Vol. 139, pp. 77–92, 1990.
- [13] R. Progre et F. Robbe-Valloire “Régime de lubrification mixte”, Techniques. de l’Ingénieur, TRI 1520, 2012.
- [14] H. J. Mathieu, E. Bergmann et R. Gras, “Analyse et technologie des surfaces : Couches minces et tribologie”, Traité des matériaux, tome 4, Presses Polytechniques. 2003.
- [15] J. Frêne, “La Tribologie de l’antiquité a nos jours”,National Tribology Conference 24-26 September 2003.
- [16] P. J. Blau, “Fifty years of research on the wear of metals”, Tribol. Int., Vol. 30, No. 5, pp. 321–331, 1997.

- [17] G.W.Stachowiak et A.W.Batchelor, “Engineering Tribology”, Editions Elsevier, 1993
- [18] H. C. Meng et K. C. Ludema, “Wear Models And Predictive”, Vol. 183, pp. 443–457, 1995.
- [19] R.Gras, “Tribologie: Principes et solutions industrielles”, Dunod. 2008.
- [20] J. F. Archard, “The Temperature of rubbing surfaces”, Wear, Vol. 2, pp. 438–455, 1958.
- [21] M. Amiri et M. Khonsari, “On the thermodynamics of friction and wear”, Entropy, Vol. 12, No. 5, pp. 1021–1049, 2010.
- [22] M. Dupeux, “Science Des Matériaux”, Dunod. 2004.
- [23] Norme ISO NF EN 4287, Edition AFNOR 935571 Saint – Denis LaPlaine, Décembre 1998
- [24] International Organization For Standardization (ISO) NF En ISO 12085 (1998), Spécifications géométriques des produits – méthode du profil – paramètres liés au motif.
- [25] M. Romain Charpenay, “Usure et endommagement de matériaux carbonés comme éléments de contact électrique pour pompe à carburant automobile”, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2011.
- [26] P. Chazalon, “Etude des variations de la résistance électrique du contact balai - bague de l’alternateur”, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, 2013.
- [27] T. Da Silva Botelho, “Contribution a l’étude du comportement elastoplastique de surfaces métalliques rugueuses revetues d’un metal de faible dureté”, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2004.
- [28] J.F.Archard, “Surface Topography And Tribology”, Tribology International, pp. 213–220, October 1974.
- [29] D. J. Whitehouse et J. F. Archard, “The properties of random surfaces of significance in their contact”, Proc. Roy. Soc., pp. 97–121, 1970.
- [30] F. Robbe-Valloire, B. Paffoni et R. Progri, “Load transmission by elastic , elasto-plastic or fully plastic deformation of rough interface asperities”, Vol. 33, pp. 617–633, 2001.
- [31] K. L. Woo. et T. R. Thomas, “Contact of rough surfaces: a review of experimental work”, Wear, Vol. 58, pp. 331–340, 1980.
- [32] J. F. Kragelski, “Surface topography et tribology”, Tribology International., pp. 213–220, 1974.
- [33] J. A. Greenwood And J. B. P. Williamson, “Contact of nominally flat surfaces”, Proc. Roy. Soc., pp. 300–319, 1966.
- [34] I.V. Gragelski, “Friction And Wear”, Pergamond press, 1982.
- [35] I.F.Bishop R. W.Snidle, “An investigation of alternative methods of quantifying running in surface”, SAE 840 100.
- [36] H. Moalic, J.A. Fitzpatrick, A A. Torrance, “A spectral approach to the analysis of rough surfaces”, J.of Tribol., Vol. 111, N°2, pp. 359–363, 1989.

- [37] F. Robbe-Valloire, “Statistical analysis of asperities on a rough surface”, *Wear*, Vol. 249, pp. 401–408, February 2001.
- [38] F. Robbe-Valloire And R. Proghi, “Mechanisms developed at the asperity scale for mixed lubrication between parallel surfaces,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.*, Vol. 226, No. 12, pp. 1141–1153, Sep. 2012.
- [39] S.Senhadj, F. Robbe-Valloire, F. Belarifi, “Experimental validation of a mixed lubrication model for contact between parallel rough surfaces”, *World Tribology Congress 2013*, September 8 – 13, 2013, Torino, Italy.
- [40] J.-L. Ligier, “Avaries en lubrification : Application aux paliers”, Ed. TECHNIP, 2004.
- [41] S. Fouquet, “Comportement tribologique de matériaux composites à fibres de carbone et à matrice céramique dans le système Si-C”, Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 2003.
- [42] B. Damiens, “Modélisation de la lubrification sous-alimentée dans les contacts elasto-hydrodynamiques elliptiques”, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2003.
- [43] F. Belarifi, J. Blouet, G. Inglebert et A. Benamar, “Confrontation d’un modèle théorique en lubrification mixte avec une étude expérimentale du comportement au frottement d’une denture d’engrenage droit”, *Mécanique & Industries* 7, 527–536, 2006.
- [44] O. Reynolds, “The theory of lubrication and its application to Mr. Beauchamp tower’s experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil”, *Philosophical Trans. R. Soc. London*, pp. 157–234, 1886.
- [45] J. A. Brandão, M. Meheux, F. Ville, J. H. O. Seabra and J. Castro, “Comparative overview of five gear oils in mixed and boundary film lubrication,” *Tribol. Int.*, Vol. 47, pp. 50–61, Mar. 2012.
- [46] L. Mattei, F. Di Puccio, B. Piccigallo, And E. Ciulli, “Lubrication and wear modelling of artificial hip joints : A review”, *Tribology Int.*, Vol. 44, No. 5, pp. 532–549, 2011.
- [47] K. Kato, “Wear in boundary or mixed lubrication regimes”, In *Leeds-Lyon Symposium on Tribology*, Volume 40, Elsevier, Amsterdam, pp. 3–17, 2000.
- [48] W. Wang, H. Chen, Y. Hu, And H. Wang, “Effect of surface roughness parameters on mixed lubrication characteristics”, *Tribol. Int.*, Vol. 39, No. 6, pp. 522–527, Jun. 2006.
- [49] J. T. Burwell, “Survey of possible wear mechanisms”, *Wear*, Vol. 1, No. 2, pp. 119–141, 1957.
- [50] “Les lubrifiants moteur pertes par frottement et usure”, *Publications de l’Institut Français du Pétrole. Collection colloques et séminaires*, 33, Paris : Ed. Technip, 1979.
- [51] R. Dragomir Fatu, “Etude et modélisation de la lubrification mixte et des modes d’avaries associés dans les paliers moteur”, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2009.
- [52] E. Rabinowicz, “Friction and wear of materials”, 2nd Ed, J. Wiley, 1995.

