



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

N° d'ordre :/Doct/2015

Série : /GM/2015

THESE

Présentée Par

Choubeila Boubechou

Pour l'obtention de Diplôme de

Doctorat en Sciences en Génie Mécanique

Spécialité : **Construction**

THEME

CONTRIBUTION A L'ETUDE DU COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE
DES COUPLES GLISSANTS ACIER-ACIER ET ACIER-BRONZE

Soutenu le

Devant la commission d'examen :

Président :	Abdelhadi Beghidja	Prof. Université des Frères Mentouri, Constantine
Rapporteur :	Ali Bouchoucha	Prof. Université des Frères Mentouri, Constantine
Examineurs :	Brahim Necib	Prof. Université des Frères Mentouri, Constantine
	Ammar Haiahem	Prof. Université Badji Mokhtar, Annaba
	Lahmar Mustapha	Prof. Université du 08 Mai 1945, Guelma

Résumé

Titre de thèse :

Contribution a l'étude du comportement tribologique des couples glissants
acier-acier et acier-bronze

Résumé

Ce travail s'intéresse à l'étude expérimentale du comportement électromécanique et tribologique sec des couples glissants cuivre-acier, cuivre-graphite, acier-acier et laiton-acier pour des paramètres fonctionnels bien définis (charge normale, vitesse de glissement, paramètre temps, géométrie de contact et intensité du courant électrique). Dans ce but, une approche expérimentale sur des différents échantillons à été réalisée en utilisant un test de type pion disque modifié en câble-disque. Parallèlement à ces études expérimentales, une approche analytique (modèle d'Archard) a été entreprise afin de caractériser les différents paramètres géométriques (rayon réel de contact), thermiques (température à l'interface, quantité de chaleur et le coefficient de partage) et électromécaniques (contrainte de rupture, champ électrique et épaisseur du film d'oxyde).

Cette étude a permis en outre, d'optimiser les conditions de fonctionnement des tribo-contacts avec et sans courant électrique afin d'augmenter la durée de vie de ces couples et faire un choix judicieux du meilleur couple.

La discussion des résultats obtenus repose sur des observations et des analyses des surfaces usées des éléments de contact. Ces analyses montrent que le courant électrique a un effet significatif sur la nature, la composition ainsi que sur l'épaisseur de la couche oxydée. En effet, le mécanisme de formation et de rupture de ce film d'oxyde régit le comportement tribologique des différents couples étudiés.

Mots clés : Frottement sec, usure, charge normale, vitesse de glissement, courant électrique, film d'oxyde, contrainte de rupture, champ électrique, cuivre-acier, cuivre-graphite, laiton-acier et acier-acier.

Abstract

Contribution to the study of the tribological behavior of couples sliding steel-steel and steel-bronze

Abstract

This work focuses on the experimental study of the electromechanical and tribological behavior of sliding couples copper-steel, copper-graphite, steel-steel and brass-steel, for well-defined functional parameters (normal load, sliding speed, time setting, contact geometry and intensity of the electric current). For this purpose, an experimental approach on different samples was performed using a disc pin type modified test disc-cable. Parallel to these experimental studies, an analytical approach (model of Archard) was undertaken to characterize the different geometric parameters (real radius of contact), thermal (mean temperature at the interface, and the amount of heat partition coefficient) and electro-mechanical (breaking stress, electric field and thickness of the oxide film).

This study further optimize the conditions of the tribo-contact operation with and without electrical current to increase the lifetime of these pairs and make a wise choice for the best couple.

The discussion of the results is based on observations and analyzes of the worn surfaces of the contact elements. This analyzes show that the electric current has a significant effect on the nature, the composition and the thickness of the oxidized layer. Indeed, the mechanism of formation and rupture of the oxide film governs the tribological behavior of the different studied couples.

Keywords: Dry friction, wear, normal load, sliding speed, electrical current, oxide Film, breaking stress, electric field, copper-steel, copper-graphite, brass-steel and steel-steel.

- , -

,

-

-

. -

.

Nomenclature

- P : La charge normale [N]
r : Le rayon de la sphère [mm]
ν : Le coefficient du poisson
E : Le module de Young [N/mm²]
ΔV : Le volume arraché [mm³]
K : Le coefficient d'usure compris entre 10⁻⁴ et 10⁻⁹
L : La distance de glissement [mm]
H : La dureté du matériau le plus tendre dans le contact [Pa]
P₀ : La pression de transition plastique du matériau en contact [Pa]
F_t : La force de frottement [N]
τ : La contrainte de cisaillement [N/mm²]
μ : Le coefficient de frottement
τ_{max} : La contrainte critique de cisaillement [N/mm²]
F_z : La charge normale appliquée sur le frotteur [N]
A_n : L'aire apparente du contact [mm²]
A_r : L'aire réelle de contact [mm²]
P_o : Pression de contact maximale [N/m²]
Y : Le seuil de plasticité [N/mm²]
θ_m : La température moyenne de contact [°C]
θ_f : La température flash [°C]
ρ : Le poids spécifique [Kg/m³]
λ : La conductibilité thermique [W/m°C]
C_p : La chaleur spécifique [J/Kg°C]
a : Le rayon de la surface réelle de contact [μm]
W : Le taux d'usure [mm³/s]
d : La distance du contact entre aspérités [μm]
A : La constante d'Arrhenius relative à la loi parabolique [kg²/m⁴]
Q_{ac} : L'énergie d'activation relative à la loi parabolique [kJ/mol]
V : La vitesse de glissement [m/s]
f : La fraction de l'oxyde [%]
ρ : La masse volumique de l'oxyde [kg/cm³]

- ξ_c : L'épaisseur critique d'oxyde [μm]
R : La constante thermodynamique des gaz parfaits [J/mol.K]
T : La température absolue [K]
B : La constante d'Arrhenius,
 Q_0 : L'énergie d'activation pour l'oxydation [J],
 a_i : Le rayon du spot de contact i [mm]
 d_{ij} : La distance entre les centres des passages i et j [μm]
 T_f : La température de fusion [K]
 D_0 : Le facteur de fréquence
L : Le chargement [N]
 V_{Fe} : Le volume du fer [mm^3].
 M_{O_2} : La masse molaire de l'oxygène [g/mol]
 M_{Fe} : La masse molaire de fer [g/mol]
 t_c : La perte instantanée
 ρ_0 : La résistivité de l'oxyde de cuivre égal à 4.10^{-3} [$\text{m}\Omega$]
A% : L'allongement pour cent
 ρ_{cu} : La résistivité électrique du cuivre [$\text{m}\Omega$]
R : La résistance à la traction [daN]
 R_f : La résistance à la flexion [GPa]
 V_c : le potentiel électrique de contact [V]
 Q_m : La quantité de chaleur mécanique par unité de temps [W]
 Q_e : La quantité de chaleur électrique par unité de temps [W]
 Q_a : La quantité de chaleur d'arc électrique par unité de temps [W]
 σ_o : La résistivité de l'oxyde [Ω^2]
 E_e : Le module d'élasticité [daN/m^2]
 α : Le coefficient de partage
 ΔT_m : L'élévation de la température de contact [$^\circ\text{C}$]
E : Le champ électrique [V/m]
 S_a : Hauteur arithmétique moyenne de la surface [μm]
 S_q : Hauteur quadratique moyenne de la surface [μm]
 S_{SK} : Facteur d'asymétrie de la surface
 S_{KU} : Facteur d'aplatissement de la surface
 S_p : Hauteur maximale des saillies de la surface [μm]

S_V : Hauteur maximale des creux de la surface [μm]

S_Z : Hauteur totale de la surface [μm]

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à toute ma famille

Remerciements

Le travail présenté dans cette thèse de doctorat en Sciences a été réalisé au sein du Laboratoire de Mécanique du Département de Génie Mécanique de l'Université Frères Mentouri dans l'équipe Mécanique et Energétique des Surfaces (Algérie) et Laboratoire de Mécanique des solides LMS (UMR-6610-CNRS), SP2MI Poitiers (France).

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement le Professeur Bouchoucha Ali pour le très grand honneur qu'il m'a fait en acceptant la lourde tâche de proposer le thème et de diriger cette thèse. Je le remercie d'avoir su partager son expérience et sa passion. Qu'il trouve également l'expression de ma gratitude pour les discussions fructueuses tout au long de ce travail.

Mes plus vifs remerciements s'adressent à Monsieur Beghidja, Professeur à l'Université des Frères Mentouri, Constantine qui m'a honoré en présidant le jury.

Ce fut un grand honneur pour moi que Brahim Necib, Professeur de l'Université des Frères Mentouri, Constantine, Mustafa Lahmar, Professeur de l'Université du 08 Mai 1945, Guelma et Ammar Haiahem, Professeur de l'Université Badji Mokhtar, Annaba ont accepté la charge d'évaluer ma thèse et d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse comme examinateurs.

Je tiens à remercier Monsieur H. Zaidi, Professeur à l'université de Poitiers, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire de Mécanique des solides LMS (UMR-6610-CNRS), SP2MI, Poitiers et pour l'intérêt qu'il a montré à cette étude.

Un grand salut particulier à tous les membres du Laboratoire de Mécanique du Département de Génie Mécanique de l'Université des Frères Mentouri surtout Mr Y. Mouadji.

Sommaire

INTRODUCTION.....	1
-------------------	---

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES CONTACTS TRIBOLOGIQUES AVEC ET SANS PASSAGE DU COURANT ELECTRIQUE

I. PRESENTATION DU PROBLEME

I.1. Problème	4
---------------------	---

I.1.1. Problème et origine.....	4
---------------------------------	---

I.2. NATURE DES SURFACES SOLIDES ET REGION DE CONTACT

I.2.1. Forme et contour des surfaces solides.....	5
---	---

I.2.2. Rappels sur la géométrie du contact.....	5
---	---

I.2.3. Région de contact réel.....	6
------------------------------------	---

I.2.3.1. Cas d'une déformation élastique.....	6
---	---

I.2.3.2. Cas d'une déformation plastique.....	8
---	---

I.2.4. Contact électrique.....	9
--------------------------------	---

I.2.4.1. Mesure de la résistance électrique.....	10
--	----

I.2.4.2. Echauffement des contacts.....	13
---	----

I.3. RAPPELS SUR LES PROPRIETES DES SURFACES.....

I.3.1. Physisorption	14
----------------------------	----

I.3.2. Chimisorption.....	14
---------------------------	----

I.4. PROCESSUS D'OXYDATION ET SES COSÉQUENCES SUR LE FROTTEMENT ET

L'USURE DES SURFACES METALLIQUES.....

I.4.1. Mécanismes de formation des oxydes.....	15
--	----

I.4.1.1. Oxydation du Fer.....	15
--------------------------------	----

a) L'oxyde ferreux FeO.....	15
-----------------------------	----

b) La magnétite Fe ₃ O ₄	16
--	----

c) L'oxyde ferrique Fe ₂ O ₃	16
--	----

I.4.1.2. Oxydation des aciers	16
-------------------------------------	----

I.4.1.3. Oxydation des aciers au chrome.....	16
--	----

I.4.1.4. Oxydation du cuivre.....	18
-----------------------------------	----

I.4.1.5. L'oxydation du laiton.....	19
-------------------------------------	----

I.4.2. La diffusion	19
---------------------------	----

I.4.3. Lois de la diffusion.....	20
----------------------------------	----

I.5. FROTTEMENT ET USURE DES CONTACTS METALLIQUES	21
I.5.1. Considérations générales	21
I.5.2. Le frottement	21
I.5.2.1. Théories du frottement	22
I.5.2.2. Température de frottement	23
I.6. L'USURE	24
I.6.1. Les principaux mécanismes d'usure	25
I.6.1.1. Usure adhésive	25
I.6.1.2. L'usure abrasive	26
I.6.1.3. L'usure corrosive	27
I.6.1.4. Usure érosive	28
I.6.1.5. Usure par fatigue	28
I.6.1.6. Usure par oxydation	28
I.6.2. Evaluation de l'usure	30
I.6.3. Paramètres agissants sur le frottement et l'usure	31
I.6.4. Influence de l'environnement sur le frottement et l'usure des métaux	32
I.6.5. Effet du courant électrique sur le contact des surfaces solides	33
I.6.6. Effet du courant électrique sur le frottement et l'usure	34
I.6.7. Effet de la polarité sur le comportement tribologique	35
I.7. CONCLUSION	36

CHAPITRE II

DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET TECHNIQUES DE MESURE

II.1. BUT DE L'ETUDE	43
II.2. PRESENTATION DU TRIBOMETRE PION-DISQUE	43
II.2.1. Spécifications techniques	45
II.2.2. Connexion électrique du tribomètre	45
II.2.3. Unité de base	45
II.2.3. Moteur à courant continu	45
II.2.4. Capteur de vitesse du moteur	45
II.3. DIMENSIONS ET GEOMETRIES DES ELEMENTS DU COUPLE TRIBOLOGIQUE	
II.3.1. Disque	46
II.3.2. Pion	47
II.4. PREPARATION DES ECHANTILLONS	48
II.4.1. Usinage des échantillons	48
II.5. MOYENS DE MESURE	49

II.5.1. La charge normale.....	49
II.5.2. Vitesse linéaire de glissement.....	51
II.5.3. Force de frottement.....	51
II.5.4. Mesure du coefficient de frottement.....	51
II.5.5. Mesure de l'usure du pion.....	51
II.5.6. La durée de l'essai d'usure.....	52
II.5.7. Le polissage.....	52
II.5.8. Courbe d'étalonnage.....	52
II.5.9. Contact tournant à mercure.....	53
II.6. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX.....	54
II.6.1. Matériaux des pions.....	54
II.6.2. Matériau du disque.....	56
II.7. TRIBOMETRE MODIFIE : FIL TENDU-DISQUE A SECTEURS.....	57
II.7.1. Principe.....	57
II.7.2. Moteur d'entraînement.....	58
II.7.3. Fonctionnement.....	58
II.7.4. Description du système de tension mécanique du fil.....	60
II.7.5. Moyens de mesure.....	61
II.8. MATERIAUX.....	62
II.9. LES ANALYSES MICROSCOPIQUES.....	64
II.9.1. Analyse par Microscopie Electronique à Balayage.....	64
II.9.2. Analyse par Microscopie Optique.....	64
II.9.3. Analyse par profilomètre numérique.....	65

CHAPITRE III

EFFET DE LA GEOMETRIE DE CONTACT SUR LE FROTTEMENT SEC DU COUPLE GLISSANT CUIVRE-ACIER

III.1. INTRODUCTION.....	69
III.2. ETUDE DU COMPORTEMENT EN FROTTEMENT SEC ET USURE D'UN CONTACT ELECTRIQUE GLISSANT CABLE TENDU-DISQUE	
III.2.1. Variation du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps.....	70
III.2.2. Variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement.....	70
III.2.3. Variation du coefficient de frottement en fonction de la charge normale.....	71
III.2.4. Variation du coefficient de frottement en fonction du courant électrique.....	72
III.2.5. Evolution de la profondeur maximale en fonction du paramètre temps.....	72
III.2.6. Evolution de la profondeur maximale en fonction de la vitesse.....	73

III.2.7. Evolution de la profondeur maximale en fonction de la charge normale.....	74
III.2.8. Evolution de la profondeur maximale en fonction du courant électrique.....	74
III.2.9. DISCUSSION	
III.2.9.1. Effet de la charge sur le frottement et l'usure.....	75
III.2.9.2. Effet du paramètre temps sur le frottement et l'usure.....	76
III. 2.9.3. Effet de la vitesse sur le frottement et l'usure.....	77
III.2.9.4. Effet de l'intensité du courant sur le frottement et l'usure.....	77
III.2.9.5. Effet de la polarité sur le frottement et l'usure.....	77
III.3. ETUDE DU COMPORTEMENT EN FROTTEMENT SEC D'UN CONTACT ELECTRIQUE GLISSANT PION-DISQUE DU COUPLE CUIVRE-ACIER	
III.3.1. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement....	79
III.3.2. Evolution du coefficient de frottement en fonction du courant électrique et de la polarité	79
III.3.3. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la charge normale.....	80
III.4. EFFET DE LA GEOMETRIE DE CONTACT SUR LE FROTTEMENT SEC DU COUPLE GLISSANT CUIVRE-ACIER	
III.4.1. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la charge.....	81
III.4.2. Evolution du coefficient de frottement en fonction du courant électrique et de la polarité	82
III.4.3. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement....	83
III.4.4. Evolution du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps.....	83
III.5. DISCUSSION.....	84
III.6. CONCLUSION.....	87

CHAPITRE IV

INFLUENCE DES PARAMETRES THERMOELECTROMECHANIQUES SUR LE COMPORTEMENT EN FROTTEMENT SEC : ETUDE COMPARATIVE DES COUPLES CUIVRE-ACIER ET CUIVRE-GRAPHITE

IV.1. INTRODUCTION.....	90
IV.2. RESULTATS.....	91
IV.2.1. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la charge normale.....	91
IV.2.2. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse.....	91
IV.2.3. Evolution du coefficient de frottement en fonction du courant électrique.....	92
IV.2.4. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la polarité du pion.....	92
IV.2.5. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps.....	93
IV.2.6. Evolution de la résistance électrique de contact en fonction du paramètre temps	
IV.3. MODELISATION	
IV.3.1. Evaluation de l'aire réelle de contact.....	95

IV.3.2. Evaluation de l'élévation de la température de contact.....	95
IV.3.3. Evaluation de l'épaisseur critique de la couche d'oxyde de cuivre.....	96
IV.3.4. Evaluation de la contrainte de rupture.....	97
IV.3.5. Evaluation du champ électrique de rupture.....	97
IV.3.6. Evolution du rayon de contact en fonction de la charge.....	97
IV.3.7. Evolution de l'épaisseur du film d'oxyde en fonction de la charge normale.....	98
IV.3.8. Evolution de l'épaisseur du film d'oxyde en fonction du rayon de contact.....	98
IV.3.9. Evolution de la quantité de chaleur en fonction du rayon de contact.....	99
IV.3.10. Evolution de l'élévation de la température de contact en fonction de la charge normale avec passage du courant électrique.....	100
IV.3.11. Evolution de l'élévation de la température de contact en fonction de la charge normale.....	100
IV.4. VALEURS CALCULEES.....	101
IV.4.1. Contact cuivre-acier.....	101
IV.4.2. Contact cuivre-graphite.....	102
IV.5. DISCUSSION.....	103
IV.5.1. Effet de la charge normale sur le frottement.....	103
IV.5.2. Effet de la vitesse sur le frottement.....	103
IV.5.3. Effet du courant électrique sur le frottement.....	104
IV.5.4. Effet de la polarité sur le frottement.....	104
IV.5.5. Effet du champ électrique sur le frottement.....	105
IV.5.6. Effet de la résistance électrique de contact sur le frottement.....	105
IV.5.7. Effet de l'élévation de température sur le frottement.....	106
IV.5.8. Effet de l'arc électrique sur le frottement.....	106
IV.6. CONCLUSION.....	107

CHAPITRE V

INFLUENCE DE LA VITESSE, LA CHARGE NORMALE ET L'INTENSITE DU COURANT ELECTRIQUE SUR LE COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE DES COUPLES GLISSANTS ACIER-ACIER ET LAITON-ACIER

V.1. INTRODUCTION.....	110
V.2. RESULTATS EXPERIMENTAUX.....	110
V.2.1. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps.....	110
V.2.2. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps avec passage du courant électrique.....	111
V.2.3. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la charge normale.....	112

V.2.4. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la charge normale avec passage du courant électrique.....	112
V.2.5. Evolution du coefficient de frottement avec la vitesse de glissement	114
V.2.6. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement avec passage du courant électrique	114
V.2.7. Evolution du coefficient de frottement en fonction de l'intensité du courant électrique	115
V.2.8. Evolution de l'usure en fonction de la charge normale sans passage du courant électrique.....	115
V.2.9. Evolution de l'usure en fonction de la charge normale avec passage du courant électrique.....	117
V.2.10. Evolution de l'usure en fonction de l'intensité du courant électrique.....	117
V.2.11. Evolution de l'usure en fonction de la vitesse de glissement.....	118
V.2.12. Evolution de l'usure en fonction de la vitesse de glissement avec passage du courant.....	118
V.2.13. Evolution de la résistance électrique de contact en fonction du courant électrique	119
V.2.14. Evolution de la résistance électrique de contact en fonction du paramètre temps.....	120
V.2.15. Evolution du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps pour différentes valeurs du courant électrique (couple laiton-acier).....	121
V.2.16. Evolution du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps pour différentes valeurs du courant électrique (couple acier-acier).....	122
V.2.17. Evolution du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps avec différentes valeurs de vitesse pour le couple laiton-acier.....	122
V.2.18. Evolution du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps avec différentes valeurs de vitesse pour le couple acier-acier.....	123
V.2.19. Evolution du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps pour différentes valeurs de la charge normale pour les couples acier-acier et laiton-acier	124
V.2.20. Evolution du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps pour différentes valeurs de la vitesse de glissement	125
V.2.21. Evolution de la résistance électrique de contact et le coefficient du frottement en fonction de la charge appliquée pour le couple laiton-acier	126
V.2.22. Evolution de la résistance électrique de contact et le coefficient du frottement en fonction de la charge appliquée pour le couple acier-acier	126
V.3. CALCULS THEORIQUES DES PARAMETRES.....	127

V.3.1. Contact laiton-acier	127
V.3.1.1. Evolution de l'épaisseur du film d'oxyde en fonction de la charge appliquée pour le couple laiton-acier	128
V.3.1.2. Evolution du rayon du contact en fonction de la charge appliquée pour le couple laiton-acier	129
V.3.1.3. Evolution de l'élévation de la température de contact en fonction de la charge normale avec passage du courant électrique	129
V.3.1.4. Evolution de la quantité de chaleur en fonction de la charge normale et la vitesse avec passage du courant électrique	130
V.3.2. Couple acier-acier	131
V.3.2.1. Evolution du film d'oxyde en fonction de la charge normale	132
V.3.2.2. Evolution du film d'oxyde en fonction de la vitesse de glissement	133
V.3.2.3. Evolution du rayon de contact en fonction de la charge appliquée	133
V.3.2.4. Evolution de ΔT en fonction de P	133
V.3.2.5. Evolution de la quantité de chaleur totale en fonction de la charge normale ...	134
V.4. DISCUSSION DES RESULTATS	135
V.4.1. Effet de la charge normale sur le frottement et l'usure	135
V.4.2. Effet de la vitesse sur le frottement et l'usure	138
V.4.3. Effet du paramètre temps sur le frottement et l'usure	142
V.4.4. Effet du courant électrique sur le frottement et l'usure	143
V.4.5. Effet de la chaleur dégagée sur le frottement et l'usure	147
V.4.6. Effet de l'arc électrique sur le comportement en frottement et usure des couples glissants acier-acier et laiton-acier	148
V.4.6. Effet des particules d'usure sur le frottement et l'usure	148
V.5. CONCLUSION	150
CONCLUSION GENERALE	154

INTRODUCTION GENERALE

Le frottement entre deux matériaux peut induire, dans certaines conditions, des élévations de température interfaciale importantes qui conduisent à une modification des propriétés mécaniques et physico-chimiques des matériaux en contact et, par conséquent, à des endommagements sévères des surfaces frottantes. C'est une source de pertes énergétiques diminuant le rendement du dispositif. Le frottement est une source de perte de fonctionnalité lorsque l'usure dégrade ou grippe des surfaces. En effet, l'interface dissipe l'énergie mécanique due au frottement (proportionnelle à la charge et à la vitesse) et devient source de chaleur. Si on fait passer un courant électrique à travers le contact, dans ce cas, en plus de la dissipation de chaleur mécanique, s'ajoute la dissipation par effet Joule et dans certaines conditions celle des arcs électriques. De plus, l'intensité du courant électrique et sa polarité induisent un champ électrique dans le contact qui favorise le processus d'oxydation, et donc la croissance du film d'oxyde qui joue un rôle majeur et détermine la durée de service des couples électriques glissants.