- [53] G. W. Stachowiak, “Wear: Materials, mechanisms and practice”, John Wiley, 2005.
- [54] J. Ayel & B. Maurice “Lubrifiants et fluides pour l’automobile”, Ed. Technip, 1998.
- [55] N. Fillot, “Etude mécanique de l’usure - modélisation par éléments discrets des débits de troisième corps solide -”, Thèse de doctorat, Ecole doctorale des sciences pour l’ingénieur de Lyon, 2004.
- [56] F.T. Barwell, “Wear of metals”, *Wear*, Vol. 1, No. 4, pp. 317–332, 1958.
- [57] S. K. Rhee, “Wear equation for polymers sliding against metal surfaces”, *Wear*, Vol. 16, No. 6, pp. 431–445, 1970.
- [58] P. Wriggers, “Computational contact mechanics”, Ed. John Wiley, 2002.
- [59] M. Zbinden And V. Durbec, “A kinetic model for impact/sliding wear of pressurized water reactor internal components: application to rod cluster control assemblies”, 1996.
- [60] N. Brie, “Opérateur de calcul de l'usure”, Code Aster, 2009.
- [61] S. C. Lim And M. F. Ashby, “Wear-Mechanism Maps”, *Acta Met.*, Vol. 35, No. I, P. L-24, 1987.
- [62] S. . Lim, “Recent developments in wear-mechanism maps”, *Tribol. Int.*, Vol. 31, No. 1–3, pp. 87–97, Jan. 1998.
- [63] W. Emmens, “The influence of surface roughness on friction”, *Proc. 15<sup>th</sup>-IDDRG Biennial Conference. Dcarnborn*, p. 63-70, 1988.
- [64] E. Felder and V. Samper, “Experimental study and theoretical interpretation of the frictional mechanisms in steel sheet forming”, *Wear*, Vol. 178, No. 12, pp. 85–94, 1994.
- [65] C. Vilarinho, J. P. Davim, D. Soares, F. Castro, and J. Barbosa, “Influence of the chemical composition on the machinability of brasses,” *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 170, No. 1–2, pp. 441–447, 2005.
- [66] F. Schultheiss, D. Johansson, V. Bushlya, J. Zhou, K. Nilsson, and J.-E. Ståhl, “Comparative study on the machinability of lead-free brass,” *J. Clean. Prod.*, Vol. 149, pp. 366–377, 2017.
- [67] R. A. Higgins, “Engineering metallurgy. Applied Physical Metallurgy”, 6th ed., Arnold, 1993.
- [68] L. K. Tevfik Küçükömeroğlu, “The friction and wear properties of cuzn39pb3 alloys under atmospheric and vacuum conditions,” *Wear*, Vol. 309, pp. 21–28, 2014.
- [69] B. S. Ünlü, “Determination of usability of boronized ferrous based materials as bearing and tribological properties in journal bearings,” Celal Bayar University Manisa, Turkey, 2004.
- [70] R.F. Schmidt and D.G. Schmidt, “Selection and application of copper alloy castings”, Vol 2 ASM Handbook, pp. 3446– 3557, 1990.
- [71] L. Rapoport, V. Leshchinsky, M. Lvovsky, I. Lapsker, Yu Volovik, R. Tenne, “Load bearing capacity of bronze , iron and iron – nickel powder composites containing fullerene-like WS 2 nanoparticles”, *Tribology Int.*, vol. 35, pp. 47–53, 2002.

- [72] J. Gronostajski, W. Chmura, and Z. Gronostajski, "Bearing materials obtained by recycling of aluminium and aluminium bronze chips", *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 125–126, no. Supplement C, pp. 483–490, 2002.
- [73] A. Türk, C. Kurnaz, and H. Şevik, "Comparison of the wear properties of modified ZA-8 alloys and conventional bearing bronze", *Mater. Des.*, vol. 28, no. 6, pp. 1889–1897, 2007.
- [74] J. P. Davim, "Experimental study of the tribological behaviour of the brass/steel pair", *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 100, no. 1, pp. 273–277, 2000.
- [75] B. K. Prasad, A. K. Patwardhan, and A. H. Yegneswaran, "Wear characteristics of a zinc-based alloy compared with a conventional bearing bronze under mixed lubrication conditions: effects of material and test parameters", *Can. Metall. Q.*, vol. 40, no. 2, pp. 193–210, 2001.
- [76] C. Rotty, A. Mandroyan, M. Doche, and J. Y. Hihn, "Electropolishing of CuZn brasses and 316L stainless steels : Influence of alloy composition or preparation process ( ALM vs. Standard method )", *Surf. Coat. Technol.*, vol. 307, pp. 125–135, 2016.
- [77] B. K. Prasad, "Sliding wear behaviour of bronzes under varying material composition, microstructure and test conditions," *Wear*, vol. 257, pp. 110–123, Jul. 2004.
- [78] A. Mishra, B. Kad, F. Gregori, and M. Meyers, "Microstructural evolution in copper subjected to severe plastic deformation: Experiments and analysis", *Acta Mater.*, vol. 55, no. 1, pp. 13–28, Jan. 2007.
- [79] B. Lunn, "The wear resistance of tin bronzes and related alloys", *Wear*, pp. 401–406, 1965.
- [80] V. Lebreton, "Étude métallurgique et optimisation de la fabrication d'alliages a base de cuivre coules en continu - Analyse de la ségrégation et des phénomènes de précipitation dans les alliages CuNi15Sn8, CuNi6Si1.8Cr, CuTi3Al2 et CuTi3Sn2.75", Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2007.
- [81] M. Grenier, "Microstructure et résistance à l'usure de revêtements créés par fusion laser avec gaz réactifs sur du titane", Thèse de doctorat, Université Laval, 1998.
- [82] V. Vitek, V. Paidar, in: J.P. Hirth (Ed.), *Dislocations in Solids*, vol. 14, Elsevier, Amsterdam, 2008
- [83] F. A. Sadykov, N. P. Barykin, and I. R. Aslanyan, "Wear of copper and its alloys with submicrocrystalline structure", *wear*, pp. 649–655, 1999.
- [84] G. Pürçek, T. Savaşkan, T. Küçükömeroğlu, and S. Murphy, "Dry sliding friction and wear properties of zinc-based alloys", *Wear*, vol. 252, no. 11–12, pp. 894–901, Jul. 2002.
- [85] P. García, S. Rivera, M. Palacios, and J. Belzunce, "Comparative study of the parameters influencing the machinability of leaded brasses", *Eng. Fail. Anal.*, vol. 17, no. 4, pp. 771–776, 2010.
- [86] N. Gane, "The effect of lead on the friction and machining of brass", *Philos. Mag. A*, vol. 43, pp. 545–566, 1981.

- [87] F. Belarifi, “Comportement au frottement des engrenages cylindriques droits modelisation theorique et confrontation experimentale”, Thèse de doctorat, Universite des Sciences et de la Technologie d’Oran (Mohamed Boudiaf), 2007.
- [88] S. Senhadji, F. Belarifi, and F. Robbe-valloire, “Experimental investigation of friction coefficient and wear rate of brass and bronze under lubrication conditions”, *Tribol. Ind.*, vol. 38, no. 1, pp. 102–107, 2016.
- [89] Isabel Nogueira, “Transformations des couches superficielles des matériaux induites par la phase de rodage lors de régimes de lubrification mixte et limite”, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers centre de Paris, 2004.
- [90] S. Senhadji, F. Belarifi, and F. Robbe-valloire, “Influence de la microstructure dans le comportement de l’usure du laiton en milieu lubrifié”, 29eme Journées Internationales Francophones de Tribologie - La Tribologie dans l’Innovation Mécanique, Supméca, Paris, France, 17-19 mai 2017.
- [91] O. Barrau, “Etude du frottement et de l’usure d’acier à outils de travail à chaud”, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.

---

*Annexes*

---

## Annexe 1

## Critères de rugosité selon la norme ISO ou AFNOR.

## Paramètres d'amplitude

Paramètres de Profil total	Paramètres de rugosité	Paramètres d'ondulation	Signification	Définition
<b>SAILLIES et CREUX</b>				
Pp	Rp	Wp	Hauteur maxi de saillie du profil	$Max(Zp_i)$
Pv	Rv	Wv	Profondeur maxi de creux du profil	$Max(Zv_i)$
Pz	Rz	Wz	Hauteur maxi du profil (sur une longueur de base)	$Rz = Rp + Rv$
Pc	Rc	Wc	Hauteur moyenne des éléments du profil	$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Zt_i$
Pt	Rt	Wt	Hauteur maxi du profil (sur la longueur d'évaluation)	$Rt \geq Rz$
<b>MOYENNE DES ORDONNEES</b>				
Pa	Ra	Wa	Moyenne arithmétique des ordonnées des points du profil par rapport à la d.m.c (sur une longueur de base)	$\frac{1}{l} \int_0^l  Z(x)  dx$
Pq	Rq	Wq	Moyenne quadratique du profil évalué (sur une longueur de base)	$\sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx}$
Psk	Rsk	Wsk	Facteur d'asymétrie du profil (Skewness) défini sur la c.d.a (sur une longueur de base)	$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[ \frac{1}{l} \int_0^l Z^3(x) dx \right]$
Pku	Rku	Wku	Facteur d'aplatissement du profil (Kurtosis) défini sur la c.d.a (sur une longueur de base)	$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left[ \frac{1}{l} \int_0^l Z^4(x) dx \right]$
<b>MOTIFS</b>				
	R	W	Profondeur moyenne des motifs	$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_i$