La réduction des frottements au sein de mécanismes quels qu'ils soient, constitue encore aujourd'hui un point sensible de la conception et demeure cruciale dans les technologies de pointe telles où doivent être associés gain énergétique et fiabilité. Les solutions technologiques classiques consistent en la formulation d'un couple de matériaux et d'une géométrie de contact adaptée aux contraintes tribologiques du système mécanique (pressions, vitesses). De plus, dans de nombreuses situations, il est nécessaire d'introduire une lubrification réalisée par des lubrifiants solides ou liquides.

La réduction de l'usure, dégradation surfacique souvent associée à une perte de matière non contrôlée (contrairement aux processus d'usinage ou de polissage par exemple), est un enjeu clé dans le contexte actuel où la réduction des pertes énergétiques est une préoccupation majeure. Par exemple, le remplacement de pièces mécaniques usées entraîne de nouvelles fabrications, de la maintenance...donc des dépenses énergétiques supplémentaires et des pertes économiques. Augmenter la fiabilité donc la durée de vie des mécanismes permet alors de limiter ces remplacements et aussi de garantir la sécurité des systèmes en réduisant les risques de rupture catastrophique par exemple. Cependant l'usure est un phénomène complexe auquel contribuent simultanément et de manière couplée les propriétés mécaniques, physico-chimiques et topographiques des surfaces dans un contexte de sollicitations souvent multiples (mécaniques, thermiques, chimiques...).

Les tentatives de classification de l'usure en grandes catégories (usure abrasive, adhésive, corrosive, ...) se révèlent donc souvent insuffisantes pour identifier les mécanismes d'usure, d'autant plus que dans la plupart des cas, on peut montrer que les quantités moyennes de matière perdue par passage dans un contact sont de l'ordre d'un volume atomique.

De nombreuses applications nécessitent la compréhension des phénomènes ayant lieu au sein du contact. Parmi eux, dans les systèmes mécaniques, on peut citer les roulements, les coussinets, les freins, les embrayages, les engrenages, les garnitures mécaniques... Pour les contacts électriques glissants, citons le cas des moteurs électriques, les générateurs, les tractrices au sein des réseaux ferroviaires électrifiés, les tramways, les trolleys bus.....

L'objet de cette thèse est de mettre en évidence, l'effet des paramètres mécaniques (charge, vitesse, temps et la géométrie de contact) et électriques (intensité et polarité du courant électrique) sur le comportement en frottement sec et en usure d'un contact électrique glissant des couples tribologiques acier-acier, laiton-acier, cuivre-acier et cuivre-graphite.

La thèse est structurée de la manière suivante :

Le premier chapitre consiste en une vaste synthèse bibliographique sur les contacts tribologiques avec et sans passage du courant électrique dans laquelle sont d'abord rappelées les notions fondamentales concernant les contacts mécaniques et électriques, puis le mécanisme de frottement, d'usure et le phénomène d'oxydation, et enfin, les paramètres agissants sur le processus de frottement et d'usure.

Dans le second chapitre, nous présenterons notre démarche expérimentale qui consiste à simuler le contact électrodynamique sec des différents couples acier-acier, laiton-acier, cuivre-acier et cuivre-graphite. Cette partie est réservée à la présentation d'une part des échantillons utilisés dans notre étude et d'autre part des dispositifs expérimentales ainsi que les modifications apportées au tribomètre afin d'étudier le comportement tribologique et la résistance électrique de contact lors de tests de frottement et d'usure.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude expérimentale du comportement tribologique du couple électrique glissant cuivre-acier, ainsi, l'effet de la géométrie de contact sur le frottement et l'usure.

L'influence des paramètres thermomécaniques sur le comportement en frottement sec des couples glissants cuivre-acier et cuivre-graphite ainsi que l'effet du courant électrique sur l'oxydation et les modifications des surfaces de contact sont présentés dans le quatrième chapitre.

Le cinquième chapitre consiste, non seulement à proposer un modèle comportemental analytique d'Archard mais aussi à une analyse expérimentale et des observations des surfaces usées des contacts glissants à l'air ambiante avec ou sans passage du courant électrique des couples antagonistes acier-acier et laiton-acier. Cette analyse concerne l'influence des paramètres mécaniques et électriques sur la morphologie et le comportement en frottement et usure des différents couples tribologiques.

CHAPITRE I**SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES CONTACTS TRIBOLOGIQUES AVEC
ET SANS PASSAGE DU COURANT ELECTRIQUE****I. PRESENTATION DU PROBLEME****I.1. Problème**

Le sujet proposé consiste à étudier le comportement en frottement sec et en usure du contact glissant pion-disque avec ou sans passage du courant électrique dans des conditions de fonctionnement bien déterminées en faisant varier les paramètres mécaniques, fonctionnels et électriques dans une ambiance atmosphérique. Il s'agit des contacts glissants (pion-disque) : cuivre-acier, cuivre-graphite, acier-acier et acier-laiton.

Ces couples sont choisis vu leurs utilisations technologiques diverses (les roulements, les coussinets, les garnitures mécaniques, les contacts électriques glissants etc...) et aussi afin de comprendre les différents processus et mécanismes résultant des phénomènes de frottement et d'usure. De plus, cette compréhension permet de mettre en évidence les différents facteurs régissant le comportement tribologique de ces couples, ce qui on permet d'optimiser leurs conditions de fonctionnement, de réduire le coût et la période d'entretien et de maintenance des différents appareils et machines et d'où l'augmentation la durée de service de ces couples.

I.1.1. Problème et origine

Les contacts électriques glissants ne sont pas d'applications récentes, ils ont été appliqués pour transmettre le courant électrique dans les moteurs électriques, les tractrices au sein des réseaux ferroviaires électrifiés, les tramways, les trolleybus...L'usure des éléments du couple pose un sérieux problème pour ces contacts et leur remplacement s'avère onéreux. Néanmoins le choix judicieux des matériaux antagonistes et l'optimisation des paramètres fonctionnels, mécaniques et/ou électriques entraînent une durée de vie plus longue du couple donc de la machine.

L'objet de ce travail consiste à mettre en évidence, l'effet des paramètres mécaniques (charge, vitesse, temps et la géométrie de contact) et/ou électriques (intensité et polarité du courant électrique) sur le comportement en frottement sec et en usure des couples acier-acier, laiton-acier, cuivre-acier et cuivre-graphite.

I.2. NATURE DES SURFACES SOLIDES ET REGION DE CONTACT

I.2.1. Forme et contour des surfaces solides

Pour comprendre le phénomène de la friction, on doit connaître en premier lieu la région exacte des contacts entre les solides. Pour répondre à cette question, on doit posséder auparavant une connaissance plus approfondie de la forme et de la géométrie des surfaces solides. Des techniques et des moyens d'observations et d'analyses des surfaces (profilomètre, section oblique, méthodes optiques interférentielles, microscopie électronique à balayage etc...) seront utilisés pour mettre les contours des surfaces, leur rugosité et les films qui les recouvrent [1].

I.2.2. Rappels sur la géométrie du contact

Quelque soient les moyens utilisés pour finir une surface, elle présente toujours une surface apparente (macroscopique) et une surface réelle (microscopique). Considérons deux surfaces en contact, soumises à une charge normale P . L'aire apparente est A_a , et l'aire réelle est A_r où ses irrégularités relèvent toujours d'une échelle microscopique et le contact s'effectue par un nombre restreint de zones d'aires A_1, A_2, \dots, A_n appelées jonctions dont leur somme constitue la surface réelle [2].

Le rapport A_r/A_a dépend de la nature et des caractéristiques des matériaux en regard et demeure faible quelle que soit la charge d'appui unitaire effective appliquée (Fig. I.1).

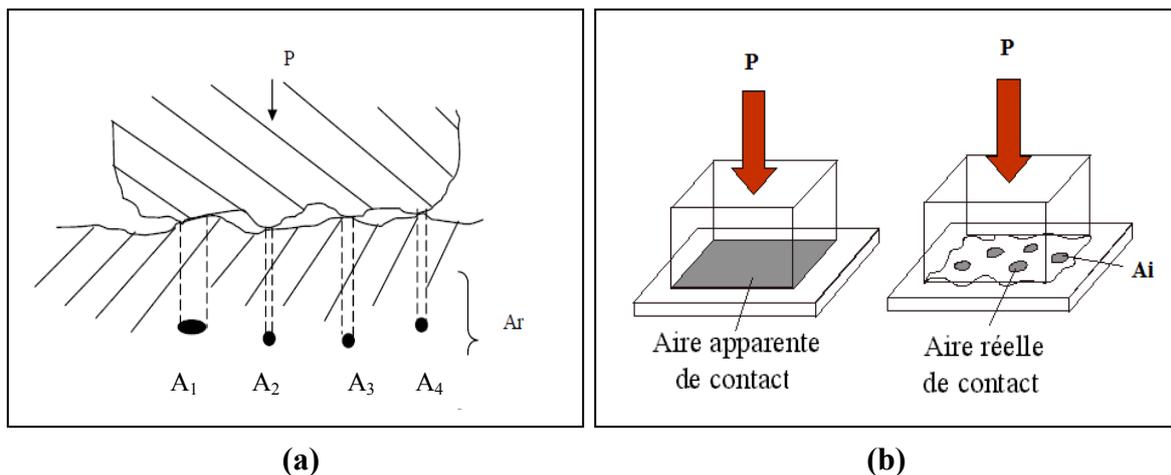


Figure I.1. (a) Les surfaces réelles et (b) les surfaces apparentes de contact

Lorsqu'il s'agit d'un contact dynamique, des contraintes tangentielles prennent naissance à l'interface (force de frottement) et les jonctions sont soumises à des contraintes très élevées et à des variations de température micro localisées [2].

I.2.3. Région de contact réel

On est maintenant en mesure de comprendre ce qui se passe à l'échelle microscopique, lorsque deux corps solides sont en contact. Les surfaces mêmes les plus polies, sont grossières à l'échelle atomique. Le contact intime se produit aux deux extrémités des pics ayant la plus grande hauteur des surfaces en regard. Pour les autres parties des surfaces on peut trouver des hauteurs d'aires de l'ordre de cent angströms ou plus puisque l'ordre de grandeur des forces superficielle est excessivement faible [3].

I.2.3.1. Cas d'une déformation élastique

Considérons une aspérité caractéristique comme une portion de sphère de rayon r et supposons que la surface sur laquelle elle repose soit localement plane. En premier lieu la déformation est élastique et peut s'exprimer par une équation donnée par Henrich Hertz [4], pour la déformation élastique des surfaces sphériques. La région de contact est un cercle de diamètre :

$$d = 1.75 \left[p.r \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{I.1})$$

Dans le cas d'un contact entre deux sphères lisses, la surface de contact A_b est plane et de forme circulaire (Fig. I.2).

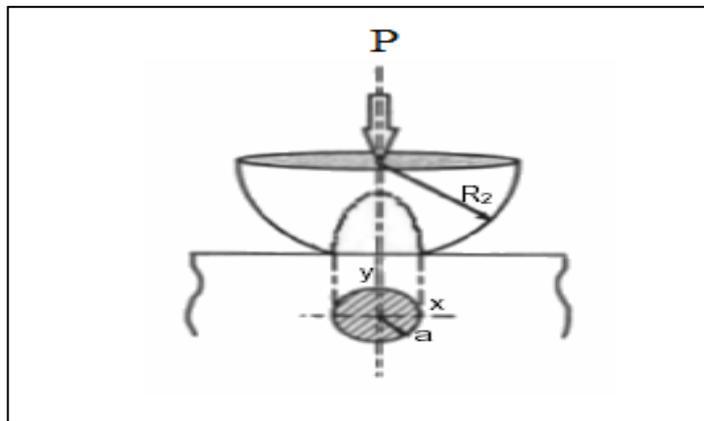


Figure I.2. Représentation du contact sphère-plan

Si la déformation est élastique, la formule d'Hertz (I.2) donne le rayon de la surface porteuse en fonction de la charge d'appui P , des rayons de courbures et des modules de Young des deux matériaux en contact [5] :

$$a = \left\{ \frac{3}{4} P \left[\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right] \left[\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right] \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (I.2)$$

En considérant la théorie de Hertz, pour un contact de deux sphères de rayon respectivement r_1 et r_2 et dans le cas de déformation élastique, la pression de contact p en fonction du rayon de l'empreinte a est donnée par :

$$p = \frac{3P}{2\pi a^2} \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{où} \quad a = \sqrt[3]{\frac{3Pr}{4E}} \quad (I.3)$$

- pour un contact convexe-convexe :

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \quad (I.4)$$

- pour un contact convexe-concave :

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \quad (I.5)$$

Pour les deux configurations de contact :

- le module d'élasticité composé ou équivalent $\frac{1}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$ (I.6)

- la pression moyenne de contact $p_m = \frac{P}{\pi a^2}$ (I.7)

- la pression maximale centrée $p_a = \frac{3}{2} \frac{P}{\pi a^2}$ (I.8)

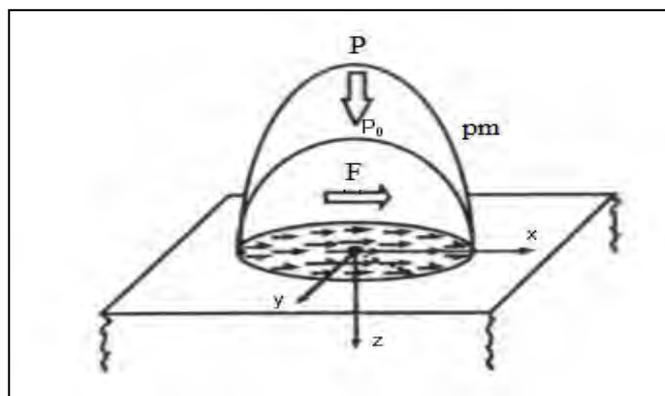


Figure I.3. Distribution de champ de pression

La formule (I.2) s'applique également à un contact sphère-plan ($r_2 = \infty$) et à un contact entre deux cylindres croisés (r_i rayon du cylindre i). Dans ce cas, pour des surfaces lisses et pour de géométrie de contact citée précédemment, la surface A_r est proportionnelle à $P^{2/3}$.

$$A_r = K.P^{2/3} \quad (I.9)$$

Avec K: constante dépendant de la géométrie et de la nature du matériau.

D'une façon générale, la relation entre la surface A_r et la force P, pour une déformation élastique, est donnée par [6]:

$$A_r = K.P^n \quad (I.10)$$

Avec : $2/3 < n < 1$

En prenant un coefficient de poisson égal à 0,3, pour chaque surface ; la pression sur le cercle de contact a pour valeur :

$$p = 0.42P^{1/3} \left[r \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \right]^{-2/3} \quad (I.11)$$

Dans de nombreuses applications, le rayon du contact réel est exprimé par :

$$a = \sqrt{\frac{P}{H}} \quad (I.12)$$

I.2.3.2. Cas d'une déformation plastique

Comme la charge augmente, la pression p croît jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur correspondant à la limite d'élasticité de l'un des matériaux. A ce moment une déformation plastique commence, et en augmentant davantage la charge, la région plastique s'accroît encore ainsi que la pression moyenne. Pour une charge relativement élevée, elle atteint une valeur à peu près stable [7]. La déformation est maintenant plastique en totalité et la pression agissant sur l'aspérité déformée est la même, on retient donc que si :

- $P_m \leq 1,1\sigma_e$, le contact est élastique.
- $P_m \geq 1,1\sigma_e$, le contact est plastique.

La valeur stable de la pression moyenne de contact est exprimée par cette relation [7] :

$$P_m \cong 3\sigma_e = H \quad (I.13)$$

Dans le cas d'une déformation plastique, la surface A_r est proportionnelle à la force appliquée P.

$$A_r = P / \xi.H \quad (I.14)$$

I.2.3.3. Limite d'élasticité ou seuil de plasticité

Au seuil de plasticité du contact σ_e , la pression de contact maximale p_o est :

$$p_o = 1,60\sigma_e \quad (I.15)$$

La limite d'élasticité ou le seuil de plasticité σ_e , s'écrit :

$$\sigma_e = \frac{H}{3} \quad (\text{I.16})$$

Avec son incertitude :

$$\frac{u(\sigma_e)}{\sigma_e} = \frac{u(H)}{H} \quad (\text{I.17})$$

On note que les formules présentées ne prennent pas en compte l'influence du frottement et l'énergie interfaciale entre les deux corps solides en interaction [7].

1.2.4. Contact électrique

Le contact électrique (Fig. I.4) s'établit lorsque deux solides conducteurs sont pressés l'un contre l'autre avec une force suffisante pour provoquer le passage d'un courant [8]. Ce dernier a lieu à travers l'interface de contact entre les deux solides. Cette interface présente une structure complexe dépendant de la surface des solides. Donc l'analyse du phénomène de contact nécessite de comprendre la structure de l'interface de contact.

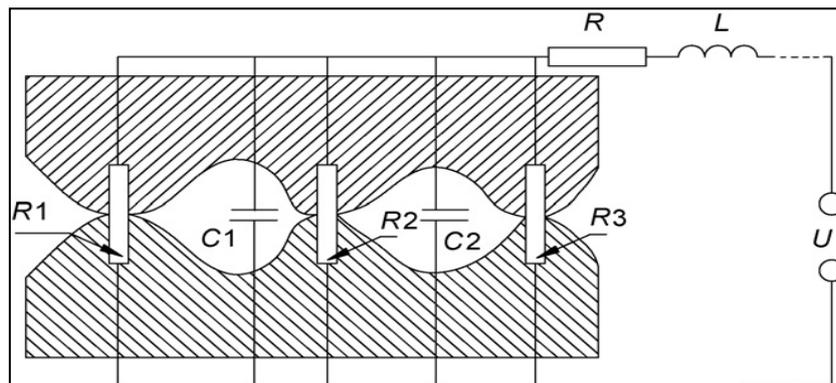


Figure I.4. Modèle de circuit électrique avec passage du courant [9]

Lors du contact entre deux solides conducteurs, le contact électrique ne s'effectue pas sur toute l'aire de contact apparente (Fig. I.5). Celle-ci renferme plusieurs îlots de contact mécanique à cause de la rugosité inévitable des surfaces. Les îlots de contact mécanique ne conduisent le courant électrique qu'en certains points ou spots ou encore passages de contact électrique du fait de l'éventuelle présence de film isolant à la surface des solides. Le nombre et la taille des passages de contact électrique dépendent de nombreux paramètres parmi lesquels on distingue [10] :

- la force appliquée ;
- la forme macroscopique des surfaces (planes, bombées,...) ;
- la forme microscopique des surfaces (rugosité) ;

- les propriétés mécaniques des matériaux (dureté, module de Young...).

La détermination de la surface conductrice est basée sur la mesure de la résistance de constriction [11].

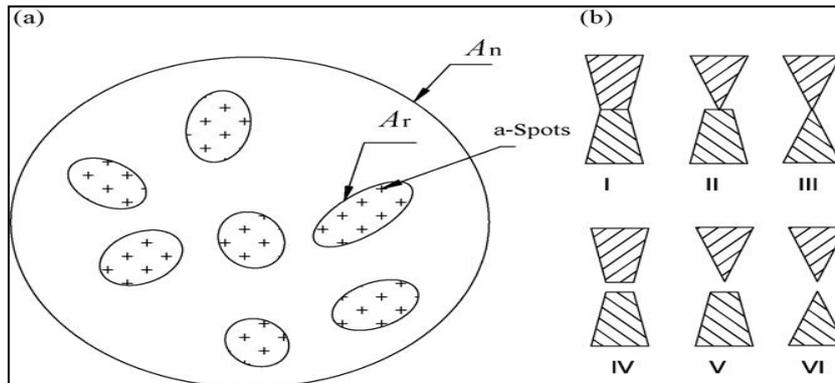


Figure I.5. Arrangement de contact électrique : (a) aire de contact électrique; (b) différente condition de contact électrique [9]

I.2.4.1. Mesure de la résistance électrique

Dans le cas des métaux, la détermination exacte et rapide de la surface de contact peut être effectuée en mesurant la résistance électrique de contact.

Ragnar Holm montre que lorsque les surfaces métalliques sont placées en vis-à-vis, les mesures montrent qu'un contact intime se produit seulement sur une faible fraction de la surface apparente de contact [12].

Un contact électrique peut être représenté par une résistance électrique de contact notée R_c . Sauf dans certains cas particuliers, on cherche à faire en sorte que cette résistance soit suffisamment faible et surtout stable dans le temps, de façon à ce qu'un faux contact n'apparaisse pas. Pour cela, il faut que la mise en pression des électrodes provoque l'établissement d'un (rare) ou de plusieurs (fréquent) passages conducteurs entre elles [13]. Malheureusement, les surfaces des métaux bons conducteurs comme le cuivre, les alliages du cuivre et l'aluminium sont constituées de fines couches isolantes, comme l'alumine sur l'aluminium. La formation de ces couches provient des réactions chimiques du métal avec des constituants de l'atmosphère.

Comme pour l'aspect mécanique du contact, l'étude du contact électrique est nécessairement traitée à l'aide de modèles partiels qui peuvent être classés en deux groupes : le modèle à un passage et celui à plusieurs passages [14].

a) Résistance de contact : modèle à un seul passage

Dans ce modèle, l'aire de contact entre les deux solides semi-infinis est constituée d'un seul disque de rayon a . Différents régimes de transport peuvent se présenter suite à la comparaison entre le libre parcours moyen ℓ des électrons et le rayon de contact a . Le rapport ℓ/a est noté K (nombre de Knudsen). Si $K \ll 1$, le régime est ohmique et si $K \gg 1$, le régime est balistique.

- régime ohmique : modèle de Maxwell ($K \ll 1$)

L'expression de la résistance de contact dans le cas d'un seul contact a été définie par Maxwell à partir de la loi d'Ohm [15] :

$$R_m = \rho / 2a \quad (\text{I.18})$$

Où ρ représente la résistivité du matériau de contact.

Dans le cas d'un contact constitué de deux matériaux de résistivités ρ_1 et ρ_2 , la résistivité ρ équivalente est exprimée par : $\rho = (\rho_1 + \rho_2) / 2$.

L'équation I.18 suffit pour expliquer la diminution de la résistance quand la force de contact augmente. En effet, l'expression I.2 montre que lorsque la force P croît, cela entraîne une augmentation du rayon de contact a et donc une diminution de la résistance de contact.