	Rx	Wx	Profondeur maximale d'une irrégularité de profil (sur la longueur d'évaluation)	
		Wte	Profondeur totale d'ondulation	
	Rk		Profondeur du profil écrêté	
	SR	SW	Moyenne quadratique des profondeurs	
	Rpk		Hauteur moyenne des pics éliminés (pour un profil écrêté)	
	Rvk		Hauteur moyenne des creux éliminés (pour un profil écrêté)	

### Paramètres d'espacement

Paramètres de Profil total	Paramètres de rugosité	Paramètres d'ondulation	Signification	Définition
Psm	Rsm	Wsm	Moyenne des largeurs des éléments du profil (sur une longueur de base)	
	AR	AW	Moyenne arithmétique des longueurs des motifs (sur la longueur d'évaluation)	$AR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AR_i$
SAR			Moyenne quadratique des pas moyens des motifs	

### Paramètres hybrides

Paramètres de Profil total	Paramètres de rugosité	Paramètres d'ondulation	Signification	Définition
PΔq	RΔq	WΔq	Valeurs quadratiques des pentes locales $dZ/dX$ (sur une longueur d'onde)	

### Paramètres associés aux courbes

Paramètres de Profil total	Paramètres de rugosité	Paramètres d'ondulation	Signification	Définition
Pmr(c)	Rmr(c)	Wmr(c)	Taux de longueur portante Rapport de la longueur portante du profil à un niveau donné $c$ , $Mi(c)$ à la longueur d'évaluation $le$	
Pδc	Rδc	Wδc	Différence de hauteur de coupe du profil Distance entre 2 niveaux de coupe correspondant à des taux de longueur donnés	
Pmr	Rmr	Wmr	Taux de longueur portante relatif	

## Annexe 2

## Modélisation de la géométrie

Le tableau ci-dessous regroupe les modèles théoriques de base. La plupart de ces modélisations considèrent des surfaces isotropes, avec des aspérités modélisées par des calottes hémisphériques.

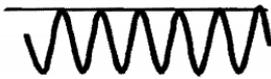
Variabes	Limites	Equations	Observations	Références
-Aucune	Usinage périodique			Bélicor (1950)
-Altitude des sommets	Pseudo-périodicité			Greenwood (1966)
-Altitude des sommets -Rayon des aspérités	-Surfaces gaussiennes -Auto-corrélation en exponentielle décroissante	$f(z^*, C^*) = \frac{3}{2\pi\sqrt{2}} \exp\left[-\frac{1}{2}z^{*2}\right] \times \exp\left[-\left(z^* - \frac{C^*}{2}\right)^2\right] \operatorname{erf}\left(\frac{C^*}{2}\right)$ $z^* = \frac{z}{R_q} \quad C^* = c \frac{l^2}{R_q}$		Whitehouse Archard
-Altitude des sommets -Rayon des aspérités -Espacement entre aspérités		$f_1(z) = \frac{1}{SAIt\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z - Alt}{SAIt}\right)^2\right]$ $f_2(\mathcal{R}^*) = \frac{1}{a\mathcal{R}^*\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2a^2}(\log \mathcal{R}^* - b)^2\right]$ $\mathcal{R}^* = \frac{\mathcal{R}}{SRAD}$		Robbe-Valloire

Tableau A.2.1 : Comparaison des modélisation

## Annexe 3

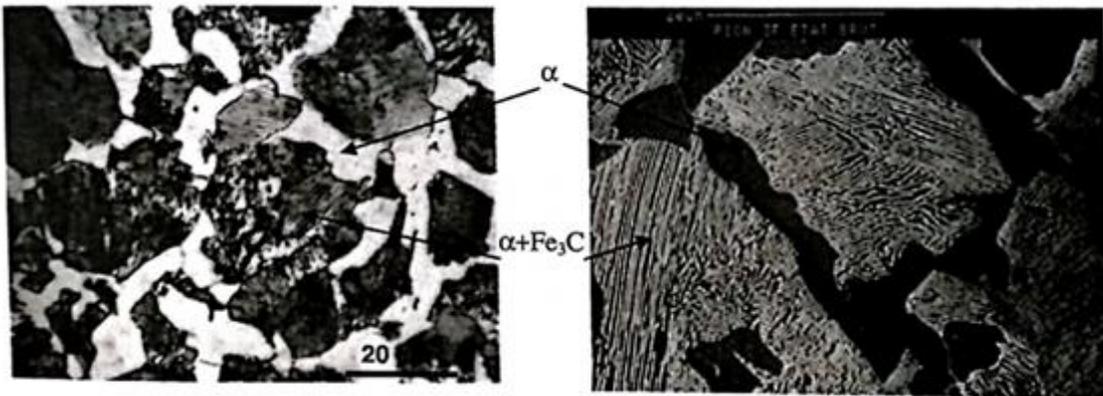
### Les matériaux d'étude

#### Les pistes :

L'acier utilisé est un acier non allié au carbone, de type XC42. Cet acier hypocutectoïde à 0,42 %C (tableau A.3.1) présente une constitution type ferrite proeutectoïde + perlite (aciculaire), visible sur la micrographie de la figure A.3.1.