- régime balistique : modèle de Sharvin ($K \gg 1$)

Dans ce cas, la notion de lignes de courant n'a plus de sens, chacun des conducteurs est considéré comme un réservoir d'électrons et la résistance de contact est proportionnelle à l'aire du disque de contact [16] :

$$R_s = 4\rho \ell / 3\pi a^2 \quad (\text{I.19})$$

- régime intermédiaire ($K \sim 1$)

Dans le cas où ℓ et a sont du même ordre de grandeur, aucune des deux approches précédentes n'est satisfaisante. Wexler [17] donne l'expression de la résistance de contact comme étant une combinaison des deux régimes ohmique et balistique :

$$R_w = \gamma(K) \rho / 2a + 4\rho \ell / 3\pi a^2 \quad (\text{I.20})$$

Où $\gamma(K)$ est une fonction qui décroît entre 1 et 0,6 lorsque K augmente.

b) Résistance de contact : modèle à plusieurs passages

Dans la réalité, la circulation du courant électrique s'effectue à travers plusieurs passages, la démarche la plus simple consiste à additionner les conductances $1/R_p$ des différents passages pour donner la conductance $1/R_e$ de l'ensemble :

$$1/R_e = \sum 1/R_p \quad (I.21)$$

Dans le cas du régime ohmique, l'expression I.21 est valable si les différents passages sont suffisamment petits et éloignés les uns des autres pour ne pas interagir. Lorsque cette condition n'est pas respectée, des solutions approchées demeurent nécessaires pour calculer la résistance.

- solution de Holm

Pour n passages discoïdes identiques de rayon a , uniformément répartis dans un disque de rayon R , la résistance de contact est [15] :

$$R_H = \rho (1/2.n.a + 1/2R) \quad (I.22)$$

Elle correspond à la mise en série de n résistances élémentaires $\rho/2a$ en parallèle avec une résistance d'interaction $\rho/2R$. L'évolution de ces trois résistances en fonction du nombre de passage est visible sur les courbes de la figure I.6.

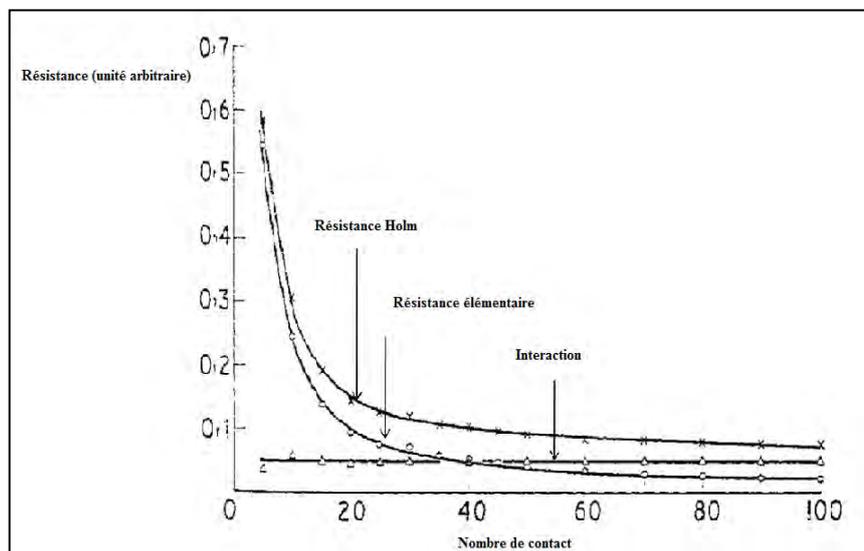


Figure I.6. Variation des résistances selon Holm en fonction du nombre de passages [18]

- solution de Greenwood

Contrairement à la solution approchée de Holm, celle de Greenwood est basée sur une répartition aléatoire des discoïdes et une variabilité de leur taille [19]. L'expression de la résistance selon Greenwood est la suivante :

$$R_{GI} = \frac{\rho}{2 \sum a_i} + \frac{\rho \sum_{i \neq j} \sum a_i a_j / d_{ij}}{\pi \sum a_i^2} \quad (I.23)$$

En supposant qu'il n'y a pas de corrélation entre le rayon d'un passage et sa position (Fig. I.7), les a_i peuvent être remplacés, en première approximation, par leur moyenne a_{moy} :

$$R_{GI} = \frac{\rho}{2n a_{moy}} + \frac{\rho \sum_{i \neq j} \sum a_i a_j / d_{ij}}{\pi \sum a_i^2} \quad (I.24)$$

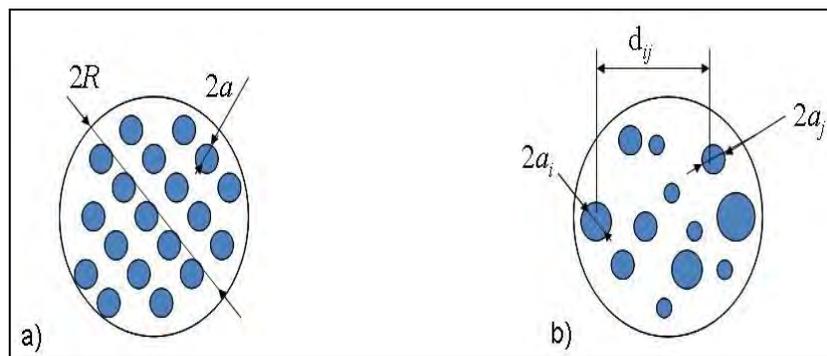


Figure I.7. Modèle à plusieurs passages (a) répartition uniforme des passages, (b) cas général

I.2.4.2. Echauffement des contacts

Un contact électrique s'échauffe par effet Joule lorsqu'il est parcouru par un courant électrique d'intensité I . Si cet échauffement est très important au point de provoquer une fusion locale des aspérités du matériau le plus tendre et l'augmentation des phénomènes d'oxydation. Dans ces conditions, la résistance de contact peut croître rapidement jusqu'à destruction du contact. Pour prévenir cet état extrême, il est important de tenir compte des effets thermiques dans les contacts électriques [13].

I.3. RAPPELS SUR LES PROPRIETES DES SURFACES

I.3.1. Physisorption

Dans la physisorption de substances gazeuses ou liquides sur la surface de certains solides, il n'y a pas d'échange d'électrons entre les molécules adsorbées et celles d'adsorbant, phénomène réversible, elle n'implique aucune énergie d'activation. Elle est typiquement due à des forces d'attraction interatomique de Van Der Waals [20] s'exerçant entre ces molécules qui font former la couche mono moléculaire (environ 0,3 nm d'épaisseur) ou poly moléculaire sur la surface des corps. L'énergie [21] de cette liaison est faible d'environ 0,05 eV. La chaleur d'adsorption ne dépasse pas 50 [kJ/mol]. L'espèce adsorbée doit recevoir une énergie au moins égale à Q_{ads} pour quitter la position d'équilibre. Dans le contact électrique, les monocouches physisorbées conduisent à une très faible résistivité tunnel $\sigma = 10^{-13} \Omega\text{m}$ [22]. Lors de la physisorption, plusieurs couches d'atomes adsorbés peuvent se superposer. La présence de quelques monocouches adsorbées peut modifier le comportement tribologique du contact (Fig. I.8).

I.3.2. Chimisorption

Dans le phénomène de chimisorption, il y a échange d'électrons entre les espèces chimisorbées et la surface du substrat [20], il s'ensuit que l'énergie d'adsorption est de l'ordre de grandeur de l'énergie de liaison des atomes du réseau cristallin. Le processus d'adsorption est généralement complexe et en ce qui concerne l'adsorption chimique, les molécules de l'adsorbant peuvent être d'abord physisorbées, puis dissociées en atomes et enfin chimisorbées (Fig. I.8).

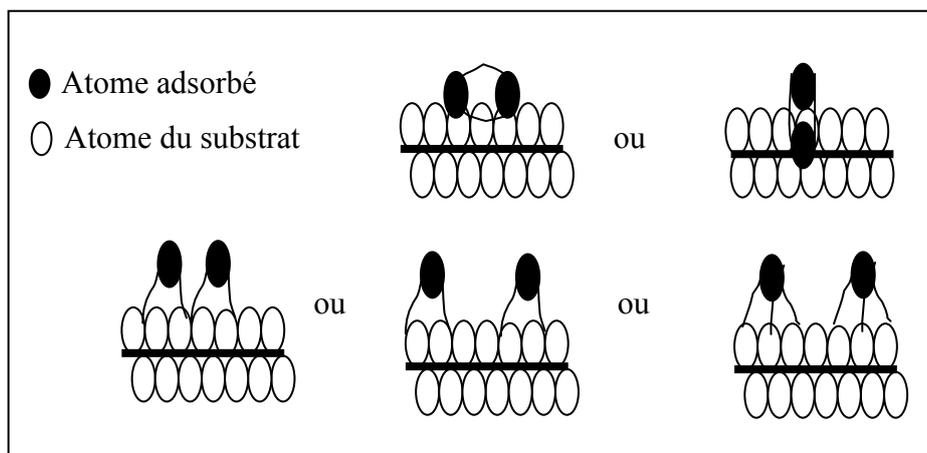


Figure I.8. Schématisation des phénomènes de physisorption et chimisorption [20]

I.4. PROCESSUS D'OXYDATION ET SES COSÉQUENCES SUR LE FROTTEMENT ET L'USURE DES SURFACES METALLIQUES

Les surfaces de la très grande majorité des métaux réagissent avec l'oxygène de l'atmosphère à laquelle elles sont exposées pour former des oxydes qui ont leurs propriétés caractéristiques [22].

Si un métal forme plusieurs oxydes, les composés sont arrangés de telle sorte que le plus riche en oxygène soit à l'interface solide-gaz, tandis que le plus pauvre se situe à l'interface métal-oxyde [20], c'est par exemple le cas du fer illustré par la figure I.9.

Si un alliage est oxydé, les produits de la réaction qui en résultent, se présentent sous forme de couches séparées ou comme une mixture hétérogène. Dans ce dernier cas, un nouveau composé mixte peut se former. D'autre part, si l'un des oxydes est en excès il peut imposer sa structure sur les autres composés présents en faibles quantité.

La puissance mécanique dissipée à l'interface par frottement entraîne un échauffement favorable à l'oxydation. L'application du courant électrique et du champ magnétique peut modifier encore plus le processus de formation des oxydes. La formation du film d'oxyde modifie l'état initial des surfaces et favorise le glissement entre les surfaces [7].

I.4.1. Mécanismes de formation des oxydes

La croissance des couches d'oxydes compactes formés par oxydation à haute température d'alliages métalliques met en jeu des processus complexes de diffusion et de réactions chimiques. Pour assurer une bonne protection, la couche d'oxydes doit croître selon une cinétique parabolique (c'est la loi la plus réponde), c'est-à-dire contrôlée par la diffusion des espèces cationiques et/ou anioniques dans la couche. Dans ce cas, la vitesse de croissance décroît avec le temps.

I.4.1.1. Oxydation du Fer

Etant donné le rôle que jouent les oxydes de fer dans les processus de frottement et l'usure, il est apparu utile de rappeler brièvement les différents types d'oxydes de fer. Suivant les conditions de surface, l'environnement, la température ambiante et d'autres facteurs, une surface de fer s'oxyde pour donner les oxydes de fer : FeO, Fe₃O₄ et Fe₂O₃.

a) L'oxyde ferreux FeO : stable au dessus de 570°C [23] qui présente un caractère plastique relativement prononcé [24].

b) La magnétite Fe_3O_4 : de couleur noire, cet oxyde est poreux [25].

c) L'oxyde ferrique Fe_2O_3 : rouge-brun, c'est l'oxyde le plus dur des oxydes de fer (10^4 MPa). Vu son caractère d'abrasif, Fe_2O_3 joue un rôle majeur dans la dégradation par le frottement et l'usure [24].

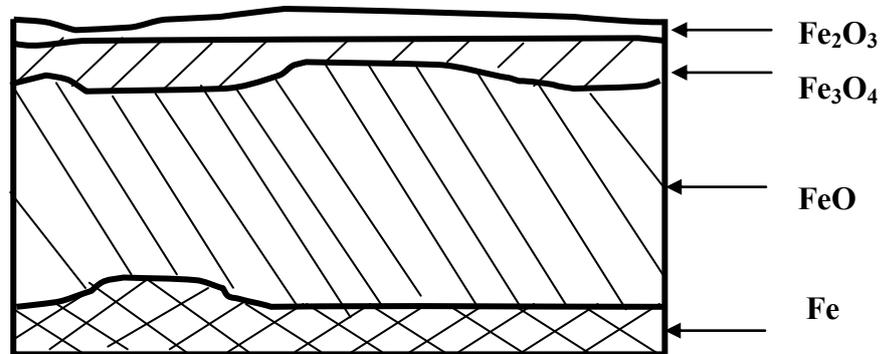


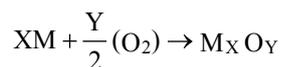
Figure I.9. Formation des couches d'oxydes superposées sur la surface du fer à 625 °C après 24h [20]

I.4.1.2. Oxydation des aciers

Dans l'oxygène sec, les aciers inoxydables (12 - 19% Cr et 0 - 9% Ni) s'oxydent superficiellement, la couche superficielle d'oxyde est enrichie en oxydes des éléments alliés au fer (Cr et Ni). Les contraintes dans la couche d'oxyde entraînent des ruptures de cette dernière découvrant du métal nu qui, à son tour réagit avec l'oxygène et reconstitue la couche d'oxyde [26]. La couche oxydée peut être un mélange d'oxyde de fer et des oxydes de Cr (FeOCr_2O_3) principalement Cr_2O_3 protecteur mais qui joue dans le frottement un rôle très abrasif [27]. D'une manière générale, les aciers inoxydables forment des oxydes relativement minces, dans la plupart des cas, ces oxydes diminuent le frottement ainsi que l'usure par adhésion [27].

I.4.1.3. Oxydation des aciers au chrome

La résistance à l'oxydation d'un alliage métallique dépend de la formation d'une couche d'oxydes stables. De plus, cette couche doit être imperméable aussi bien à la pénétration d'atomes, de molécules ou d'ions gazeux du milieu environnant qu'à la diffusion d'ions métalliques en provenance du substrat métallique. La réaction globale de la formation d'un oxyde sur un métal M peut s'écrire :



Cette réaction n'est possible que si la variation d'énergie libre ΔG_{O_2} à la température T est négative. La connaissance de la grandeur thermodynamique ΔG_{O_2} donne une indication sur l'éventualité et le sens de la réaction, mais celle-ci ne pourra se développer que si sa cinétique est suffisamment élevée. La stabilité de l'oxyde formé ΔG_{O_2} sera d'autant plus grande que la valeur de sera négative.

Comme l'activité oxygène décroît au fur et à mesure que l'on se dirige vers le substrat métallique, les oxydes se disposent par ordre de stabilité croissante. Dans le cas de l'oxydation du fer pur à des températures supérieures à 575 °C, on observe la formation d'une couche formée de trois oxydes. Ce sont, à partir du substrat métallique, successivement : la wüstite FeO, la magnétite Fe₃O₄ et l'hématite Fe₂O₃ (Fig. I.10). Leur séquence d'apparition, FeO puis Fe₃O₄ et enfin Fe₂O₃, est bien corrélée à celle de l'énergie croissante de formation. L'oxyde le plus riche en oxygène Fe₂O₃ se trouve au contact du milieu. La résistance à l'oxydation des alliages fer chrome, plus complexe, est principalement fonction de leur teneur en chrome. D'une manière similaire à ce qui est observé pour la résistance en milieu aqueux, il existe un effet de seuil à une teneur en chrome de l'ordre de 11 %. En dessous de 11 % de chrome, l'oxyde au contact du substrat métallique est de la chromite Cr₂O₃ se présentant sous la forme d'un film discontinu (Fig. I.10). Ce film discontinu est formé de spinelles FeCr₂O₄ et du wüstite FeO. On retrouve ensuite, comme dans le cas du fer, deux films continus d'oxyde composés de magnétite Fe₃O₄ et d'hématite Fe₂O₃. Dans ces conditions, l'activité oxygène est limitée par la présence du film continu et compact de Cr₂O₃.

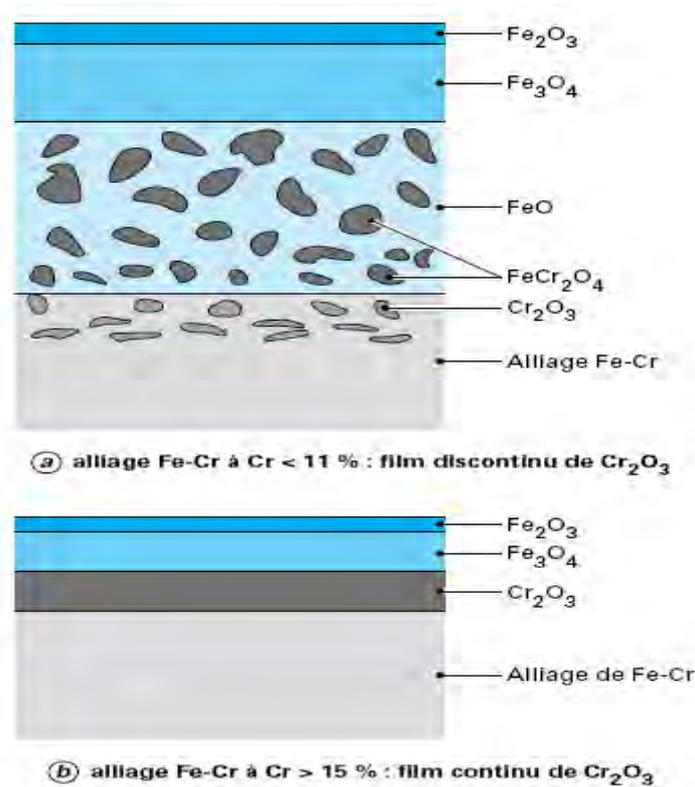


Figure I.10. Influence de la teneur en chrome des alliages Fe-Cr sur la morphologie du film de Cr_2O_3

I.4.1.4. Oxydation du cuivre

Dans l'air (ou l'oxygène) produit une couche superficielle dont la composition, la structure et les propriétés varient beaucoup avec les conditions (température, durée de chauffage, état de surface, etc.) mais, bien que la couche d'oxyde ralentisse la cinétique d'oxydation, elle ne l'arrête jamais totalement :

- au-dessous de 150°C , le film de Cu_2O est adhérent et s'épaissit très lentement [28];
- dans l'intervalle 250 à 650°C , la croissance initiale de la couche est quasi parabolique, puis devient plus accidentée par suite de fissurations; ces effets résultent des contraintes développées dans la couche d'oxyde, car le rapport volumique, métal/oxyde, s'approche de 1,7;
- au-dessus de 700°C environ, l'adhérence reste bonne car une certaine plasticité de la couche fait relaxer toutes contraintes internes; la loi de croissance redevient alors quasi parabolique [29] : le gain de masse par unité de surface est proportionnel environ au carré du temps de chauffage, pour une température donnée :

$$\Delta p = Kt^n, \text{ où } n = 2,0 \text{ à } 2,2$$

Au contact du métal, il s'agit de l'oxyde cuivreux rouge Cu_2O , mais les zones externes au contact de l'air renferment une proportion de l'oxyde cuivrique noir CuO ($\approx 5\%$ à 900°C). La proportion de CuO dans ces couches croît, typiquement de 35% pour 700°C , à 50% pour 600°C , jusqu'à 95% pour 300°C ; dans ce dernier cas, on note que l'oxyde noir CuO prend naissance et s'étend sur un premier film de Cu_2O rouge (Fig. I.11)[30].

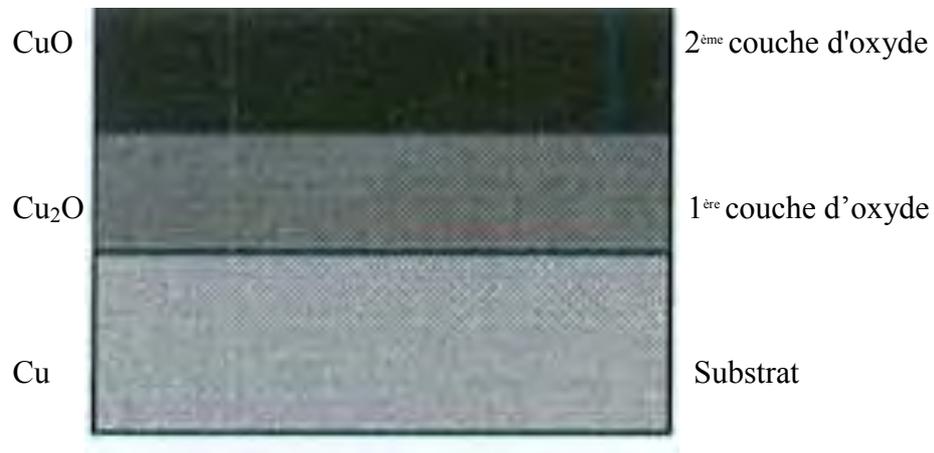


Figure I.11. Vue schématique de la superposition des couches d'oxyde sur le substrat

I.4.1.5. L'oxydation du laiton [30]

Jusqu'à 500°C environ, l'oxydation préférentielle du zinc produit des films adhérents, essentiellement de ZnO , relativement faciles à dissoudre dans H_2SO_4 à 10% . Mais, à des températures plus élevées (et, parfois, en présence de lubrifiants résiduels), les oxydes de cuivre (et, notamment, CuO) peuvent se former, ce qui rend le décapage plus difficile.

I.4.2. La diffusion

Les phénomènes de diffusion à l'état solide correspondent à des sauts effectués par les atomes dans les défauts du cristal, sous l'effet de l'agitation thermique. Alors que les vitesses de migration des atomes dans les gaz ou dans les liquides sont pratiquement visibles à l'échelle macroscopique, il est rare sur un métal de voir, à la température ambiante, l'évolution de ses propriétés par suite d'un phénomène de diffusion. Ce n'est qu'à haute température, entre $T_f/2$ et T_f , T_f étant la température de fusion, que le transport des atomes prend de l'importance à grande distance dans le réseau cristallin.

La diffusion est un phénomène important, qui est à la base de tous les traitements thermiques industriels conditionnant les propriétés structurales des matériaux en service.

C'est en 1855 que les bases théoriques des phénomènes de diffusion ont été établies par Fick : elles expriment, au même titre qu'un flux de chaleur ou qu'une densité de courant

électrique, un flux d'atomes dans une direction donnée du cristal. On est amené ainsi à définir une grandeur physique importante, appelée le coefficient de diffusion. Ce coefficient intervient dans deux lois fondamentales, appelées lois de Fick [31].

I.4.3. Lois de la diffusion

a) Première loi de Fick

Considérons un flux d'atomes passant à travers une surface unité, dans une direction x perpendiculaire à cette surface. Si l'on désigne par $\partial c / \partial x$ la variation du nombre d'atomes (ou de la concentration) correspondant à ce flux par unité de temps, à travers la surface considérée, on obtient [32]:

$$J = -D \partial c / \partial x \quad (\text{I. 26})$$

Avec : D constante appelée coefficient de diffusion.

Cette relation exprime donc, en régime permanent, l'évolution d'un ensemble hétérogène d'atomes mal répartis dans l'espace vers un état d'équilibre plus stable (ensemble homogène). Cette relation est tout à fait comparable à la loi de propagation de la chaleur (loi de Fourier) ou à l'expression de la densité de courant en fonction d'un champ électrique (loi d'Ohm).

b) Deuxième loi de Fick

Elle exprime non plus un régime permanent de diffusion, mais un régime transitoire où l'on suppose $\partial c / \partial t \neq 0$. La variation de la concentration c en fonction du temps est alors définie par la relation :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial \left(\frac{D \partial c}{\partial X} \right)}{\partial X} \quad (\text{I.27})$$

Sous sa forme la plus générale, la deuxième loi de Fick doit s'écrire :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial \left(\frac{D_X \partial c}{\partial X} \right)}{\partial X} + \frac{\partial \left(\frac{D_Y \partial c}{\partial Y} \right)}{\partial Y} + \frac{\partial \left(\frac{D_Z \partial c}{\partial Z} \right)}{\partial Z} \quad (\text{I.28})$$

Si D est une constante quelle que soit la direction dans l'espace (milieu isotrope), on peut écrire :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial Z^2} \right) = D \Delta c = D \Delta^2 c \quad (\text{I. 29})$$

c) Loi d'Arrhénius

Le coefficient de diffusion D est caractéristique d'une mobilité à une température définie. Ce phénomène, lié à l'agitation des atomes, se modifie donc avec la température dans le même sens que la concentration en défauts et l'entropie du système. Il obéit par conséquent, comme tous les phénomènes activés thermiquement, à une relation exponentielle, du type équation de Boltzmann ; appelée pour l'état solide relation d'Arrhénius. Elle s'écrit sous la forme [33]:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (\text{I.30})$$

I.5. FROTTEMENT ET USURE DES CONTACTS METALLIQUES

I.5.1. Considérations générales

La tribologie a pour objet d'étudier le frottement, la lubrification et l'usure sous leurs multiples aspects. Dans de nombreux cas, une réduction de l'usure est recherchée, ainsi qu'une minimisation du frottement cause de dissipation de l'énergie mécanique. Mais dans certains cas, beaucoup de frottement avec peu d'usure est souhaité (freins, embrayage) ou bien l'inverse, dans les procédés d'enlèvement de matière (usinage) [34].

Les conditions de frottement et les mécanismes d'endommagement dépendent d'une multitude de facteurs constituant le tribosystème [35].

- caractéristiques des premiers corps, c'est-à-dire des deux pièces, des deux matériaux en contact,
- caractéristiques du troisième corps (débris d'usure et/ou lubrifiant) situé à l'interface entre les premiers corps,
- mouvements relatifs des corps en contact, efforts appliqués et efforts transmis par le contact, environnement (atmosphère, température).

I.5.2. Le frottement

Le frottement peut être défini comme la résistance tangentielle à l'interface commune entre deux corps lorsque, sous l'action d'une force externe, un corps se déplace ou tend à se déplacer relativement à la surface de l'autre [36].

Le frottement est aussi défini comme la résistance au mouvement qui existe lorsqu'un objet solide est déplacé tangentiellement par rapport à la surface d'un autre qu'il touche, ou lorsque l'on essaie de provoquer un autre déplacement [37].

En frottement métal-métal, et avec ou sans lubrification, les alignements d'aspérités provenant du mode d'usinage des pièces (tournage, fraisage, rectification) doivent être, perpendiculaires au sens du mouvement. Toutes autres choses égales par ailleurs, cette configuration réduit les risques de grippage et conduit aux plus bas coefficients de frottement. Enfin, l'état structural et physique des surfaces conditionne pour une large part leur comportement en frottement. Lorsque l'on veut faire deux métaux, on les choisit de préférence insolubles. Cette règle peut cependant être profondément perturbée par les réactions des métaux avec l'ambiance (oxydation, sulfuration, réaction avec les additifs des lubrifiants) [38].

I.5.2.1. Théories du frottement

Le modèle classique du frottement par glissement admet que la force de frottement résulte de deux sources : une force d'adhésion et une force de déformation au niveau des aspérités des surfaces. Les aspérités de la plupart des surfaces réelles sont déformées plastiquement sous la charge jusqu'à ce que la surface de tous les contacts soit suffisante pour supporter la charge. Avec cette hypothèse on peut écrire l'égalité suivante [39] :

$$A \cdot P_0 = P \quad (I.25)$$

La contrainte de cisaillement, c'est-à-dire la force par unité de surface nécessaire à cisailer les jonctions des contacts formés est :

$$\tau = \frac{F_t}{A} \quad (I.26)$$

On peut écrire :

$$F_t = \frac{P\tau}{p_0} \quad (I.27)$$

La force de frottement F_t est proportionnelle à la charge normale P permettant de définir un coefficient de frottement μ :

$$\mu = \frac{F_t}{P} = \frac{\tau}{p_0} \quad (I.28)$$

Si on remplace τ par la contrainte critique de cisaillement τ_{\max} du métal le plus tendre des métaux en contact, on obtiendra pour la contribution de l'adhésion au frottement le

$$\text{coefficient } \mu_{\text{ad}} : \mu_{\text{ad}} = \frac{\tau_{\max}}{p_0} \quad (I.29)$$

Ce quotient est plus ou moins constant pour la plupart des métaux et explique ainsi pourquoi les coefficients de frottement varient moins que les propriétés mécaniques (dureté).

I.5.2.2. Température de frottement

Le mouvement relatif de deux solides en contact crée une énergie qui se transforme en chaleur. Cette chaleur se dissipe à partir de la zone de contact, principalement dans les solides. Elle est susceptible de modifier les propriétés physico-chimiques des deux corps et de leur phase interfaciale, et donc de modifier les mécanismes d'usure mis en jeu.

La figure I.12 illustre l'observation expérimentale, telle qu'elle a été réalisée par P. Bowden. Un élément de thermocouple, en fer, frotte sur une plaque réalisée en constantan, l'autre élément du thermocouple [40]. La tension électromotrice est mesurée à l'aide d'un oscilloscope. Les variations de cette tension électrique en fonction du temps sont illustrées par la figure I.12.

Deux températures peuvent être définies :

- l'une correspond à la température moyenne θ_m du contact de surface A_n , sa valeur est relativement stable dans le temps, si la vitesse est constante.
- l'autre θ_f fluctue énormément, elle correspond à des impulsions de courte durée, mais dont les valeurs sont élevées. θ_f correspond aux chocs des aspérités. On la nomme température flash.

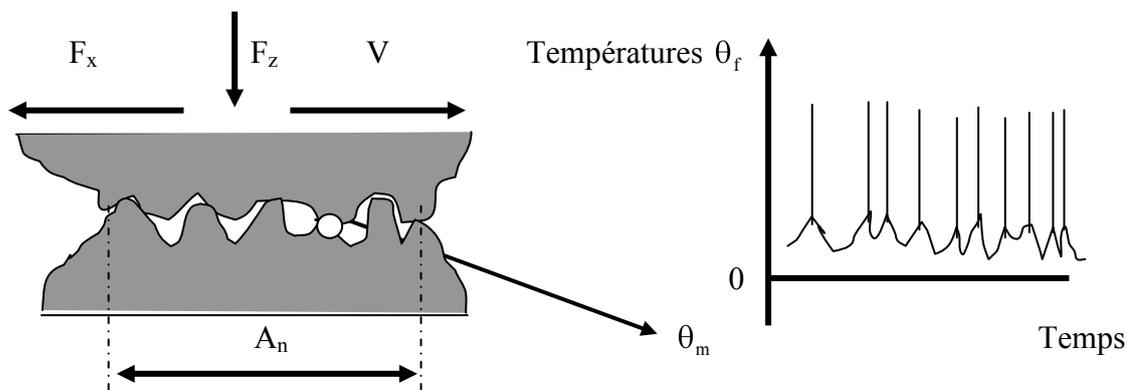


Figure I.12. Schématisation des mesures de la température moyenne du contact et de la température éclair ou température flash.

I.5.2.3. Calcul de la quantité de chaleur générée par frottement mécanique

La quantité de chaleur générée par frottement mécanique de deux surfaces en contact dynamique par unité de surface et de temps Q s'exprime sous la forme :

$$Q = \frac{\mu \cdot F_z \cdot V}{A_n} \quad (\text{I.30})$$

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

$$Q = \mu.p.V = \tau.V \quad (I.31)$$

Le flux total de chaleur est :

$$Q = A_n q \quad (I.32)$$

I.6. L'USURE

L'usure est le résultat de plusieurs mécanismes isolés ou simultanés pouvant intervenir de façon prioritaire ou sélective et par conséquent contrôlent le comportement du matériau des pièces en mouvement sous contact [41]. Elle cause la défaillance par la perte de propriétés ou des dimensions requises des pièces et provoque ainsi des endommagements imprévus des pièces et des machines. La résistance à l'usure dépendra plus des propriétés superficielles que volumiques [41]. Les aspérités transmettent les contraintes à la surface même en présence d'un lubrifiant. A partir des expériences tribologiques faites avec un frotteur cylindrique sur un disque (Fig. I.13), Archard mesure les différentes usures de matériaux frottant à sec et il constate que les taux d'usure (perte de volume divisée par la distance parcourue) varient, dans un rapport de 1 à 10^5 , alors que les coefficients de frottement sont dans le rapport de 1 à 5 [42]. L'expression proposée par Archard est [42]:

$$\Delta V = K \frac{P}{H} L \quad (I.33)$$

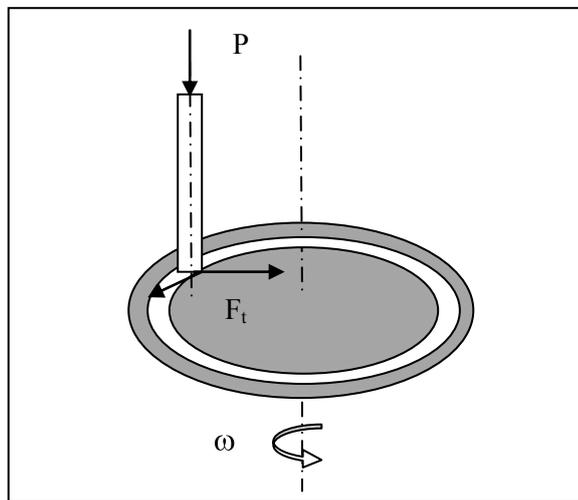


Figure I.13. Représentation schématique du tribomètre utilisé par Archard [42]

Tableau I. 1 : valeurs du taux d'usure K et du coefficient de frottement μ , obtenues dans les conditions $P = 4\text{N}$ et $V = 1,80\text{ m/s}$ [41].

Matériaux	Taux d'usure ($10^{-10}\text{ cm}^3/\text{cm}$)	μ	K
acier doux/acier doux	1570	0,62	$7. 10^{-3}$
Laiton 60/40	240	0,24	$6. 10^{-4}$
acier inoxydable ferritique	2,7	0,53	$1,7. 10^{-5}$
polyéthylène	0,3	0,65	$1,3.10^{-7}$
carbure de tungstène/carbure de tungstène	0,02	0,35	$1. 10^{-6}$

I.6.1. Les principaux mécanismes d'usure

L'usure est le processus d'endommagement des surfaces en contact, sous l'effet du frottement. Dans la référence [43], Kong et Ashby ont analysé le mécanisme d'usure des différents matériaux solides. Les mécanismes d'usure identifiés sont :

- usure par rupture fragile (usure de fatigue) ;
- usure par rupture thermomécanique;
- endommagement de choc thermique.

I.6.1.1. Usure adhésive : Identification des types d'usure par adhésion

Elle se manifeste par le transfert de matière de l'un des premiers corps sur le corps antagoniste et elle est susceptible d'aboutir au grippage du dispositif. L'usure adhésive résulte de la formation des micro-jonctions entre les surfaces en contact et la création de micro-rupture [44].

Il est généralement admis, que l'usure par adhésion peut être divisée en deux classes : L'usure sévère et l'usure douce. Ces deux types d'usure sont entièrement phénoménologiques [45], pour les distinguer, on base sur les observations suivantes :

La résistance électrique de contact, la composition et la taille des débris d'usure et enfin la topographie des surfaces usées.

- la mesure de la résistance électrique de courant

L'usure sévère est caractérisée par de faibles valeurs de la résistance électrique de contact, tandis que l'usure douce est marquée par des résistances de contact élevées.

- analyse des particules d'usure

Pour une usure sévère, les débris contiennent beaucoup de métal et sont de dimensions supérieures à 10 μm , par contre, si l'usure est douce, les particules sont constituées essentiellement d'oxydes obtenus par réactions chimiques avec le milieu ambiant, leurs diamètres étant compris entre 100 \AA à 1 μm [34].

- examens microscopiques des surfaces usées

Lorsqu'il s'agit d'une usure sévère, les traces engendrées par frottement sont profondes, par conséquent, les surfaces sont rugueuses, alors que pour une usure douce, les surfaces frottées sont lisses, souvent plus lisses que leur finition initiale [34].

I.6.1.2. L'usure abrasive

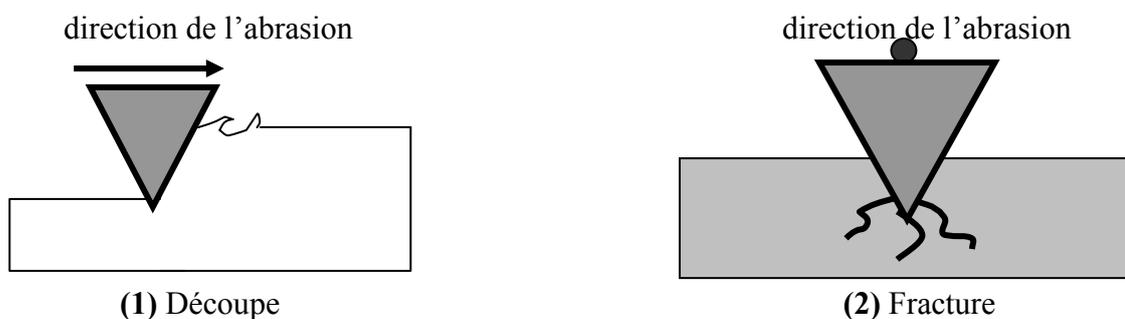
L'usure abrasive est due au contact entre une particule et la surface d'un solide. Lors de son passage dans le contact, cette particule peut enlever de la matière selon quatre modes d'enlèvement de matière (Fig. I.14). Elle peut :

- couper, si elle est suffisamment aiguisée,
- repousser la matière en surface,
- provoquer une fracture, si le solide est fragile,
- enlever des grains, si le matériau est insuffisamment homogène.

Ces deux derniers modes se produisent plus rarement que les deux premiers. La nature de l'usure abrasive est aussi déterminée par le mode d'acheminement des particules dans le contact [47].

- si les particules sont fixées à l'une des deux surfaces, il s'agit d'abrasion à deux corps.
- si les particules sont libres de rouler ou de glisser par rapport aux deux surfaces, on parle alors d'abrasion à trois corps. L'usure abrasive est donnée par l'expression :

$$U_{\text{abrasive}} = K_g P C_f V_g \quad (\text{I.34})$$



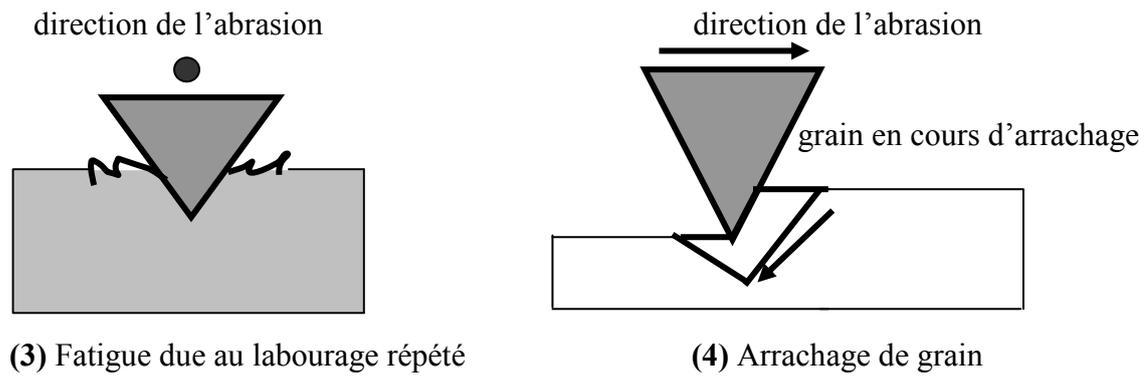


Figure I.14. Les quatre modes d'usure abrasive [47]

Pour une cinématique donnée, il existe deux moyens de prolonger la durée de vie d'un contact vis-à-vis de l'usure par abrasion. Il faut soit diminuer la teneur en abrasif, soit en diminuer ses effets. L'efficacité d'un abrasif est liée à sa forme, à sa taille, et au rapport de sa dureté à celle du matériau abrasé.

Williams (1992) montre que si la taille de l'abrasif est plus petite que celle du film d'huile, l'usure sera faible et aucune direction d'usure privilégiée n'apparaîtra. Si la taille des particules abrasives est supérieure à celle du film, des stries apparaîtront dans la direction du glissement [48].

Dans le cas d'une abrasion à trois corps avec des particules dures, il est donc intéressant d'augmenter la durée de vie des surfaces à protéger. Cependant, si l'un des deux solides en contact est beaucoup plus mou que l'autre, les particules vont s'enchâsser à sa surface et l'abrasion à trois corps revient à une abrasion à deux corps. Seul le matériau dur va alors s'user, le matériau mou étant protégé par les particules dures.

I.6.1.3. L'usure corrosive

La corrosion est définie comme l'usure graduelle d'une surface par un processus chimique ou électrochimique. Si l'on superpose un enlèvement mécanique du produit de réaction durant le mouvement relatif des pièces en contact, on arrive à une situation appelée l'usure corrosive.

L'usure corrosive est donc l'enlèvement mécanique de produit de corrosion, quel que soit le processus mécanique qui provoque cet enlèvement de matière (abrasion, adhésion, fatigue.....etc.), par opposition, on appellera usure métallique, l'enlèvement mécanique de métal non corrodé.

I.6.1.4. Usure érosive

Elle correspond à une perte de matière par la surface d'un solide au contact d'un fluide en mouvement contenant des particules solides. Elle se manifeste sur les matériaux fragiles par des fissures et des éclats microscopiques et sur les métaux ductiles par des piqûres, rayures ou alors par polissage.

I.6.1.5. Usure par fatigue

Elle est liée à l'action d'un mouvement cyclique et à la capacité des matériaux à absorber les énergies de déformation et les contraintes thermiques générées par frottement. L'usure par fatigue se manifeste par des fissures, des écailles et des changements de structure métallurgique.

Les comportements face à ce mécanisme d'usure dépendent de la nature du matériau. Dans le cas de matériaux ductiles (matériaux métalliques ou polymères), la rupture par fissuration (ou mécanisme de délaminage) a lieu en sous-couche, parallèlement à la surface de frottement, dans les zones où les contraintes de cisaillement sont maximales. La théorie d'Hertz permet d'estimer la répartition des contraintes de cisaillement en sous-couche. L'analyse des transferts thermiques sur la microstructure (déplacement des lacunes, des dislocations, des plans de glissement, l'effet des joints de grains...) explique la formation de fissure associée à un écrouissage ou à un adoucissement de la surface [49].

I.6.1.6. Usure par oxydation

L'usure par oxydation est un mécanisme d'usure douce, elle découle de l'adsorption de l'oxygène sur les surfaces métalliques mises à nu lors du frottement et des réactions chimiques de cet oxygène avec le métal [50]. Le taux d'oxydation est ensuite contrôlé par la diffusion de l'oxygène dans les couches superficielles. Ainsi, les films d'oxyde se développent sur le plateau de contact à la température θ_o , l'usure se produit alors par écaillage de l'oxyde et émission de débris, soit quand la couche oxydée atteint une épaisseur critique ζ_c (1 à 3 μm), soit lors du contact des aspérités [50].

I.6.1.6.1. Théorie de Quinn

Dans les années 70, une étude très remarquable sur la théorie de l'usure oxydante a été énoncée par Quinn [51]. Quinn a développé un modèle analytique de prédiction du taux d'usure, donnée comme suit :

$$W = \frac{P.d.A. \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)}{V.H.f^2.\rho^2.\xi^2} \quad (I.35)$$

Quinn ne pouvait estimer les températures au niveau des surfaces du contact réel. Afin de contourner ce problème, il suppose que :

- le nombre d'aspérités en contact est fixe durant le processus, ce nombre ne verra aucune évolution notable à la fin de l'essai,
- la taille de ces aspérités est définie avant l'essai et supposée constante,
- l'épaisseur de la couche d'oxyde ne peut excéder une valeur critique.

I.6.1.6.2. Modélisation

Le modèle de l'usure oxydante douce a été développé par Quinn et Rawson [52]. Une technique itérative a été utilisée afin de bien estimer les valeurs des paramètres obtenues expérimentalement. Lim et Ashby [53] ont présenté quelques légères modifications pour appliquer le modèle de Quinn à des aciers en supposant que la cinétique d'oxydation des aciers suit une loi parabolique. La masse m de l'oxygène diffusé dans le métal par unité de surface, à l'instant t s'écrit en fonction de K_p , constante parabolique de la cinétique d'oxydation :

$$K_p = B \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (I.36)$$

$$m^2 = K_p$$

On peut supposer également que le film croît jusqu'à une épaisseur critique ξ_c à laquelle il casse et forme des débris. On admet également que l'oxyde formé est principalement le Fe_3O_4 . La masse gagnée par unité de surface est le résultat de la formation de l'oxyde :

$$m = \frac{2}{3} V_{Fe} \rho \frac{M_{O_2}}{M_{Fe}} \quad (I.37)$$

En négligeant l'expansion volumique après oxydation, on aura :

$$X^2 = C^2 K_p t \quad (I.38)$$

Avec :

$$C = \frac{3}{2} \frac{M_{Fe}}{M_{O_2} \rho}$$

Dans un régime d'usure oxydante douce, l'oxydation est occasionnée par le flux de chaleur engendré par le frottement entre aspérités. Le temps pour atteindre une épaisseur critique de l'oxyde ξ_C est fonction de la température éclair T_f au niveau des aspérités en contact :

$$t_c = \frac{\xi_C^2}{C^2 B \exp\left(-\frac{Q}{R T_f}\right)} \quad (I.39)$$

L'usure est causée par le craquage de l'oxyde. Le volume $A_r \xi_C$ (avec A_r est l'aire réelle du contact), est alors la perte instantanée t_c . Durant cette période, la distance parcourue est $V.t_c$ (avec V est la vitesse) et le taux d'usure W est :

$$W = \frac{A_r \xi_C}{V.t_c} = \frac{A_r C^2 B}{V.\xi_C} \exp\left(-\frac{Q}{R T_f}\right) \quad (I.40)$$

I.6.2. Evaluation de l'usure

Après l'essai de frottement, les différentes caractéristiques permettent de quantifier l'usure : largeur L_{US} , profondeur Z_{US} et aire d'usure S_{US} de la section de la piste d'usure sont déterminées avec un microfilomètre à palpeur. Avant chaque profilométrie, les échantillons sont nettoyés dans un bain ultrasonique d'éthanol afin d'éliminer les débris d'usure [54].