**Tableau A.3.1 :** Caractéristiques du XC 42

Matériau XC 42									
Composition	Eléments	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Mg	Fe
	Pourcentage		0,42	0,25	0,65	0,16	0,09	002	-
Caractéristiques mécaniques		Re(MPa)				HV			
		340				250			



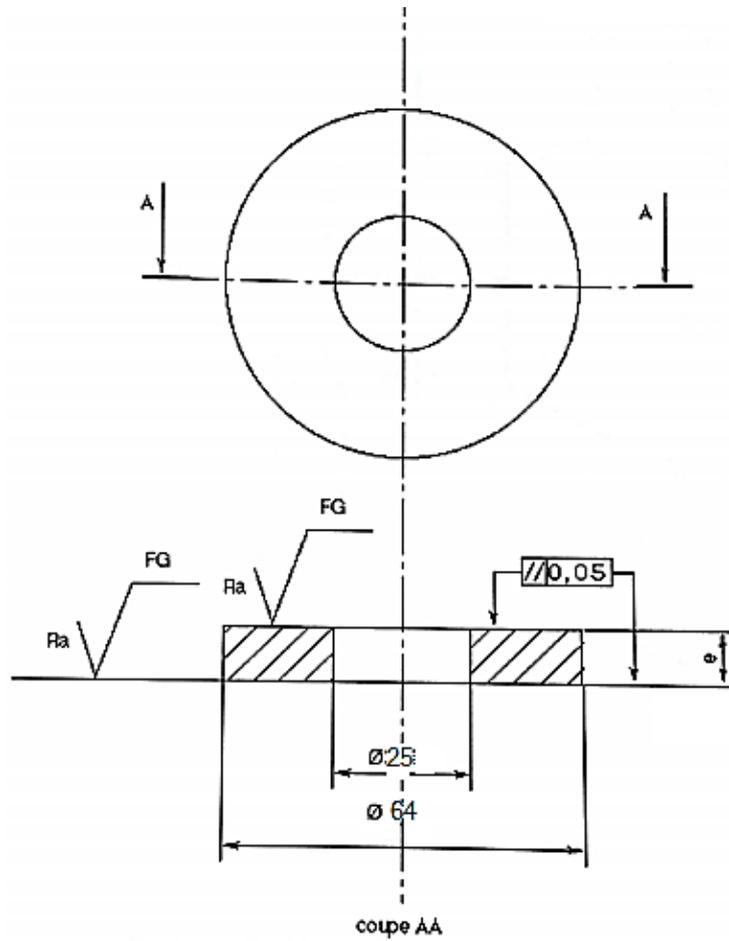
**Figure A.3.1** Microstructure de l'acier XC42 après attaque au réactif Nital

#### Les frotteurs :

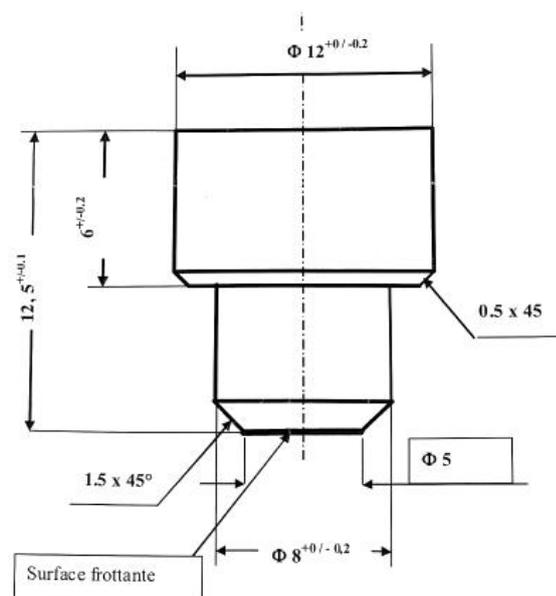
Deux types de matériaux sont utilisés pour les frotteurs: le laiton **CuZn39Pb2** et le bronze **CuSn9P** qui sont caractérisés dans le chapitre 3

## Dessins de définition des éprouvettes

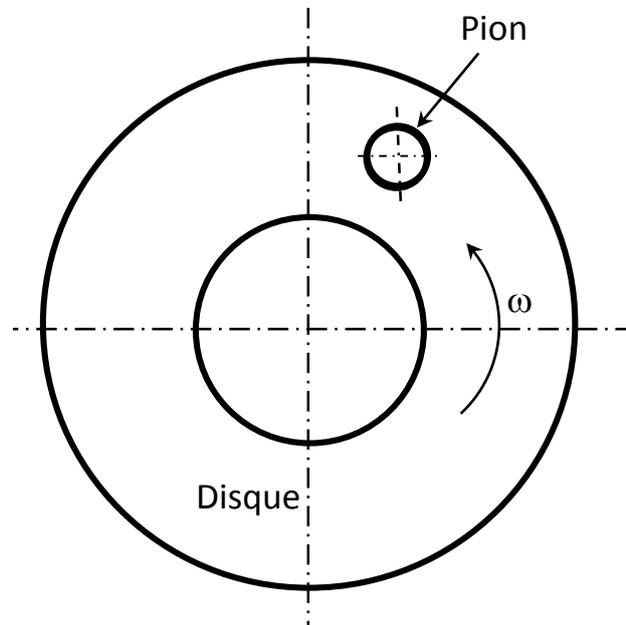
### a) Dessin de définition des pistes d'essais :