Le volume d'usure, V_{US} , équivaut au produit de l'aire d'usure, S_{US} , par le périmètre $2\pi R_p$ de la piste de frottement. Et le taux d'usure volumique, K_{US} , est déterminé en divisant, V_{US} , par la charge appliquée P , et la distance totale de glissement, D_g :

$$K_{US} = \frac{2\pi.R_p.S_{US}}{P.D_g} \quad (I.41)$$

Où : R_p est le rayon de giration de la piste, P la charge appliquée [N] et D_g la distance totale de glissement [m].

Les caractéristiques d'usure L_{US} , Z_{US} et S_{US} sont relevées dans chaque enregistrement microprofilométrique (Fig. I.15).

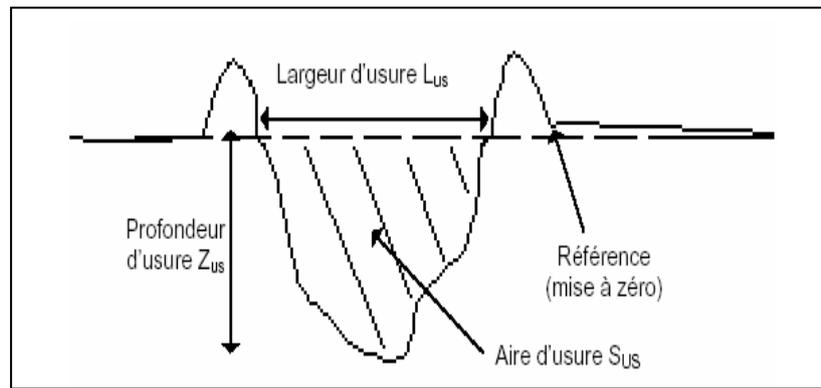


Figure I.15. Aspect d'un profil d'usure

I.6.3. Paramètres agissants sur le frottement et l'usure

En général, la perte de masse quantifiant l'usure d'un corps mou glissant sur une surface dure est proportionnelle non seulement à la distance de glissement, mais aussi à la charge normale appliquée P [55, 56].

Pour les aires de contact élevées, le coefficient de frottement est indépendant de la charge normale. En revanche, pour les très petites aires de contact, quand P croît, μ peut soit augmenter, dans le cas du glissement diamant sur céramique [57], soit diminuer, dans le cas du glissement métal sur métal [58].

La température de contact lors des essais d'usure varie d'une manière spontanée et aléatoire. Cette température de contact dépend essentiellement de la nature du couple des matériaux en contact de la charge et de la vitesse. Cependant la mesure de la température est très difficile à effectuer compte tenu du choix de l'endroit de prise de la température et des phénomènes d'évacuation de la chaleur et de la dissipation de l'énergie.

Au cours des essais d'usure pour différentes vitesses de glissement, la température augmente d'une manière progressive en fonction de la vitesse puis elle s'élève brutalement au fur et à mesure qu'on se rapproche du point de contact, et enfin on prouve par observation métallographique que l'échantillon subit un écoulement plastique provoqué par l'élévation de la température en fonction de la vitesse [59].

En règle générale, le coefficient de frottement diminue avec l'augmentation de la vitesse de glissement [58]. Par ailleurs, l'élévation de la température des matériaux en contact influence leur résistance à l'usure, sachant qu'elle entraîne une dégradation de leurs propriétés mécaniques [60].

Remarquons enfin que l'état géométrique (rugosité) et physico-chimique des surfaces des matériaux en contact glissant influence grandement le comportement tribologique du couple de frottement.

On peut conclure que les paramètres influencés sur le frottement et l'usure sont :

- la charge normale ;
- la température ;
- l'aire de contact ;
- l'état physico-chimique des surfaces frottantes (la rugosité, les couches d'oxydes) ;
- la structure cristallographique et les propriétés mécaniques des matériaux (dureté) ;
- l'absence ou la présence d'un lubrifiant ;
- la présence d'agents actifs en frottement (additifs anti-usure).

I.6.4. Influence de l'environnement sur le frottement et l'usure des métaux

L'environnement joue un rôle majeur dans le comportement tribologique des surfaces solides. Pour cela, plusieurs auteurs [61, 62] parmi d'autres, ont essayé d'exprimer l'influence de l'environnement sur le frottement et l'usure des métaux.

Dans plusieurs cas, on pensait que l'air ou l'oxygène réduit le frottement et l'usure, du fait que l'oxyde obtenu en surface gêne la formation des jonctions (soudures) métalliques ou les affaiblit, de telle manière que leur rupture se produit au niveau de l'interface. Ce point de vue n'est pas toujours vrai.

La figure I.16 représente les variations du coefficient de frottement μ et de l'usure W vis-à-vis de la vitesse V pour le couple Ni/Ni. On constate que μ est plus élevé sous vide que dans l'air [70]. En revanche, l'usure est plus forte dans l'air que sous vide. Par conséquent, dans ce cas, le coefficient de frottement et l'usure varient en sens inverse.

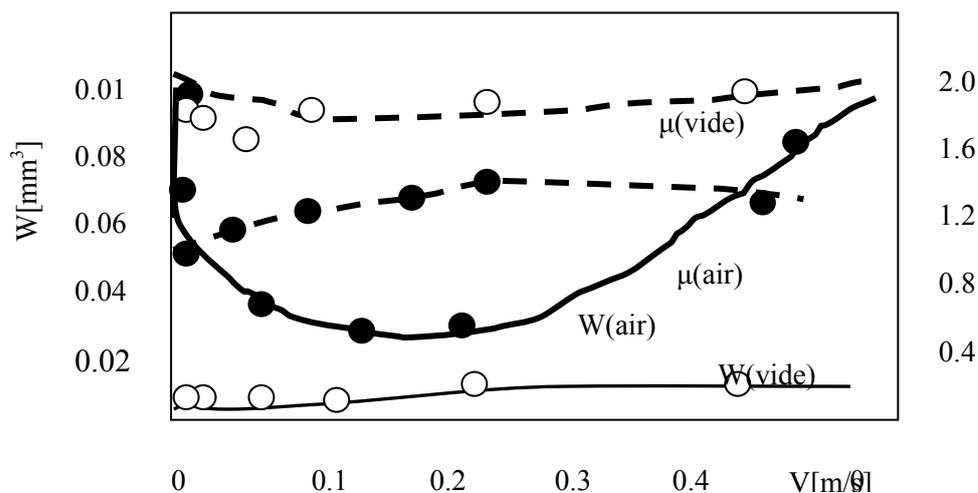


Figure I.16. Effet de l'environnement sur le frottement et l'usure du couple Ni/Ni [63]

Par ailleurs, il a été montré que sous certaines conditions, l'usure peut être réduite lorsque les surfaces en contact frottent dans une atmosphère inerte [63], tandis que dans l'air, les surfaces sont chimiquement actives. Et si l'attaque chimique est plus forte, l'épaisseur de métal transformée est plus importante. Les mêmes études [63] ont confirmé que l'usure décroît lorsque la quantité d'oxygène diminue car ceci retarde l'oxydation du matériau transféré depuis le pion (mou) vers le disque (dur) et réduit les produits d'usure.

I.6.5. Effet du courant électrique sur le contact des surfaces solides

I.6.5.1. Contact stationnaire

Soit deux surfaces planes appuyées l'une contre l'autre avec un effort P . L'interface étant traversée par un courant électrique I . La transmission de ce dernier s'effectue aux points de contact effectifs. De tels contacts sont le siège de hautes pressions et de hautes températures ponctuelles dues à la dissipation d'énergie mécanique et à l'effet joule [4]. Ces deux phénomènes concomitants provoquent des soudures aux points de contact. I de plus, l'intensité de courant est augmentée, l'élévation de température qui en résulte entraîne un adoucissement du métal le plus tendre au voisinage du contact [4], d'où une augmentation de l'adhésion. Les températures élevées peuvent produire des fusions locales et activent les liaisons covalentes.

I.6.5.2. Contact dynamique

Lorsque le contact devient dynamique, par glissement sous l'action d'une force tangentielle, l'interface dissipe l'énergie mécanique due au frottement et devient source de chaleur. Dans le cas où il y a glissement d'un pion sur un disque, la chaleur dissipée par effet joule sera relativement faible, parce que les points de contact change sans cesse (Fig. I.17); par conséquent, pour une même intensité de courant électrique, les températures obtenues, dans ce cas, sont inférieures à celles atteintes lors du contact statique évoqué plus haut [4].

En conclusion, l'effet joule joue un rôle important dans des contacts statiques et un rôle moindre dans le cas des contacts dynamiques.

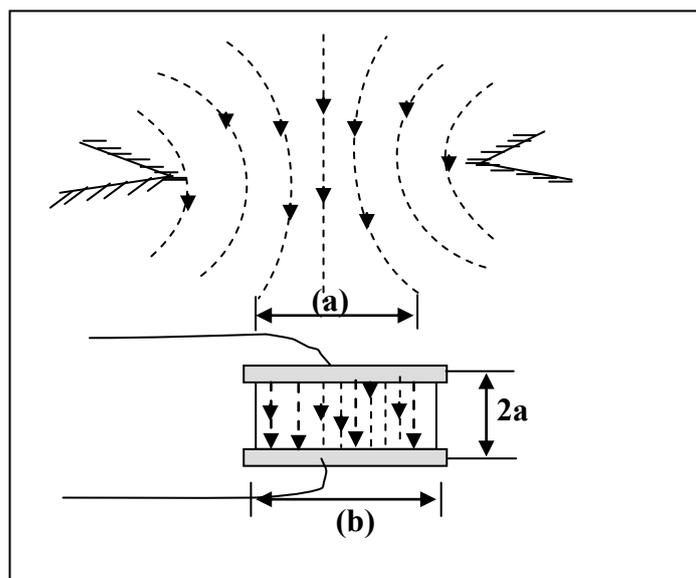


Figure I.17. Modèle dans lequel la résistance électrique de contact est simulée à un cylindre de hauteur a et de surface de base πa^2 , (a) cas réel ; (b) simulation d'une jonction [2].

I.6.6. Effet du courant électrique sur le frottement et l'usure

Le comportement en frottement et usure dépend non seulement des matériaux en présence, mais aussi des films présents à l'interface [64]. Ces phénomènes sont complexes, ils dépendent des conditions externes et varient largement d'un matériau à l'autre, c'est pourquoi, le frottement et l'usure peuvent subir des variations similaires [64].

Contrairement au frottement, l'usure est un processus sensible qui peut varier d'un facteur de l'ordre de deux ou plus de faibles changements dans les conditions expérimentales.

Des études [64, 4] ont montré que le courant électrique n'influe pas directement sur l'usure, sauf dans le cas où on observe une électrolyse occasionnelle, mais, il peut être la cause d'une élévation de température, et agit donc par les conséquences que celle-ci entraîne :

- adoucissement du métal le plus doux,
- oxydation renforcée à l'interface.

En effet, dans le cas où il s'agit d'un graphite ou d'un métal non oxydable par exemple (l'or) frottant sur le carbone, l'usure demeure largement indépendante du courant [65], par contre, elle dépend de la charge appliquée P . Néanmoins, si un matériau oxydable, tel que le bronze glisse sur le carbone, l'oxydation joue un rôle prépondérant. Par ailleurs, il est possible que l'usure soit plus faible en présence de courant électrique que sans courant.

Le passage du courant électrique joue un rôle important dans l'usure des lignes électriques. Le courant électrique à travers le contact glissant cuivre-acier est un paramètre

qui influe considérablement l'oxydation des surfaces de contact et leur comportement en usure. L'intensité du courant et sa polarité induisent un champ électrique dans le contact. Ce champ électrique augmente l'oxydation du métal lorsque ce dernier est anode, et réciproquement la croissance de l'oxyde augmente le champ électrique. Ainsi il y a croissance du film d'oxyde jusqu'à sa rupture mécanique et/ou électrique. L'analyse de la résistance électrique de contact montre bien la croissance cyclique et le phénomène de rupture du film d'oxyde. La distribution du champ des contraintes de contact créé par la charge normale P et la force tangentielle F_t dans le contact cylindre/plan dépend de l'épaisseur du film et de la valeur du coefficient de frottement μ . La croissance du film d'oxyde à l'interface conduit à un contact glissant cylindre/couche d'oxyde/plan pour le couple cuivre-acier [66].

I.6.7. Effet de la polarité sur le comportement tribologique

La polarité des matériaux en contact joue parfois un rôle sur le frottement et sur l'usure mais les résultats publiés [67,68] font apparaître des tendances plus des certitudes. On ne cite ci-dessous que les résultats les plus significatifs.

a) Effet de la polarité sur le frottement

Pour un disque en cuivre frottant contre un matériau en électrographite, il a été mesuré [2] le coefficient de frottement μ dans les conditions suivantes :

Tableau I.2: Le coefficient de frottement pour un contact cuivre-électrographite.

P [N]	I [A]	V [m/s]	μ disque cathode	μ disque anode	I = 0 A
P = 6	5 < I < 30	5 < V < 30	$\mu = 0,17$	$\mu = 0,21$	$\mu = 0,24$

Lorsque le disque est en acier et l'antagoniste est un composé de métal et de graphite, les études ont montré que :

Tableau I.3 : Le coefficient de frottement pour un contact acier-graphite [2].

P [N]	I [A]	V [m/s]	μ disque cathode	μ disque anode	I = 0 A
P = 6	I = 7	5 < V < 30	$\mu = 0,15$	$\mu = 0,22$	$\mu = 0,20$

Dans les deux cas, on constate que le passage du courant électrique diminue le coefficient de frottement surtout lorsque le disque est cathode.

b) Effet de la polarité sur l'usure

Les résultats ont montré que la résistance électrique de contact en fonction du temps fluctue lorsque le disque est anode; en revanche, quand il devient cathode, la résistance de contact diminue et les fluctuations se décroissent. Selon les auteurs [14], [4], cette différence de comportement est due au phénomène d'oxydation qui est plus marqué lorsque le disque est anodique. A cause de la chaleur générée par frottement et par effet joule, une couche d'oxyde se développe à l'interface ou les points de contact deviennent résistants. Dans ces conditions, la conduction du courant se produit à travers les surfaces nues en contact, obtenues par rupture du film d'oxyde. De plus, les ions positifs de cuivre se déplacent à travers le film résistif pour former des fils métalliques entre les surfaces frottantes [67].

Le remplacement du graphite par le carbone montre un faible transport de cuivre, de ce fait, il se produit des grains d'oxyde de cuivre qui favorisent l'usure par abrasion des éléments frottants.

Quand le disque en cuivre devient cathode, les fils métalliques ne peuvent pas se former à cause du champ électrique dirigé contre la diffusion des ions positifs. La couche oxydée mince et bien accrochée au cuivre joue le rôle de protecteur et réduit l'usure des frotteurs [69, 13].

I.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a cherché à présenter, comprendre et modéliser les mécanismes du frottement, d'usure et des contacts électriques. L'étude du frottement se révèle une tâche complexe mettant en jeu plusieurs phénomènes d'origine mécanique ou chimique. Le frottement se manifeste par des forces de frottement qui s'opposent au déplacement relatif des corps en contact, mais aussi par leur usure. Ces deux mécanismes sont très dépendants l'un de l'autre. Par exemple, lorsque deux solides frottent l'un sur un autre, les contraintes générées vont être suffisamment fortes pour plastifier et arracher des morceaux de matière. Ces particules plus ou moins grosses, sont dans un premier temps prisonnier du contact mais par la suite, peuvent y circuler puis s'en extraire. Durant leur parcours, elles vont devenir un troisième corps qui sera une interface et modifie les conditions initiales. Des particules dures vont venir rouler, provoquant des rayures qui à leur tour vont générer des copeaux, aggravant ainsi le phénomène. A l'inverse des particules molles, vont se déformer et s'agglomérer pour

former une couche protectrice possédant une faible résistance au cisaillement. Le temps ou l'histoire du contact prend alors une place essentielle dans le comportement tribologique du contact. De ce fait, les paramètres à prendre en compte sont à la fois les contraintes extérieures comme les pressions ou les cisaillements (chargement normal et tangentiel propre à système étudié), les conditions d'environnement (milieu humide/sec, température,...) que les contraintes spécifiques au contact (géométrie du contact, présence de lubrifiant, propriétés des matériaux,...). C'est cette multiplicité et cette dépendance mutuelle qui sont complexes à modéliser. Des mécanismes élémentaires sont définis comme l'adhésion, l'abrasion, la fatigue, l'érosion ...etc.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **D. Daniel, R. Caplain**, Méthodes usuelles de caractérisation des surfaces, Société française de métallurgie, Paris, (1988).
- [2] **A. Bouchoucha**, Etude du comportement en frottement et usure du couple cuivre-acier, thèse de doctorat INPL, Nancy, France ,(1997).
- [3] **K. L. Johnson**, Contact Mechanics, Cambridge University Press, Cambridge, (1985).
- [4] **E. H. Jordan, M. R. Urban**, An approximate analytical expression for elastic stresses in at punch problems, Wear, 236 134-143,(1999).
- [5] **M. J. Puttock and E. G. Thwaite**, Elastic Compression of Spheres and Cylinders at Point and Line Contact, National Standards Laboratory Technical Paper N° 25, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia, Melbourne, (1969).
- [6] **B. Nelson Norden**, On the Compression of a Cylinder Contact with a Plane Surface, Institute for Basic Standards National I Bureau of Standards Washington, D. C. 20234 NBSIR 73-243, July 19,(1973).
- [7] **H. Zahouani, S. Mezghani and al**, Effect of roughness scale on contact stiffness between solids, Wear 04.067, (2008).
- [8] **L. Féchant**, Le contact électrique : Phénomènes physiques et matériaux. Hermès, Paris, (1996).
- [9] **L. Dong and al**. Wear mechanism of aluminum–stainless steel composite conductor rail sliding against collector shoe with electric current. Wear 263, 598–603, (2007).
- [10] **W. Park Y and al**, The influence of current load on fretting of electrical contacts. Tribology International 09.004L, (2008).
- [11] **G. Bucca, A. Collina**, A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph–catenary system, Wear 266 46–59, (2009).
- [12] **H. Zhao, G.C. Barber**, J. Liu, Friction and wear in high speed sliding with and without electrical current, Wear 249 ,409–414, (2001).
- [13] **D. Mamadou**, Contribution à l'étude mécanique et électrique du contact localisé : Adaptation de la nanoindentation à la micro-insertion. Thèse de doctorat l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne en Microélectronique (2009).
- [14] **D. H. Hai and al**, A sliding wear tester for overhead wires and current collectors in light rail systems. Wear 239, 10-20, (2000).
- [15] **R. Holm**, Electrical contacts, Theory and applications. Springer-Verlag, Berlin, (1967).

- [16] **Y.V. Sharvin**, A possible method for studying fermi surfaces. Sov. Phys. JETP, 21: 655-656, (1965).
- [17] **G. Wexler**. The size effect and the non-local boltzmann transport equation in orifice and disk geometry. Proc. Phys. Soc., 89: 927-941, (1966).
- [18] **J. A. Greenwood**, Constriction resistance and the real area of contact. Brit. J. Appl. Phys., 17, (1966).
- [19] **J. A. Greenwood and J.B.P. Williamson**, Contact of nominally flat surfaces. Proc. Royal Society A, 295:300-319, (1966).
- [20] **D. H. Buckley**, Surface effect in adhesion, friction wear and lubrication. Tribology, series 5, (1981).
- [21] **Y. Adda et J. Philibert**, La diffusion dans les solides, Tome II, Dunod, (1956).
- [22] **D.H. Buckley**, Properties of surfaces, Handbook of lubrication theory and practice of tribology, Vol. II, Theory and design, 201-208, (1984).
- [23] **E. A. Gulbransen**, Trans. AIME-171-306, (1947).
- [24] **J.P. Bailon, J.M. Dorlot**, Des matériaux, 3^{ème} édition, Presses Internationales Polytechnique, 374-380, (2000).
- [25] **I. Iliuc**, Tribology of thin layers, Tribology, Series 4, Elsevier, (1980).
- [26] **Z. Zhang and G.H. Paulino**, Cohesive zone modeling of dynamic failure in homogeneous and functionally graded materials. International Journal of Plasticity, (2005).
- [27] **B.N.J. Persson**, Contact mechanics for randomly rough surfaces, Surface Science Report, (2007).
- [28] **O. Kubaschewski and B.E. Hopkins**, Oxidation of metals and alloys. Butterworths Scientific Publications, London, (1953).
- [29] **J. Marciniak**, Interpretation of sliding speed effect on wear of low carbon steel based on the theory of oxidation, Eurotrib, 241-256, (1981).
- [30] **D. Arnaud**, Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques M 430 – 2.
- [31] **P. Guiraldenq**, Diffusion dans les métaux, Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques M 55-1.
- [32] **F.J. Kedves and al**, Diffusion in Metals and Alloys DIMETA 88, vol I, II, III. Sciences Technique Publications. Liechtenstein, (1990).
- [33] **T. Devers and al**, L'assemblage à l'état solide du Ti/Ta et Zy/Ta, en 30 s, par soudage-diffusion dynamique. Mémoire. Et. Sc. Sc. Rev. Métall., p. 91 à 98, Février, (1991).
- [34] **J. M. George**, Frottement, usure et lubrification. La tribologie où Sciences des surfaces, CNRS Editions ; ISBN10 : 2-212-05823-3, (2000).

- [35] **F.P. Bowden and D. Tabor**, The Friction and Lubrification of Solids. Clarendon Press, Oxford, (1950).
- [36] **A. Swartz**. Glossary of terms and definitions in the fields of friction, Organisation for Economic Cooperation and development, (OCDE), (1969).
- [37] **E. Rabinowicz**, Friction and wear of materials. New York-London, Sydney, (1965).
- [38] **G. Zambelli, L. Vincent**. Matériaux et Contacts, Une approche tribologique. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- [39] **M. Godet, D. Ploy**. Introduction to Tribology. Colloques internationaux du CNRS, N° 233, Polymers et lubrification, P 361-367, (1974).
- [40] **A. D. Sarkar**, Friction and wear. Academic press, London, (1980).
- [41] **M. Godet**, The third body approach: a mechanical view of wear. *Wear*, 100, 437-452 (1984).
- [42] **J.F. Archard**, Wear theory and mechanisms. In: M.B. Peterson, W.O. Winer (eds.). *Wear Control Handbook*. ASME, (1980).
- [43] **H. Kong and M.F. Ashby**, Wear mechanisms in brittle solids, *Acta Metallurgica et Materialia* 40. 2907–2920, (1992).
- [44] **B. Bhushan**, Principles and applications of tribology. ISBN 0-471-59407-5; TJ 1075. B473, (1999).
- [45] **H. Werkstofftechnik**, Wear and Wear Mechanisms; Tribology. Materials Science & Engineering. Lotharstr 1, 47057 Duisburg, Germany.
- [46] **A. Cornet et J. P. Deville**, Physique et ingénierie des surfaces. Livre EDP Sciences.
- [47] **G. Colin**, Les mécanismes de l'usure et du frottement, traitement thermique. 208, 79-86, (1987).
- [48] **J. Williams and A.M. Hyncica**, Mechanisms of abrasive wear in lubricated contacts. *Wear* Volume 152, Issue 1, Pages 57-74, 5 January (1992).
- [49] **O. Thaer**, Simulation de l'usure et d'avaries sur des dentures d'engrenages cylindriques - Influence sur le comportement statique et dynamique de transmissions par engrenages. Thèse de doctorat, option : Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique (MEGA), Spécialité: Mécanique, (2012).
- [50] **S. Fayeulle, D. Treheux et N. Moncoffre**, Microstructure et frottement d'un acier à roulement implanté d'ions d'azote. *Journal de chimie physique*, 84, N°2, (1987).
- [51] **T.F.J. Quinn and al**, More developments in the oxidational theory of the mild wear of metals. *Wear of materials*, Dearborn Mich. 1-11, (1979).

- [52] **D.M. Rawson and T.F.J. Quinn**, Frictional heating and the oxidational theory of wear. *Journal of physics* 13(2), 19-209, (1980).
- [53] **S.C. LIM and al**, Wear-rate transitions and their relationship to wear mechanisms. *Acta Metal*, 35, 1343–1348, (1987).
- [54] **J.F. Archard**, Contact and Rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, vol.24, p. 24, (1953).
- [55] **E.-A. Lee, K. H. Kim**, *Thin Solid Films*, 420-421, p. 371-376, (2002),.
- [56] **A. Erdemir and C. Bindal**, Formation and self-lubricating mechanisms of boric acid on borided steel surfaces. *Surf. Coat. Techn.*, 76-77, p. 443-449, (1995).
- [57] **K. H. Zum Gahr**, Microstructure and wear of materials. *Tribology International*. 31, p. 587-596, (1998).
- [58] **J.M. Carrapichano, J.R. Gomes**, Tribological behavior of Si₃N₄-BN ceramic materials for dry sliding applications. *Wear* 253, 1070–1076, (2002).
- [59] **L. Bourithis, S. Papaefthymiou, GD. Papadimitriou**, Plasma transferred arc boriding of a low carbon steel: microstructure and wear properties. *Appl Surf Sci* 200 (1-4): 203-218 Nov 15 (2002).
- [60] **J. B. Peter**, Mechanisms for transitional friction and wear behavior of sliding metals. *Wear* 72, 55-66, (1981).
- [61] **R. M. Baker and G. W. Hewitt**, Brush wear in hydrogen and air. *Electric journal*, 33, 287, (1936).
- [62] **M. Amirat, H. Zaïdi et J. Frêne**, Effet de l'environnement sur le processus d'adhérence des particules d'usure sur les surfaces du contact magnétisé du couple laiton -acier. 18^{ème} Congrès Français de Mécanique Grenoble, 27-31 août (2007).
- [63] **K. Hiratsuka**, Environmental effects on the formation process of adhesive wear particles. *J. Tribology international* 28, 279-286. (1995).
- [64] **G. Bucca and A. Collina**, A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph–catenary system. *Wear* 266, 46–59, (2009).
- [65] **Y. WooPark and al**. The influence of current load on fretting of electrical contacts. *Tribology International* (2008), 10.1016 - j.triboint. 09.004, (2008).
- [66] **K. J. Chin; H. Zaidi and al**, Study of copper/steel electrical contact. Congrès Tribologie des Matériaux Organiques (actes). Journées Internationales Francophones de Tribologie, Obernai, France, pp. 199-213, (2002).

- [67] **Bouchoucha et al**, Influence of the electrical sliding speed on friction and wear processes in electrical contact copper–stainless steel. *Applied Surface Science*, 223, 330-342, (2004).
- [68] **A. Bouchoucha, Y. Mouadji, H. Zaidi**, Influence du courant électrique et sa polarité sur la nature des films d'oxydes formés à l'interface du contact électrodynamique sec tournant cuivre-acier. 19^{èmes} Journées Francophones de Tribologie, JIFT, 22 et 23 mai Poitiers, France, (2007).
- [69] **J.M. Casstevens**, Friction and wear characteristics of power metallurgy copper-graphite brushes at high sliding speeds, *Wear* 49, 169–178 (1978).
- [70] **A. Bouchoucha; C. Boubechou; H. Zaidi**, Tribological analysis of formation and rupture of oxide films in an electrical sliding contact copper-steel, 7th IMS International Conference, "Advances in Engineering Materials" 18-20 March, in American university of Sharjah, United Arab Emirates (2014).

CHAPITRE II

DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET TECHNIQUES DE MESURE

II.1. BUT DE L'ETUDE

Notre étude porte sur le comportement tribologique (frottement sec et usure) d'un pion de cuivre, d'acier ou du laiton en glissement relatif par rapport à un disque en acier ou en graphite. Le frottement est étudié à sec sans et avec passage du courant à travers le contact dans des ambiances.

Le problème consiste donc à faire passer un courant électrique à l'interface avec un minimum de dégradation des surfaces en contact. Aussi, il faut que le contact soit direct afin d'assurer une résistance électrique aussi faible que possible. Il faut toutefois savoir que le comportement tribologique dépend essentiellement [1] :

- des propriétés des matériaux combinés (mécanique, physique, microstructure, chimique...);
- des conditions expérimentales imposées (charge, vitesse, température...);
- enfin de la configuration du type de contact et l'arrangement mécanique ;

Le but primordial de notre étude est d'optimiser les conditions de fonctionnement des couples étudiés en faisant varier les paramètres mécaniques (la charge normale, le temps, la vitesse de glissement...) et électriques (intensité du courant, polarité et tension électrique...) pour augmenter la durée de service de ces couples.

II.2. PRESENTATION DU TRIBOMETRE PION-DISQUE

La machine dont on dispose est un tribomètre pion-disque. Il comprend essentiellement : un bâti, disque, pion et un moteur électrique (Fig. II.1). Les essais ont été effectués (à l'air ambiant) à des vitesses de glissement de : 0,1 à 0,5 m/s, sous des charges de : 5 à 40 N. Le test consiste à appliquer une charge normale sur le pion fixe en contact avec le disque qui, lui-même est fixé par une vis animée d'un mouvement de rotation. La force tangentielle de frottement F_t est mesurée par un capteur de force.

Cet appareil est composé d'un module de base sur lequel s'adaptent six modules spécifiques d'étude en tribologie. Le module de base est composé d'une plaque support sur laquelle est monté le moteur, la boîte de vitesse, le capteur de force et un coffret de contrôle et de commande.

La force tangentielle de frottement F_t entraîne un déplacement latéral du bras élastique supportant la tige porte-pion. Un capteur inductif enregistre la déformation élastique du bras, de laquelle est déduite la valeur de F_t . La charge normale P étant connue, la valeur du coefficient de frottement μ est calculée par le rapport de la force tangentielle et la charge normale.

Le pion utilisé est de forme cylindrique fixé dans un trou à l'aide d'une vis de blocage. Il est chargé contre un disque par des masses du poids variables. Le pion est aisément échangé par un autre échantillon, ou peut être enlevé pour permettre la mesure de la perte de masse ou du changement dimensionnel du à l'usure.

Le disque est fixé sur un support qui tourne à des vitesses de rotation variables. La transmission de la puissance du moteur électrique au disque se fait à l'aide d'un réducteur de vitesses de rapport 1/20. La force normale est transmise au support d'échantillon à l'aide des masses reposant sur l'extrémité d'un de charge.

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

Pour faire passer le courant électrique au niveau de contact, on utilise une alimentation en courant continu dont ses caractéristiques sont les suivantes :

- courant I : de 0 à 10 A
- tension V : de 0 à 30 V

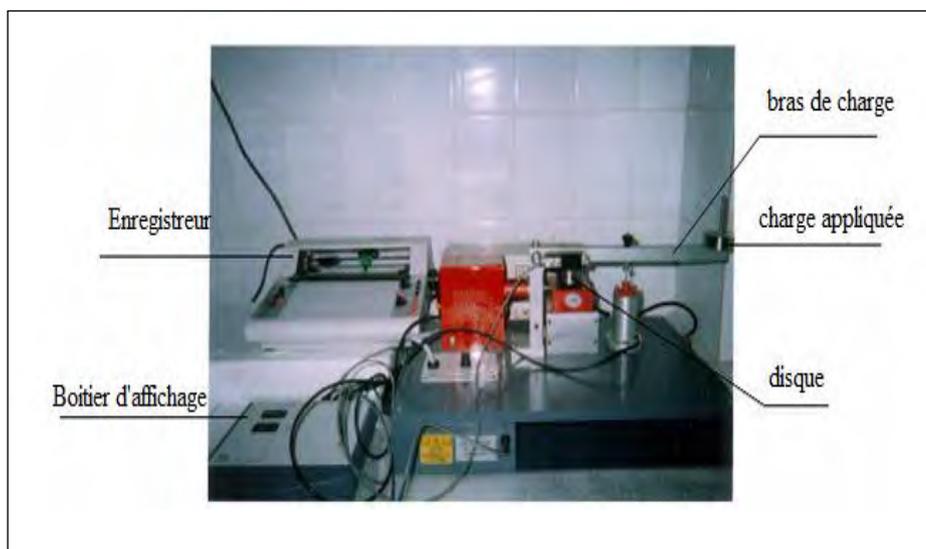


Figure II.1. Vue d'ensemble du tribomètre

II.2.1. Spécifications techniques

- vitesse de rotation du disque 10 à 224 tr/min
- vitesse linéaire équivalente 20 à 420 mm/sec.
- rayon de piste de contact est de 20 mm.
- gamme de charge sur pion est 40 N.
- dimensions du disque est 50 mm de diamètre et 10 mm d'épaisseur.
- dimension du pion est 4 mm de diamètre et 25 mm de longueur
- Jeu de poids est 1×500g, 1×250g et 2×125g.

II.2.2. Connexion électrique du tribomètre

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

II.2.3. Unité de base

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

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

A l'intérieur de l'unité de base se trouve une alimentation 12 V reliée à la prise sur la face avant de l'appareil. Celle-ci fournit la puissance nécessaire à la boîte d'affichage. L'alimentation et le régulateur de vitesse électrique du moteur à courant sont aussi situés dans l'unité de base. Un espace de rangement est disponible à l'avant de l'unité de base pour l'affichage, avec un emplacement supplémentaire pour ranger les câbles.

II.2.3. Moteur à courant continu

Sa vitesse de rotation maximale est 4000 tr/min et puissance 50 watts.

II.2.4. Capteur de vitesse du moteur

Capteur magnétique monté sur le moteur.

II.2.5. Boîtier d'affichage

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

- la force (en newton) mesuré par la cellule ;
- la vitesse en sortie du réducteur 20/1 (en tr/min) ou l'indication d'usure, par les mouvements du capteur d'usure (en mm) ;
- une prise sur le boîtier d'affichage permet une connexion pour un périphérique d'affichage externe de type enregistreur analogique.

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

- bleu est pour la force, jaune est pour l'usure et vert est commun. Les sorties analogiques sont linéaires et varient de 0 à 4 V DC ;
- 8 mm d'usure sur le capteur d'usure donneront au maximum 4 V en sortie sur la prise jaune ;
- 50 N de force sur la cellule de charge donneront au maximum 4 V sur la prise bleu.

II.2.6. Capteur d'usure

Capteur de déplacement linéaire, 8 mm de déplacement maximum.

II.2.7. Cellule

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

II.2.8. Prises de connexion

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

II.3. DIMENSIONS ET GEOMETRIES DES ELEMENTS DU COUPLE TRIBOLOGIQUE**II.3.1. Disque**

Le disque est un plateau de forme cylindrique, de diamètre 50 mm et d'une épaisseur de 12 mm, il possède un trou lamé au centre, ce dernier permet la fixation du disque à l'aide d'une vis sur le support du tribomètre (Figs. II.2 et II.3).

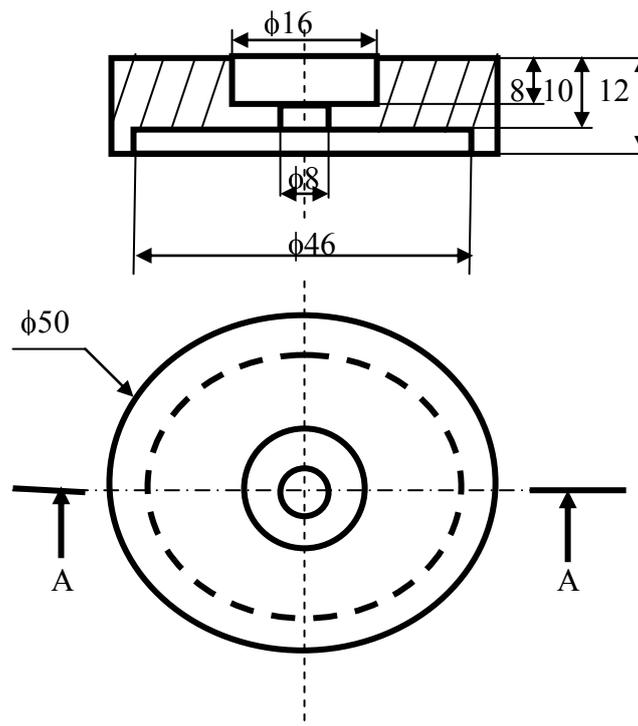


Figure II.2. Dessin de définition du disque



Figure II.3. Disque en acier 42CrMo4

II.3.2. Pion

Il s'agit d'une tige de longueur de 20 mm et de diamètre égale à 8 mm, le pion est fixé dans un trou à l'aide d'une vis de blocage, sur un bras de charge en aluminium, comme l'indique les figures II.4 et II.5.

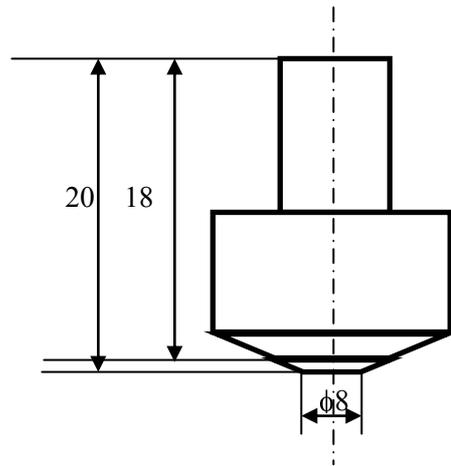


Figure II.4. Dessin de définition du pion

(a)

(b)



Figure II.5. (a) Pion en laiton et (b) en acier

II.4. PREPARATION DES ECHANTILLONS

II.4.1. Usinage des échantillons

Les échantillons ont été réalisés à partir des barres laminées. La barre de chaque type d'acier d'échantillon est découpée sous la forme et les dimensions voulues à l'aide d'une scie mécanique, puis elles ont été passées par le poste d'usinage (tournage pour le disque et le pion) afin d'avoir les échantillons comme un produit fini selon les dimensions et les critères géométriques demandés.

II.4.2. Pion

La surface d'essai du pion est hémisphérique comme indiquée la figure II.4. Il est chargé contre un disque tournant par les masses du contre poids variables (Fig. II.6). Le pion

est aisément échangé pour un pion d'un matériel différent, ou il peut être enlevé pour permettre la mesure de la perte de poids ou du changement dimensionnel dû à l'usure.

II.4.3. Disque

Le disque est monté sur l'axe de rendement du cube bas en boîte de vitesse de module, avec la verticale d'axe. Il est fabriqué avec les mi-plats et parallèles pour s'assurer qu'une surface égale de frottement est maintenue (Fig. II.6).

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



Figure II.6. Pion sur disque, tribomètre en fonctionnement [2]

II.5. MOYENS DE MESURE

II.5.1. La charge normale

Une charge normale P est appliquée à l'extrémité droite du bras, à l'aide des masses (contre poids) (Fig. II.8). On peut considérer le bras du tribomètre où on porte la charge normale comme une poutre rigide soumise à des charges concentrées.

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

$$\Sigma F_{\text{ext}} = 0 \tag{II.1}$$

$$\Sigma M (F_{\text{ext}}) / A = 0$$

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

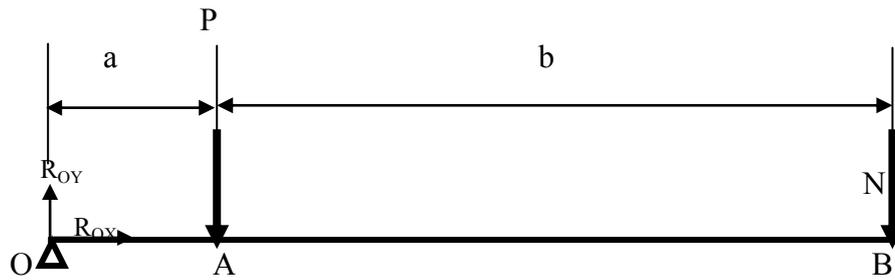


Figure II.7. Système de charges appliquées sur le bras

- Projection suivant l'axe OX :

$$R_{ox} = 0 \tag{II.2}$$

- Projection suivant l'axe OY :

$$R_{oy} - P - N = 0 \tag{II.3}$$

$$\Sigma M (F_{ext})/A = 0$$

$$N \cdot b + R_{oy} \cdot a = 0 \tag{II.4}$$

D'après l'équation (II.4) on trouve que : $R_{oy} = F \cdot b/a$

On remplace R_{oy} dans l'équation (2) et on tire P : $P = N \cdot b/a - N = N \cdot ((b-a)/a)$

Avec P : La charge appliquée sur le pion [N]

$$a = 8,5 \text{ cm}$$

$$b = 22,5 \text{ cm}$$

N : La charge appliquée à l'extrémité du bras $N = m \cdot g$ [N].

$$\text{Si } m = 125 \text{ g} \Rightarrow P = 125 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot (22,5 - 8,5) / 8,5$$

$$\text{Si } m = 125 \text{ g} \Rightarrow P = 5 \text{ N}$$

$$\text{Si } m = 250 \text{ g} \Rightarrow P = 10 \text{ N}$$

$$\text{Si } m = 375 \text{ g} \Rightarrow P = 15 \text{ N}$$

$$\text{Si } m = 500 \text{ g} \Rightarrow P = 20 \text{ N}$$

$$\text{Si } m = 625 \text{ g} \Rightarrow P = 25 \text{ N}$$

$$\text{Si } m = 750 \text{ g} \Rightarrow P = 30 \text{ N}$$

$$\text{Si } m = 875 \text{ g} \Rightarrow P = 35 \text{ N}$$

$$\text{Si } m = 1000 \text{ g} \Rightarrow P = 40 \text{ N}$$



Figure II.8. Les masses (contre poids)

II.5.2. Vitesse linéaire de glissement

La stabilité de vitesse de rotation du moteur entraînant le disque est assurée par l'emploi d'un moteur à courant continu muni d'un variateur de fréquence, qui permet d'avoir une gamme de vitesses de rotation allant de 10 tr/mn à 224 tr/mn. Pour une piste de rayon r , choisi sur le disque, la vitesse linéaire V est donnée par la relation :

$$V = \omega.r = 2\pi.r.n = \frac{\pi}{30}r.n \text{ [m/s]} \quad (\text{II.5})$$

II.5.3. Force de frottement

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

II.5.4. Mesure du coefficient de frottement

Pour chaque essai on fait varier un paramètre, les autres étant fixés et on mesure le coefficient de frottement. La charge normale appliquée au pion étant connue; Le coefficient de frottement est égal au ratio effort tangentiel mesuré sur effort normal appliqué :

$$\mu = \frac{F_t}{P} \quad (\text{II.6})$$

II.5.5. Mesure de l'usure du pion

L'usure des échantillons (laiton et acier) est évaluée par la mesure de la perte en masse. Avant et après chaque essai. Le pion est bien nettoyé puis pesé à l'aide d'une microbalance sensible de précision 10^{-4} mg. Après l'essai, il est nettoyé à nouveau est pesé. La différence entre les deux pesées donne directement l'usure W qu'on a exprimée dans notre texte en gramme :

$$W = \Delta m = m_i - m_f \text{ [g]} \quad (\text{II.7})$$

m_i : Masse initiale du pion
 m_f : Masse finale du pion



Figure II.9. Microbalance de précision 10^{-5} g

II.5.6. La durée de l'essai d'usure

Chaque essai dure environ 30 minutes.

II.5.7. Le polissage

Le polissage est obtenu manuellement, vise à rendre les surfaces uniformes. Il consiste à abraser la surface sous une charge constante, à l'aide du papier verre de grade 1200, montés sur des tourets de polissage dont la vitesse est de 300 tr/min, équipés d'un système d'arrosage à l'eau courante pour éviter l'échauffement des échantillons. La diminution de la taille des grains d'abrasif d'un papier à l'autre permet d'affiner progressivement l'état de polissage et de diminuer la rugosité moyenne, la surface à polir se couvre de rayures de plus en plus fines.

II.5.8. Courbe d'étalonnage

L'étalonnage qu'on a fait du capteur de force utilisé, dans le dispositif expérimental, permet d'accéder aux relations entre les différences de potentiel mesurées et les forces qu'elles expriment. Les résultats sont représentés sur la figure II.10.

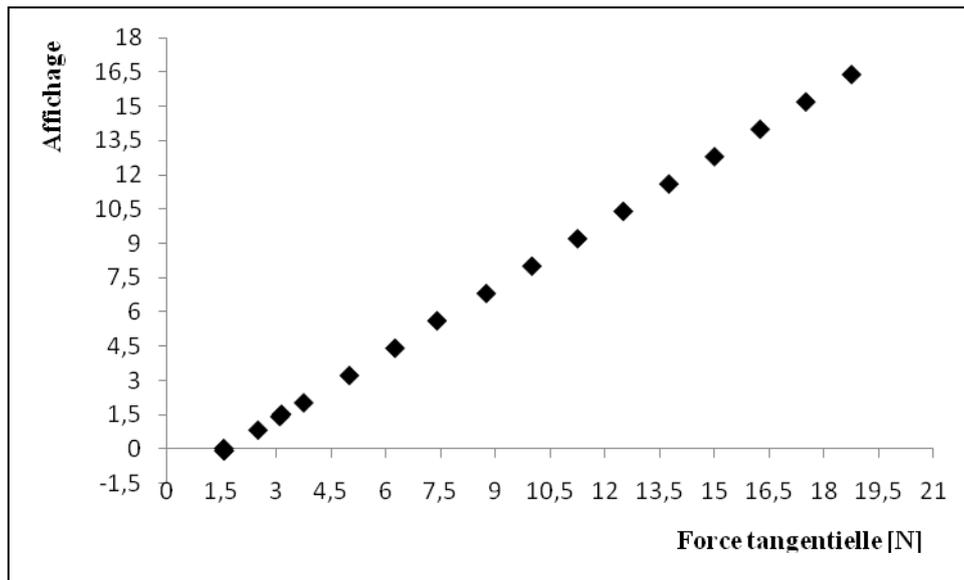


Figure II.10. Courbe d'étalonnage

II.5.9. Contact tournant à mercure

L'alimentation électrique du disque en mouvement a été résolue par l'emploi d'un contact à mercure qui présente une grande fiabilité. Le dispositif est représenté sur la figure II.11 : dans la tête de vis qui fixe le disque à l'axe du moteur, on a percé un trou borgne de 6 mm de diamètre et 12 mm de profondeur. Ce trou est rempli de mercure dans lequel est plongé le fil qui conduit le courant I . Cette alimentation électrique entraîne la circulation d'un courant continu et unidirectionnel du pion cathodique au disque anodique et du pion anodique au disque cathodique (Figs. II.11 et 12). Ce générateur de courant permet de délivrer une intensité constante dans le circuit électrique pouvant atteindre au maximum 10 A.