### b) Dessin de définition des frotteurs d'essais :



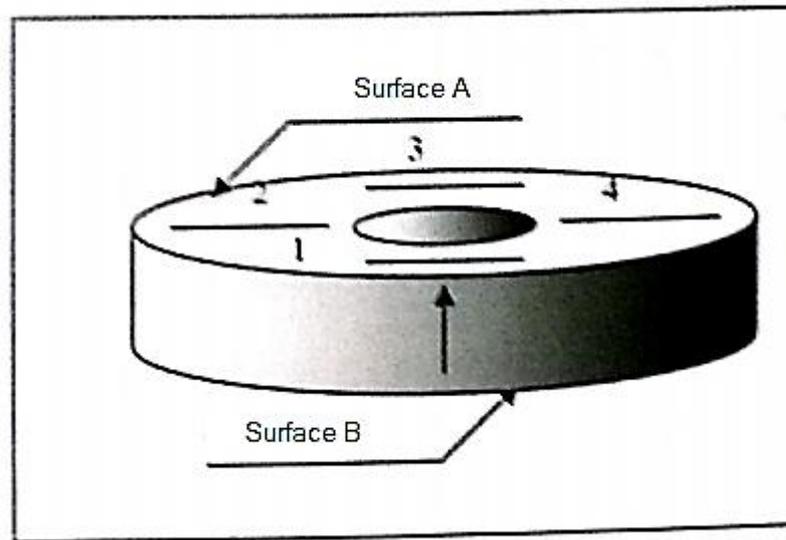
Détail de disposition du pion par rapport au disque en vue de dessus :



## Annexe 4

### Analyse des surfaces

1. La procédure de mesure des profils des états de surface après essais est indiquée par la figure A.4.1



**Figure A.4.1 :** Zones de prise de mesures profilométriques

**1 , 2 , 3 , 4 :** Positions des prises de mesures profilométriques perpendiculairement aux stries d'usure

**A :** surface du disque

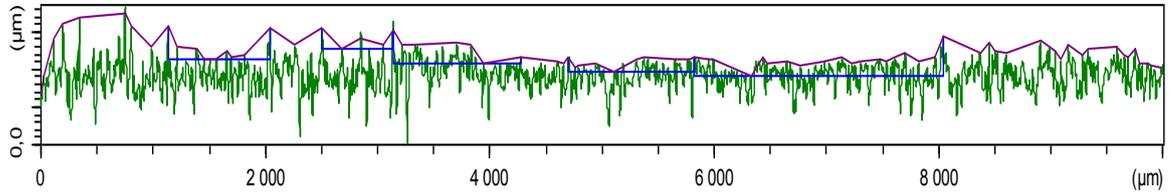
**B :** surface opposée du disque

## 2. Mesure de rugosité sur les traces d'usure

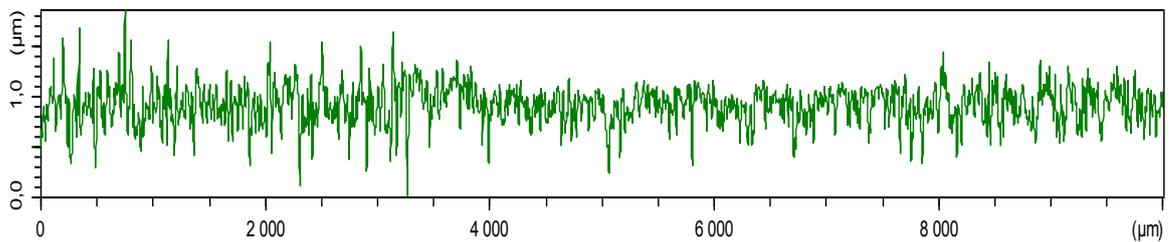
Disque lisse  $R_a = 0.15$  utilisé pour les mesures d'usure