Des pièces en plastique sont interposées entre le disque en acier 42CrMo4 et le support ainsi qu'entre le pion et le bras pour permettre une isolation électrique du contact avec le système environnant.

Un ampèremètre et un voltmètre permettent de mesurer à chaque instant les valeurs de courant et d'intensité pendant l'essai de frottement permettant un calcul post-essai de la résistance électrique.

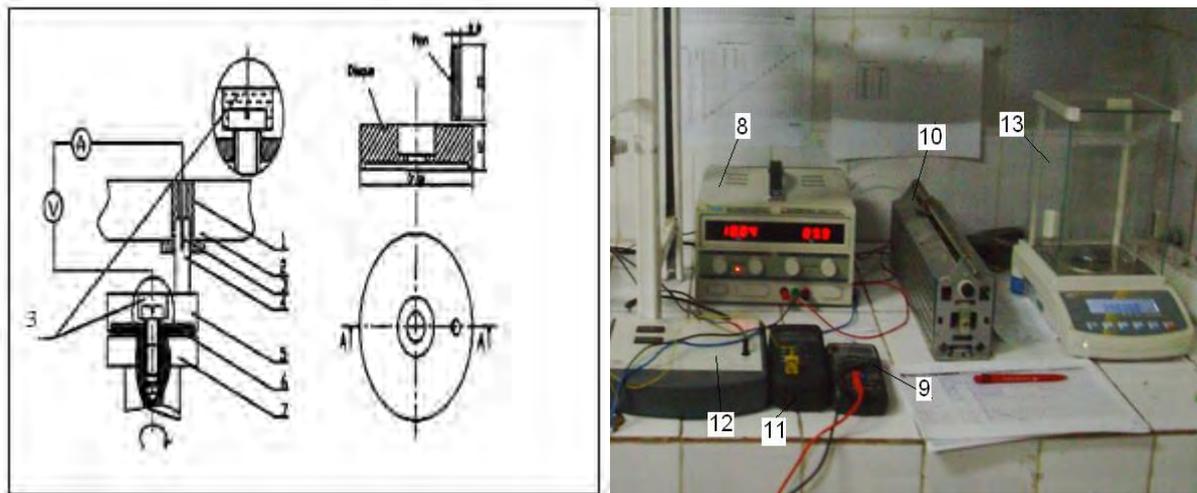


Figure II.11. Schéma illustrant le principe de contact à mercure 1 porte-pion en téflon 2 bras 3 tête de la vis contient Hg 4 pion 5 disque 6 disque isolant en téflon 7 arbre du réducteur 8 alimentation en courant continu 9 voltmètre 10 rhéostat 11 thermocouple 12 capteur piézo-électrique 13 balance de précision.

II.6. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

II.6.1. Matériaux des pions (CuZn40Pb3 et A60)

II.6.1.1. Compositions chimiques

	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Cu	Zn	Pb
St 60 - A60	0,40	0,15	0,55	0,070	0,050	-	-	-	-	-
CuZn40Pb3	-	-	-	-	-	-	-	57	40	3

II.6.1.2. Caractéristiques mécaniques [3]

	E [N/mm ²]	R [N/mm ²]	R _m [N/mm ²]	A%	HB
A60	205000	355	605	22	190
CuZn40Pb3	96000	180	460	15	120

II.6.1.3. Propriétés physiques

	ρ [Kg/m ³]	C_p [J/Kg ^o c]	λ [W/m. ^o c]	γ [μ . Ω .m]
CuZn40Pb3	$8,5 \cdot 10^3$	377	121	0,062
E335 A60	7800	450	40	0,26

II.6.1.4. Laiton CuZn40Pb3

Ce sont des alliages à base de cuivre et de zinc, contenant entre 5 et 45 % de ce dernier. On peut trouver d'autres éléments d'addition qui visent à lui conférer certaines propriétés particulières. L'élément d'addition le plus courant est le plomb. Le laiton est le plus fabriqué et le plus utilisé des alliages de cuivre grâce à la bonne conductivité électrique. Ses nombreuses qualités de base sont à l'origine de la grande étendue de ses applications. De tous les alliages de cuivre, les laitons sont ceux qui présentent la plus grande facilité d'emploi. Ils peuvent être utilisés sous toutes les formes de demi-produits, et leur mise en œuvre peut être opérée par tous les procédés : moulage, matriçage, décolletage, emboutissage, usinage, etc...

Le laiton est par excellence l'alliage du décolletage, c'est-à-dire de l'usinage de pièces sur tour automatique, et du matriçage, qui consiste en une déformation à chaud d'un lopin de métal par pression instantanée dans une matrice.

Les laitons au plomb contiennent environ 40 % de zinc et 1 à 3 % de plomb. Les CuZn40Pb3 présentent une aptitude à l'usinage supérieure à celle de tous les autres alliages industriels. Le plomb, pratiquement insoluble dans les laitons; est disséminé en fins globules qui provoquent une bonne fragmentation des copeaux dans les opérations de décolletage ; il intervient également comme lubrifiant, en raison de son bas point de fusion. Dans les opérations de matriçage, le laiton au plomb subit des déformations plastiques parfois très complexes, qui s'opèrent facilement grâce à son excellente malléabilité à chaud.

- température de fusion du zinc est égale à 419°C

- température de fusion du plomb est de 327°C

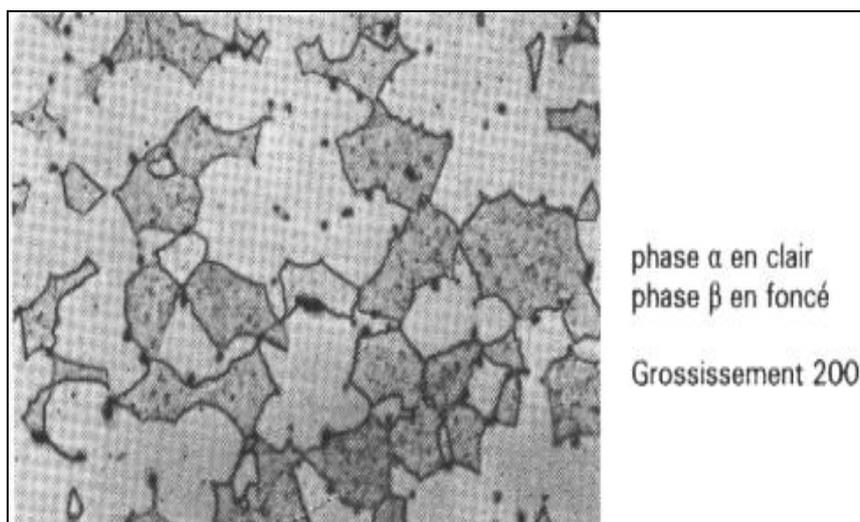


Figure II.12. Micrographie d'un laiton CuZn40Pb3 [4]

II.6.1.5. Acier A60

Ces aciers sont définis principalement par leurs propriétés mécaniques. Leur résistance mécanique est de l'ordre de 500 MPa pour la rupture et de 350 MPa pour la limite élastique, ils sont ductiles puisque leur teneur en carbone est faible (elle ne dépasse pas 0,2 %), l'allongement relatif avant rupture est de l'ordre de 25 %. Ces aciers sont produits sous la forme de profilés (produits longs) ou sous la forme de tôles (produits plats) en fonction de leur utilisation. Les produits longs comprennent les poutrelles, les profilés de sections diverses, les fers marchands, les tubes, les fils, les câbles et les rails.

Les produits plats comprennent les tôles fortes, les plaques (épaisseurs supérieure à 5 mm), les tôles minces pour l'emboutissage.

II.6.2. Matériau du disque (42CrMo4)

II.6.2.1. Compositions chimiques

	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%
42CrMo4	0,38 - 0,45	0,015 - 0,4	0,5 - 0,8	0,035	0,035	0,90 - 1,2	0,15 - 0,3

II.6.2.2. Caractéristiques mécaniques [5]

	R [Mpa]	HB	E _e [Mpa]	A %
42CrMo4	Min 650	270-330	210000	min12

II.6.2.3. Propriétés physiques

	ρ [Kg/m ³]	C _p [J/Kg°C]	λ [W/m.°c]	γ [$\mu\Omega.m$]
42CrMo4	7, 850.10 ³	480	44	24.10 ⁻²

II.7. TRIBOMETRE MODIFIE : FIL TENDU-DISQUE A SECTEURS

II.7.1. Principe

La machine dont on dispose est un tribomètre classique du type pion-disque. Pour étudier le frottement des couples tribologiques cuivre-acier et cuivre-graphite, on a remplacé le système pion par un dispositif qui permet de tendre aisément le fil. Le tribomètre comprend essentiellement : un bâti, un plateau et un bras.

Le bâti est une masse métallique en forme de T qui pèse environ 250 Kg, ce qui rend le tribomètre relativement peu sensible aux vibrations extérieures qui risquent d'influencer les phénomènes à l'interface.

Le plateau est une partie intermédiaire entre le bâti et le bras. Ce dernier est lié rigidement au plateau qui, par action sur deux volants effectue des mouvements (grâce à des glissières) selon les deux axes C_X et C_Y .

Le bras solidaire du plateau, il effectue des mouvements de rotation autour de l'axe horizontal d'une part et autour de l'axe vertical d'autre part. A son extrémité antérieure se trouve fixée le support du fil. A son extrémité postérieure est fixée une vis qui exerce une force P sur une lame de flexion L solidaire du plateau. Grâce à deux mouvements, le bras constitue l'organe essentiel du tribomètre [6].

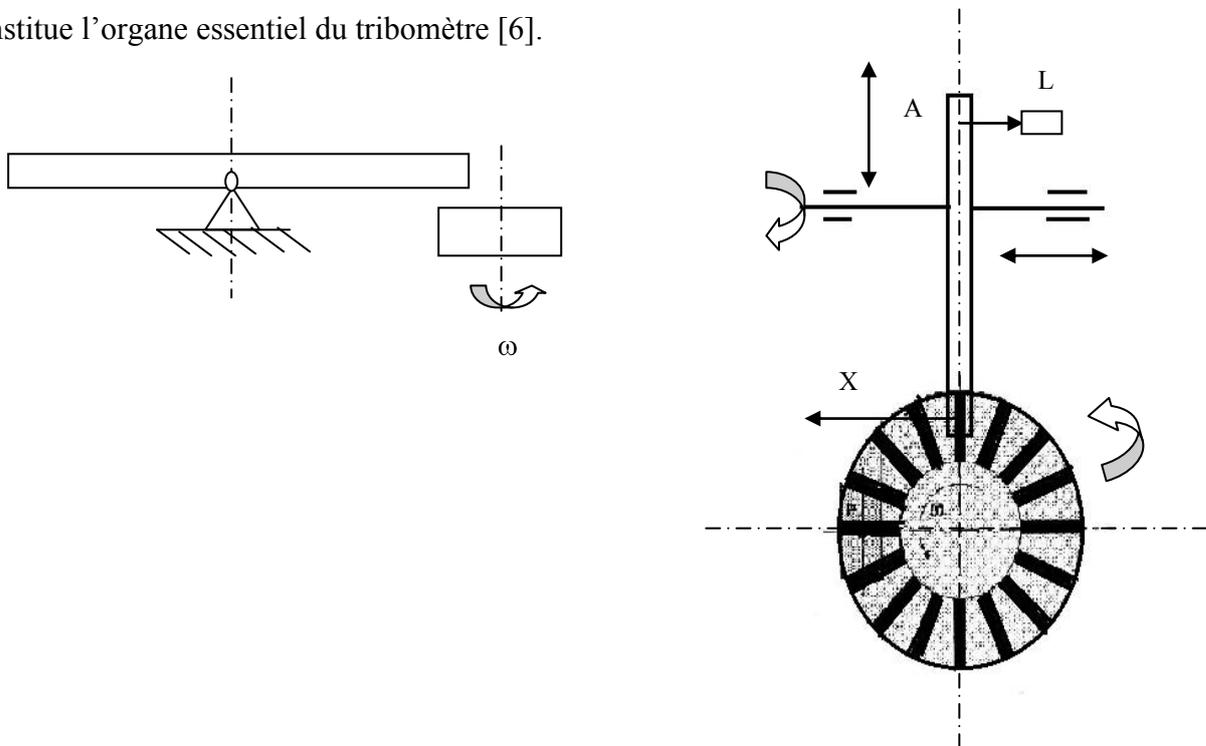


Figure II.14. Position d'équilibre du bras par rapport aux axes C_X et C_Y

II.7.2. Moteur d'entraînement

Un moteur à courant continu stabilisé en vitesse, fixé dans le bâti et dont l'axe vertical émergé devant le plateau, permet d'entraîner le disque.

II.7. 3. Fonctionnement

II.7.3.1. Positionnement des frotteurs

Grâce aux mouvements du plateau selon les directions C_X et C_Y , on peut facilement choisir le rayon r de la piste de frottement sur le disque. Ce dernier, horizontal, est solidaire d'un axe de rotation vertical accouplé au moteur. La mobilité de cet axe dans le sens vertical permet d'obtenir l'horizontalité du bras, sur lequel est collé un niveau à bulle (Fig. II.15). Ce réglage est fait pour chaque expérience. De plus, pour que les mesures soient correctes, il faut que:

- les points 0, C et D soient alignés.
- l'axe longitudinal C_Y soit orthogonal à la vitesse linéaire portée par C_X .

1 Disque 2 Niveau à bulle
3 Contre poids 4 Bras

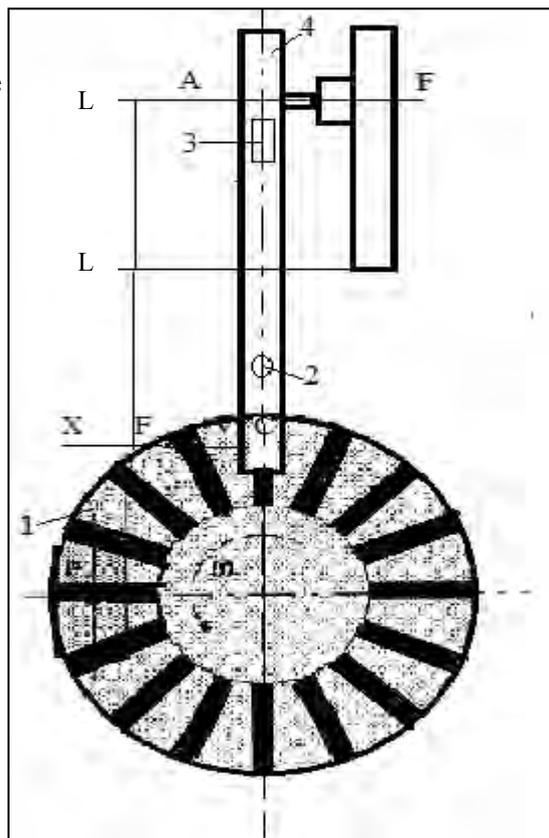
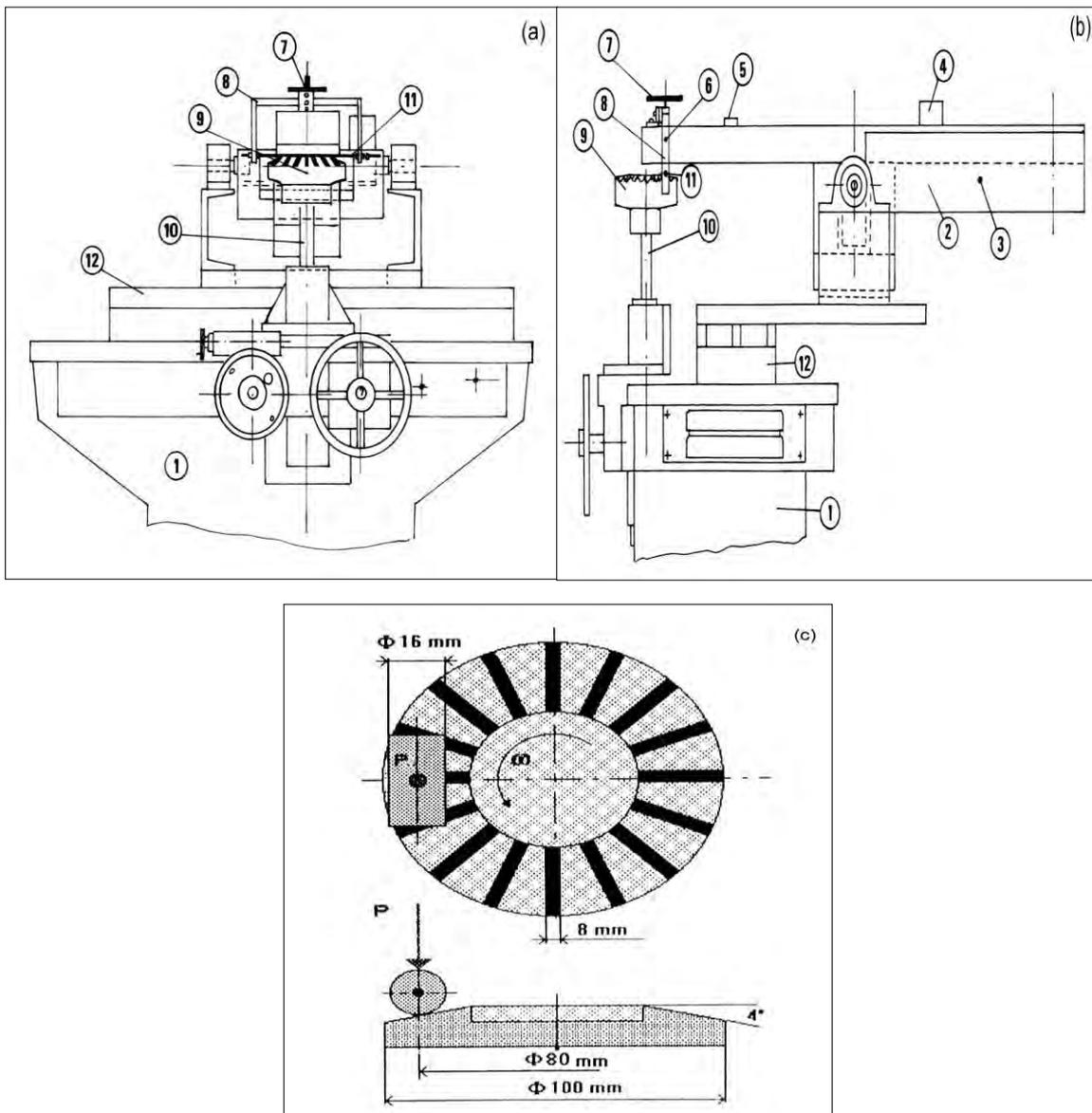


Figure II.15. Le moteur étant en marche, dès qu'on met une charge en C, les frotteurs entrent en contact et un couple est exercé sur le bras.



1 Bâti, 2 Bras du tribomètre, 3 Butée, 4 Contrepoids, 5 Niveau à bulle, 6 Capteur de force, 7 Charge normale P, 8 Support-câble, 9 Disque, 10 Axe du moteur, 11 Câble, 12 Plateau.

Figure II. 16. (a) Représentation schématique d'une vue de face du tribomètre en fonctionnement (b) Schématisation en vue latérale de la machine, le câble étant en contact avec le disque, (c) Contact tournant câble-disque

II.7.3.2. Excitation du bras

On anime alors le disque d'un mouvement de rotation de vitesse angulaire ω et on met en contact le fil avec le disque à l'aide d'une charge P appliquée au point C. Sous l'effet des

efforts simultanés normal et tangentiel créent à l'interface, un couple est exercé sur le bras mobile autour de l'axe vertical en O (Fig. II.17).

II.7.4. Description du système de tension mécanique du fil

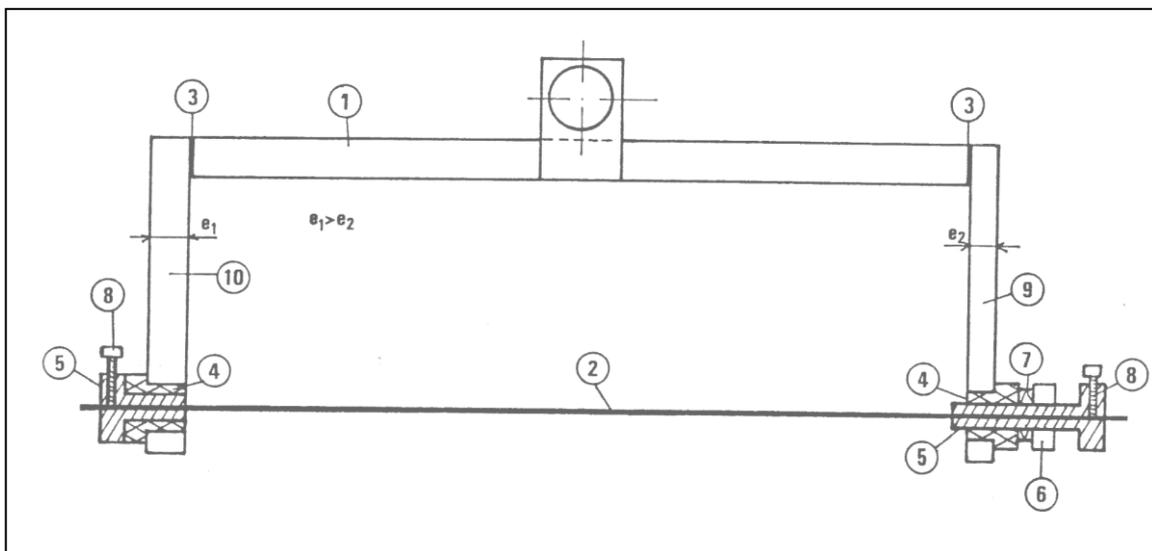
Ce montage comprend deux parties, le support-fil et le mécanisme vis-écrou.

II.7.4.1. Support-fil

On a remplacé le pion par un support en forme de U (Fig. II.17). Il est fixé rigidement sur le bras au point C dans une position perpendiculaire à l'axe longitudinal AY.

II.7.4.2. Mécanisme vis-écrou

Le fil est mis en place selon le schéma ci-dessous. Son blocage est assuré à l'aide des vis oreilles 8. Le serrage de l'écrou 6 permet d'exercer sur le fil un effort de traction par déformation élastique de la lame 9. La barre 10 d'épaisseur grande devant celle de la lame 9 n'est pratiquement pas déformée par la tension exercée sur le fil. Les bagues plastiques 4 assurent l'isolement électrique du fil par rapport à son support.



1 9 10 Ensemble support-fil, 2 Echantillon, 3 Soudure T.I.G, 4 Rondelle isolante, 5 Blocage fil, 6 Ecrou de tension du fil, 7 Rondelle éventail, 8 Vis de serrage, 9 lame, 10 lame support rigide.