### Traitements normalisés

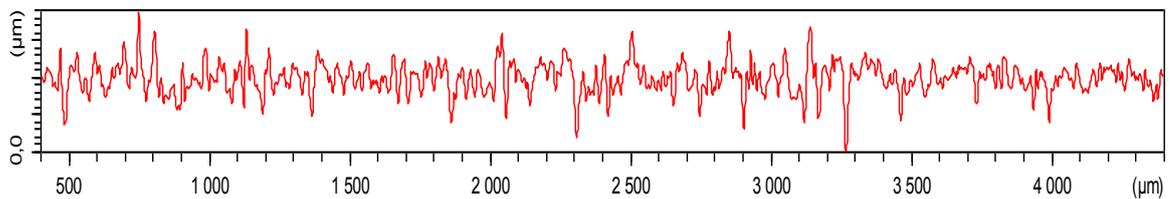
*Profil primaire + LES + Motif W*



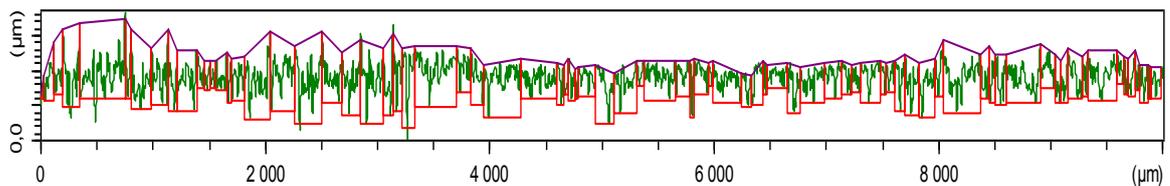
*Profil Primaire*



*Profil de rugosité normal (Ra)*



*Profil primaire + LES + Motif R*



*Paramètre de rugosité*

$R_a = 0.157 \mu\text{m}$

$R_{sm} = 61.991 \mu\text{m}$

$R_{sk} = -0.304$

*Paramètre du Motif*

$R = 0.675 \mu\text{m}$

$AR = 127.949 \mu\text{m}$

$SR = 0.246 \mu\text{m}$

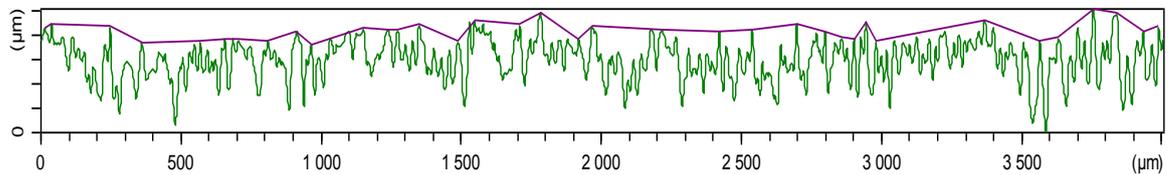
$SAR = 88.248 \mu\text{m}$

### 3. Mesures de rugosité des pions en laiton

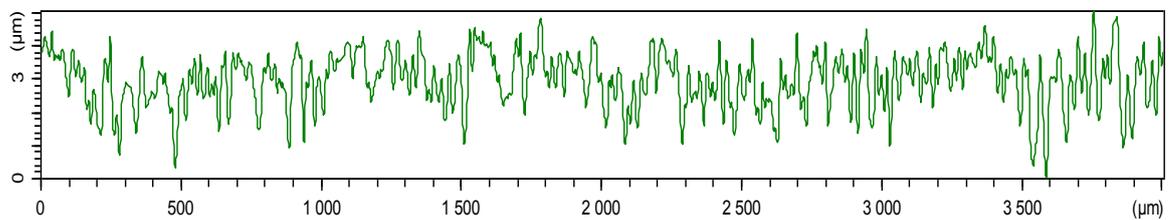
Pion en laiton utilisé avec disque 1 (essai d'usure)

#### Traitements normalisés

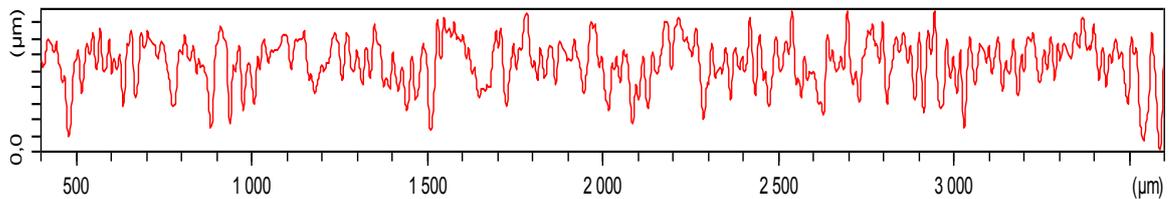
*Profil primaire + LES + Motif W*



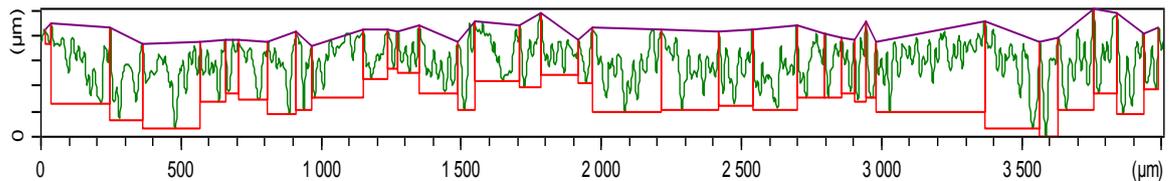
*Profil Primaire*



*Profil de rugosité normal (Ra)*



*Profil primaire+LES+Motif R*



#### *Paramètre de rugosité*

Ra= 0.586 $\mu$ m

Rsm=63.981 $\mu$ m

Rsk= -0.612

#### *Paramètre du Motif*

R=2.682 $\mu$ m

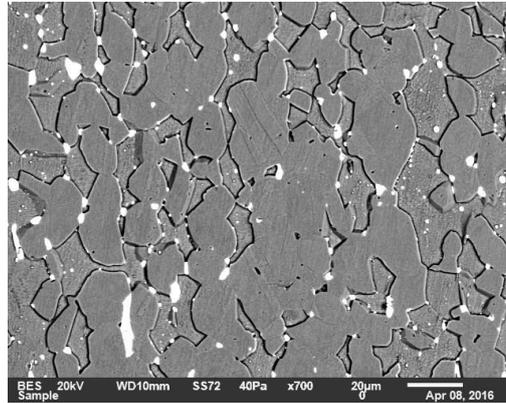
AR=113.600 $\mu$ m

SR=0.728 $\mu$ m

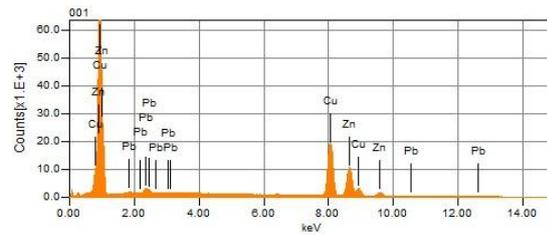
SAR=75.882 $\mu$ m

## Annexe 5

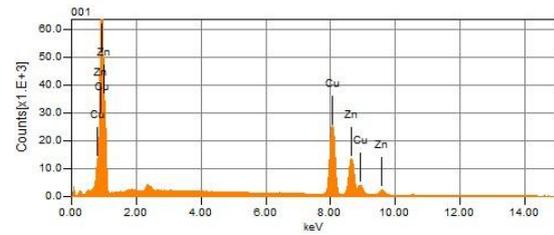
## Microanalyse du pion en laiton



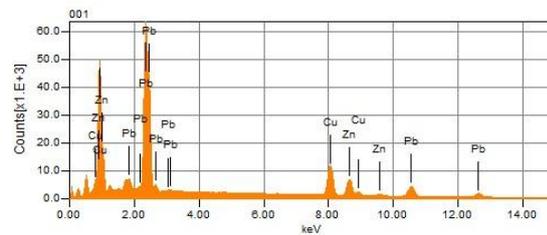
Point sur un grain "alpha"		
	mass%	Atom%
Cu	61.52	62.19
Zn	38.48	37.81
Total	100.00	100.00



Point sur un grain "beta"		
	mass%	Atom%
Cu	55.31	56.01
Zn	44.69	43.99
Total	100.00	100.00



Point blanches		
	mass%	Atom%
Cu	20.67	37.91
Zn	14.34	25.55
Pb	64.9	36.54
Total	100.00	100.00



---

## Annexe 6

### Communications scientifiques et Publication

#### Communications :

- S.SENHADJI ; F.BELARIFI, *Influence de la micro géométrie dans un contact, Third International Meeting on Dielectric Materials, IMDM'3*, December 14-18, 2011, Monastir- Tunisie
- S.SENHADJI ; F.BELARIFI, *Le Comportement de la Micro Géométrie en Contact Lubrifié dans le Domaine Elastique, CNPA 2012*, 10ème Congrès National de la Physique et de ses Applications, 20-21-22 Novembre 2012, Mostaganem, Algérie
- S. SENHADJI, F.BELARIFI Et F. ROBBE-VALLOIRE, *Etude expérimentale d'un contact de surfaces rugueuses lubrifiées dans le régime de lubrification mixte*, La 2ème Rencontre Francophone sur les Matériaux Isolants, *RFMI'2*, du 17 au 19 décembre 2012, Oran Algérie
- S. SENHADJI, F. ROBBE-VALLOIRE AND F. BELARIFI, *Experimental validation of a mixed lubrication model for contact between parallel rough surfaces*, World Tribology Congress, *WTC 2013*, September 8 – 13, 2013, Torino, Italy
- S.SENHADJI, F.BELARIFI, F. ROBBE-VALLOIRE, *Influence de la microstructure dans le comportement de l'usure du laiton en milieu lubrifié, JIFT 2017*, 29eme journées internationales francophones de tribologie - La Tribologie dans l'Innovation Mécanique - 17-19 mai 2017, Supméca, Paris, France

#### Publication :

- S. Senhadji, F. Belarifi, and F. Robbe-valloire, "Experimental investigation of friction coefficient and wear rate of brass and bronze under lubrication conditions", *Tribol. Ind.*, vol. 38, no. 1, pp. 102–107, 2016.

## Résumé :

L'étude du contact entre deux corps en mouvement met en évidence des phénomènes de frottements et d'usure qui dépendent des qualités intrinsèques des matériaux, des états de surfaces ainsi que des lubrifiants utilisés. L'étude expérimentale présentée dans cette thèse vise à comparer le comportement tribologique, en régime de lubrification mixte, de deux nuances d'alliage de cuivre : le laiton (CuZn39Pb2) et le bronze (CuSn9P). Des essais d'usure sont menés sur un tribomètre pion disque pour des vitesses de glissement et des rugosités des disques différentes. Bien que les matériaux d'étude possèdent des duretés comparables, leur comportement à l'usure est totalement différent, où le bronze offre une meilleure résistance à l'usure. Une analyse microstructurale est effectuée pour mieux comprendre les mécanismes impliqués dans le processus d'usure de ces matériaux.

*Mots clés : frottement, usure, lubrification, déformation plastique, bronze, laiton.*

## Abstract:

The study of the contact between two moving bodies reveals phenomena of friction and wear that depend on the intrinsic qualities of materials, surface conditions and lubricants used. The experimental study presented in this thesis aims to compare the tribological behavior, under a mixed lubrication regime, of two copper alloy grades: brass (CuZn39Pb2) and bronze (CuSn9P). Wear tests were carried out by using a pin-on-disc tribometer, with a plane contact mode and a pure sliding velocity for different roughnesses of the discs. Although the study materials who have comparable hardness, their wear behavior is very different, where the bronze offers a better resistance to wear. A microstructural analysis is performed to better understand the mechanisms involved in the wear process of these materials.

*Keywords: Friction, Wear Lubrication, Plastic deformation, Copper and brass.*

## ملخص:

ان السلوك التريبولوجي لأزواج المعادن في حالة الحركة يبين مدى أهمية ظواهر الاحتكاك التآكل التي تعتمد على الصفات الذاتية للمواد، حالة السطح، ومواد التشحيم المستعملة. الدراسة التجريبية، تهدف لمقارنة السلوك التريبولوجي تحت نظام التزيت المختلط لنوعين من مزائج النحاس (ليتون وبرونز). عدة تجارب للتآكل اجرية على التريبولومتر من نوع قضيب اسطوانة بسرعة ثابتة 0,5 م/ثا، ضغطين مختلفين و خشونة أقراص مختلفة. على الرغم من ان للمواد المستعملة صلابة مماثلة الا ان سلوكهم مختلف تماما، حيث ان البرونز يتميز بمقاومة أفضل للتآكل. لمحاولة الفهم الأفضل للآليات المساهمة في عملية التآكل تم اجراء عدة إجراءات مجهرية.