Figure II. 17. Schéma d'ensemble du dispositif de montage et d'extension du fil

II.7.5. Moyens de mesure

II.7.5.1. Charge normale

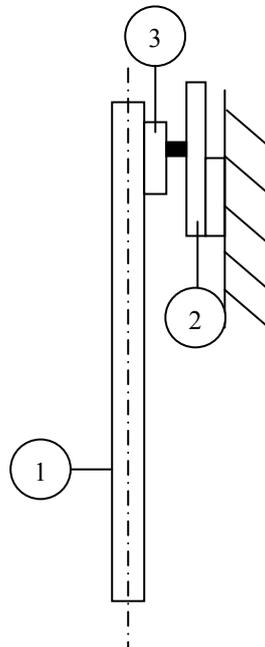
Une charge normale P est appliquée à l'extrémité du bras au dessus du point de contact C , à l'aide des masses d'une boîte de mesure.

II.7.5.2. Vitesse de rotation

La stabilité de vitesse de rotation du moteur entraînant le disque est assurée par l'emploi d'un moteur à courant continu muni d'une régulation de vitesse par dynamo tachymétrique. Pour une piste de rayon r , choisie sur le disque, la vitesse linéaire V est donnée par la relation : $V = r.\omega = 2.\pi.r.N = \pi.r.N/30$ [m/s]

II.7.5.3. Force de frottement

Au point A (Fig. II. 15), on a placé un capteur de force. Sous l'effet combiné de la charge normale et l'effort tangentiel, un couple est exercé sur le bras. Dans ces conditions, la lame de transmission excite le capteur (lame de flexion) connecté à un pont de jauge, qui affiche la valeur convertie de F en millivolt (Fig. II. 18). Ce pont de jauge possède une sortie analogique, qui permet l'enregistrement de la force de frottement F en fonction du temps.



1 Bras 2 lame de flexion 3 lame de transmission

Figure II. 18. L'ensemble bras, lame de flexion et lame de transmission

II.7.5.4. Alimentation électrique

Comme l'objectif principal de cette partie est d'étudier l'effet du courant électrique sur le frottement sec des couples glissants cuivre-acier inoxydable et cuivre-graphite, on a utilisé une alimentation en courant continu, dont ses caractéristiques sont les suivantes :

- courant I : 0 à 85 A
- tension V : 0 à 7,5 V

Cet appareil fonctionne à courant constant ou à tension constante.

Le principe du contact tournant à mercure et le passage du courant électrique des différents couples tribologiques est le même que du tribomètre précédent (Fig. II. 11).

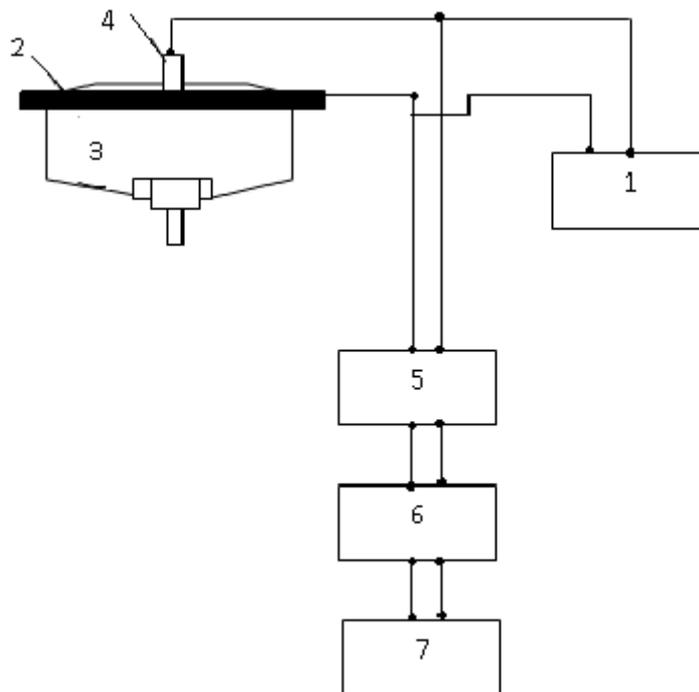


Figure II. 19. Schéma électrique de mesure de R_c

II.8. MATERIAUX

II.8.1. Compositions chimiques

	C%	Cr%	Ni%	Cu%
304L	0,03 max	18	10	-
Cu	-	-	-	99,99

II.8.2. Caractéristiques mécaniques

	E [Gpa]	R [Mpa]	R _m [Mpa]	A%	H [Mpa]	ι [Mpa]	R _f [Mpa]
304L	203	241	621	45	1600	-	-
Graphite // au plan basal	10250	-	-	-	-	350	10 à 60
Graphite ⊥ au plan basal	3560	-	-	-	-	4220	10 à 60
Cu	115	70	240	50	400	-	-

II.8.3. Propriétés physiques

	ρ [Kg/m ³]	C _p [J/Kg°C]	λ [W/m.°c]	γ[μ.Ω.m]
304L	7,9. 10 ³	50,16	14,9	70. 10 ⁻²
Graphite polycristallins	2,26. 10 ³	754	124 -168	(8-13). 10 ⁻²
Cu	8940	343	384	0,017

II.8.4. Cuivre Cu

Les principales qualités du cuivre sont : une très bonne conductibilité électrique et thermique, une résistance convenable à l'usure. Ils sont cependant sensibles à la corrosion et sont chers. Ses domaines d'application exploitent directement ces propriétés puisqu'on utilise presque la moitié de la production mondiale de cuivre pour du matériel électrique (conducteur, transformateur, moteurs électriques...). Le reste de la production est principalement utilisé pour les tuyaux à eau, la plomberie, les pompes et les vannes... Associé à l'étain ou à l'aluminium, il possède de bonnes propriétés de surface (résistance à l'usure et au frottement), on l'utilise comme palier de guidage, comme pignon...etc.

II.8.5. L'acier 304L

Sont des alliages métalliques à base de fer (alliage Fer-carbone) qui doivent contenir au moins 10,5 % de chrome et des éléments d'alliage comme le carbone, le nickel...etc. Selon le pourcentage de ces éléments la structure d'acier en condition d'emploi sera martensitique, austénitique ou ferritique. Les avantages que représente pour le préconisateur

l'utilisation de l'acier inoxydable comprennent: Excellente résistance à la corrosion, caractéristiques mécaniques et ductilité élevées, amagnétisme, excellentes caractéristiques à basses et hautes températures, bénéfiques sur les coûts du cycle de vie des structures et traitements de surfaces esthétiques.

La prise en compte du cycle de vie dans le coût d'un projet de construction est désormais une méthode reconnue pour établir le coût réel des systèmes constructifs. L'acier inoxydable ne nécessitant aucune maintenance dans le cycle de vie de la structure, aucune mesure ne doit être prise en compte pour la réparation ou la réhabilitation de l'ouvrage.

Alors que la tendance vers une qualité de prescription plus élevée et une durée de vie des structures plus étendue se confirme, l'acier inoxydable offrira des solutions économiques à long terme aux problèmes rencontrés par les préconisateurs.

II.9. LES ANALYSES MICROSCOPIQUES

II.9.1. Analyse par Microscopie Electronique à Balayage

Après chaque test, on a procédé à l'analyse des échantillons (pions) en acier, cuivre et laiton par Microscopie Electronique à Balayage (MEB). Cette analyse permet de décrire les aspects des échantillons tels que la topographie, la cristallographie et les propriétés physicochimiques des matériaux.

Un autre intérêt majeur de cette analyse réside dans une fonction de la Spectroscopie à Energie Dispersive (EDS). Le spectre obtenu dans une zone sélectionnée d'un échantillon permet d'interpréter les analyses quantitatives. Ayant recours à un traitement informatique, on peut savoir la teneur et la répartition des éléments chimiques correspondant dans cette zone.

II.9.2. Analyse par Microscopie Optique

L'état de surface des pistes d'usure des pions ont été observées par un Microscope optique. Le Microscope optique utilisé dans cette thèse se trouve au laboratoire de mécanique. Cet appareil peut faire des agrandissements allant de 100 à 200.



Figure II.20. Microscope optique

II.9.3. Analyse par profilomètre numérique et 3D (AltiSurf 500)

Les pistes d'usure des pions avant et après frottement sont analysées par un profilomètre numérique et 3D AltiSurf 500 (fig. II.21). Quelques résultats caractéristiques obtenus à l'aide de cet appareil sur des surfaces du pion des différents couples sans passage et avec passage du courant électrique.

Le Altisurf 500 est un appareil multi-capteurs créé pour lire avec précision les surfaces des composants. Il mesure plusieurs profils, qui, automatiquement mis ensemble, permettent la reconstruction de la morphologie de l'échantillon. Ensuite, un logiciel de post-traitement permet d'appliquer des paramètres d'analyse tels que rugosité, la tribologie, les formes et les dimensions ainsi que les phénomènes topographiques.

Par exemple, le Altisurf 500 mesure de planéité, les états de surface, hauteur de marche, des affleurements...

Le Altisurf 500 peut mesurer avec ou sans contact avec le choix de 5 différents haut-capteurs Altiprobe: lumière blanche, laser, caméra vidéo CCD, capteur mécanique et micro-d'œuvre capteur.

Le capteur mesure la hauteur choisie d'un seul point un moment donné, tandis que les tables coulissantes pour déplacer l'objet être étudiés afin de numériser ou de tracer son domaine.

Les trajets de mesure sont définis sur la caméra vidéo (profils de surface), la machine se déplace automatiquement par compensation à la place assignée et le mesurer avec l' sonde sélectionnée...

II.9.3.1. Spécificités

- ses dimensions 100 x 100 x 100 mm
- ses 2 sondes embarquées indexées, en optique confocal chromatique
- une caméra pour la programmation des zones de mesure

II.9.3.2. Caractéristiques maximales de mesurage

- profondeur de champ utile : 300 μm
- Distance de travail : 11 mm
- Résolution axiale : 12 nm
- Résolution latérale : 1,55 μm

II.9.3.3. Applications

- **métrologie dimensionnelle**

Etude de planéité, saut de marche, états de surface...

- **tribologique**

Etude de sillon de frottement (Fig. II. 22), des surfaces antagonistes ...

- **métallographie–corrosion**

Etude de défaut sur substrat métallique, de développement de corrosion



Figure II.21. Profilomètre numérique (AltiSurf 500)

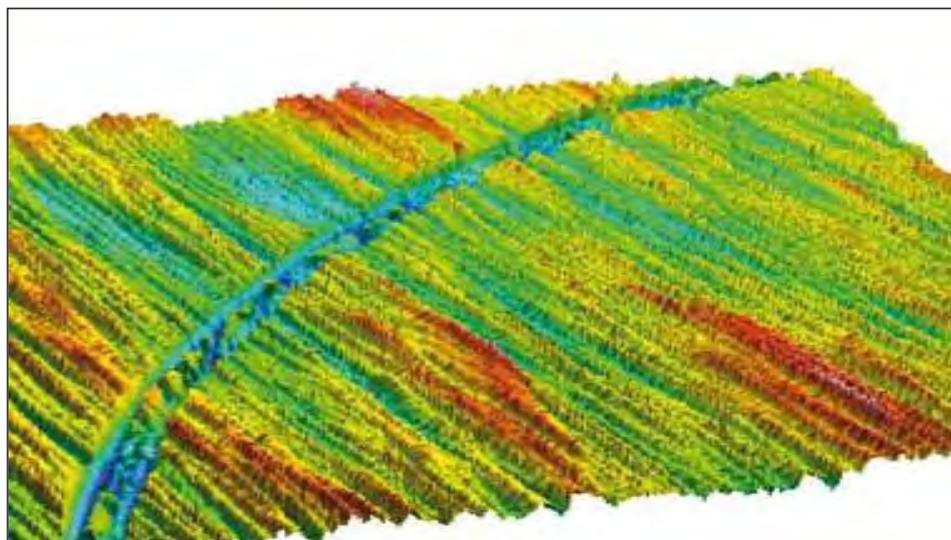


Figure II.22. Analyse topographique (Sillon d'usure après frottement)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Senouci, H. Zaidi, J. Frene, A. Bouchoucha, D. Paulmier**, Damage of surfaces in Sliding electrical contact copper/steel. *Applied Surface Science* 114-145, 287-291, (1999).
- [2] **W. Caia, J. Mabon and P. Bellona**, *Wear* 267, 485–494, (2009).
- [3] **D. Gay et J. Gambelin**, *Dimensionnement des structures*, édition Hermès (1999).
- [4] **D. Arnaud**, *Traité Matériaux métalliques ; Propriétés du cuivre et de ses alliages ; Techniques de l'Ingénieur*, 50 pages, Avril (2000).
- [5] **J. Barralis, G. Maeder**, *Métallurgie, élaboration, structures-propriétés, normalisation, collection, Les précis AFNOR/Nathan*, (ISBN 978-2-09-179582-9), p. 102, (2005).
- [6] **A. Bouchoucha** ; *Contribution à l'étude du comportement en frottement et usure du cuivre dans un contact dynamique cuivre-acier traversé par un courant électrique. Thèse de doctorat, spécialité : Mécanique, Institut national polytechnique de Lorraine* (1988).

CHAPITRE III

EFFET DE LA GEOMETRIE DE CONTACT SUR LE FROTTEMENT SEC DU COUPLE GLISSANT CUIVRE-ACIER

III.1. INTRODUCTION

Le comportement en frottement sec du couple cuivre-acier est étudié en fonction des paramètres mécaniques (charge, vitesse et temps), électriques (intensité et polarité) et de la géométrie de l'élément frottant contre le disque (pion ou câble) dans une ambiance atmosphérique. Pour ce faire, un tribomètre classique pion sur disque a été modifié en contact câble-disque.

L'objet de ce chapitre est de mettre en évidence, l'effet de la géométrie de contact, des paramètres mécaniques et électriques sur le comportement en frottement sec et en usure d'un contact électrique glissant câble tendu-disque et pion-disque.

Les résultats expérimentaux montrent que ces paramètres ont un effet plus ou moins significatif sur le frottement. En effet, la vitesse et le courant électrique ont une influence significative sur le frottement, particulièrement aux valeurs élevées de ces deux paramètres. En revanche, la charge normale a un effet négligeable sur le coefficient de frottement. La discussion des résultats obtenus repose essentiellement, sur des observations aux microscopes électroniques à balayage et optique et sur des phénomènes interfaciaux résultants du processus de frottement.

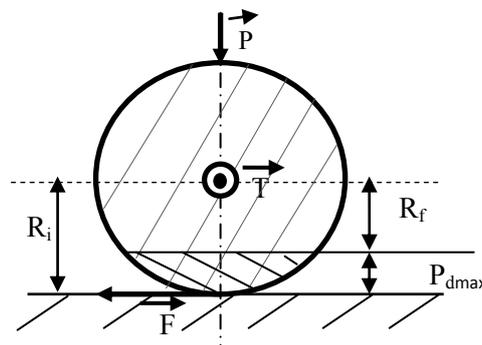
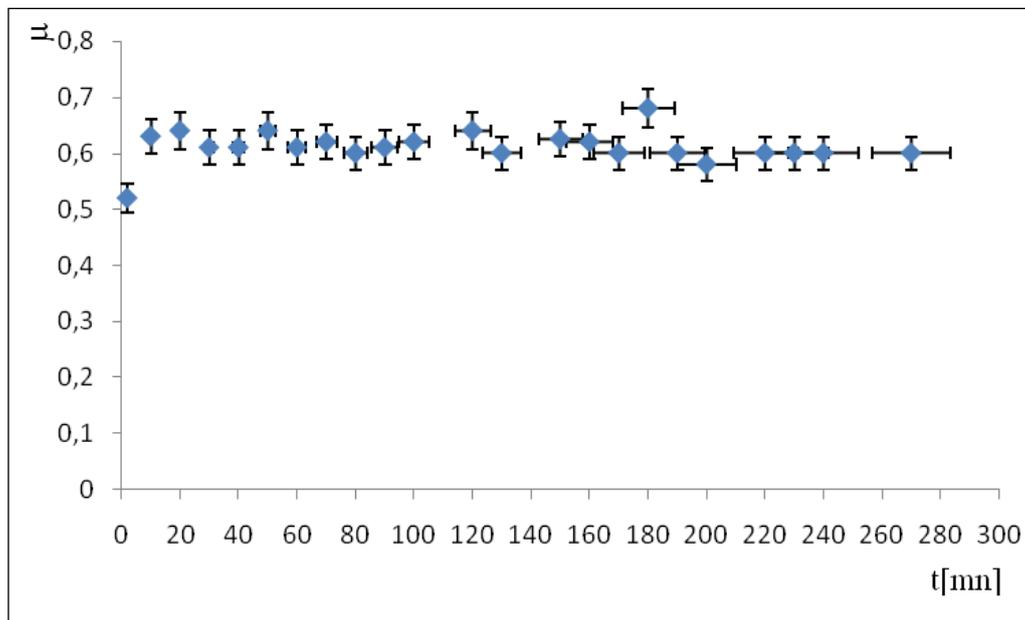


Figure III.1. Section transversale du câble

III.2. ETUDE DU COMPORTEMENT EN FROTTEMENT SEC ET USURE D'UN CONTACT ELECTRIQUE GLISSANT CABLE TENDU-DISQUE

III.2.1. Variation du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps

La figure III.2 montre que le coefficient de frottement est stable durant toute la période de fonctionnement et est égale à 0,60. Les fluctuations sont liées au transfert métallique du cuivre vers la surface du disque. Le câble ayant une forme cylindrique, la charge normale appliquée est exercée au niveau du contact et est répartie sur une ligne. Durant le frottement, le câble perd progressivement sa matière. Ceci est traduit par une augmentation de la surface apparente du contact câble-disque.



**Figure III.2. Variation du coefficient de frottement μ en fonction du temps
($P = 10 \text{ N}$, $I = 0 \text{ A}$ et $V = 1,18 \text{ m/s}$).**

III.2.2. Variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement

Cette figure illustre l'évolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement. Sur la figure III.3, on constate trois zones distinctes :

- zone I : μ évolue progressivement de 0,45 jusqu'à une valeur maximale de 0,60.
- zone II : μ diminue sensiblement quand la vitesse augmente, pour atteindre une valeur limite de l'ordre de 0,43.
- zone III : μ se stabilise à une valeur de 0,35.

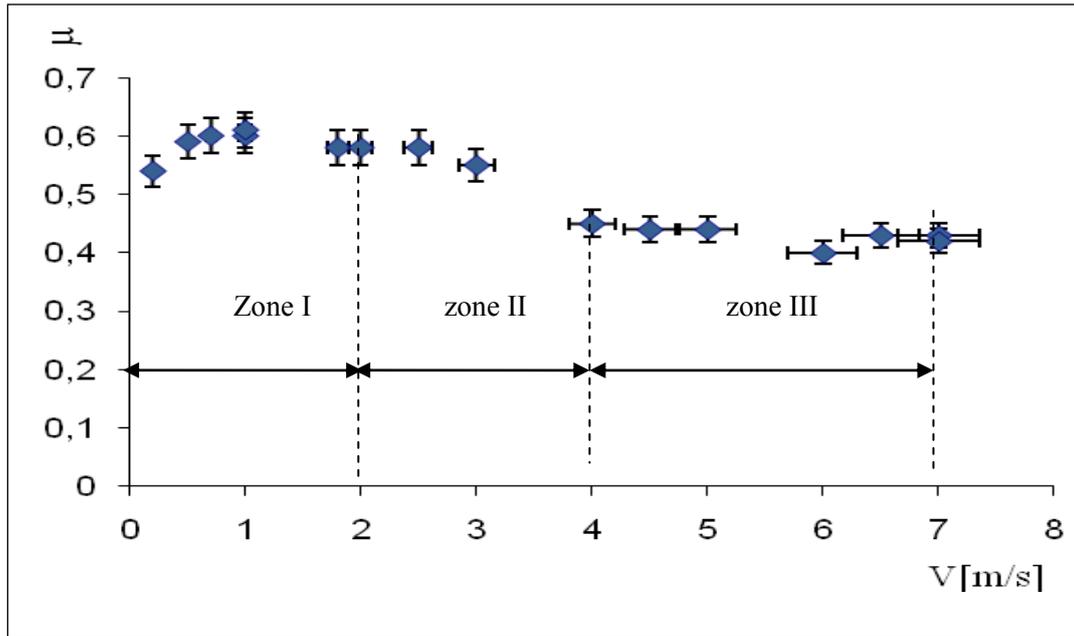


Figure III.3. Variation du coefficient de frottement μ en fonction de la vitesse ($P = 10 \text{ N}$, $I = 0 \text{ A}$ et $t = 60 \text{ mn}$).

III.2.3. Variation du coefficient de frottement en fonction de la charge normale

La figure III.4 présente l'évolution du coefficient de frottement en fonction de la charge normale. En examinant cette figure, la courbe montre une dépendance quasi-linéaire en fonction de la charge, ce qui conduit à un coefficient de frottement moyen sensiblement constant ($\mu \sim 0,6$).

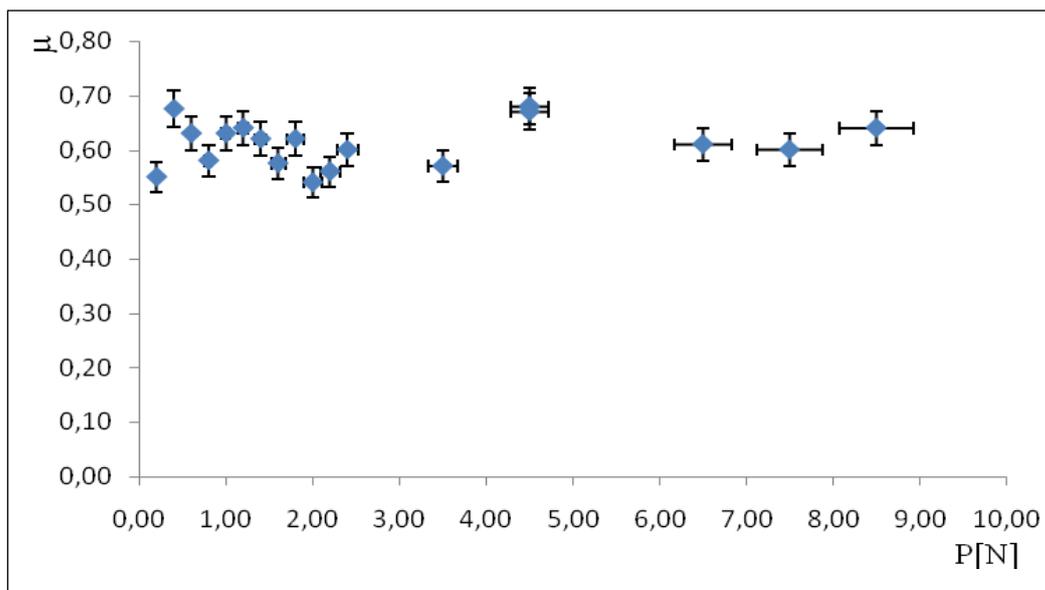


Figure III.4. Variation du coefficient de frottement μ en fonction de la charge normale ($V = 1,18 \text{ m/s}$, $I = 0 \text{ A}$ et $t = 60 \text{ mn}$).

III.2.4. Variation du coefficient de frottement en fonction du courant électrique

La figure III.5 donne la variation du coefficient de frottement en fonction du courant électrique traversant le contact. On remarque que le coefficient de frottement garde une allure sensiblement constante jusqu'à $I = 25\text{A}$ et au-delà de cette limite μ diminue. La diminution est plus importante lorsque le câble est cathode.

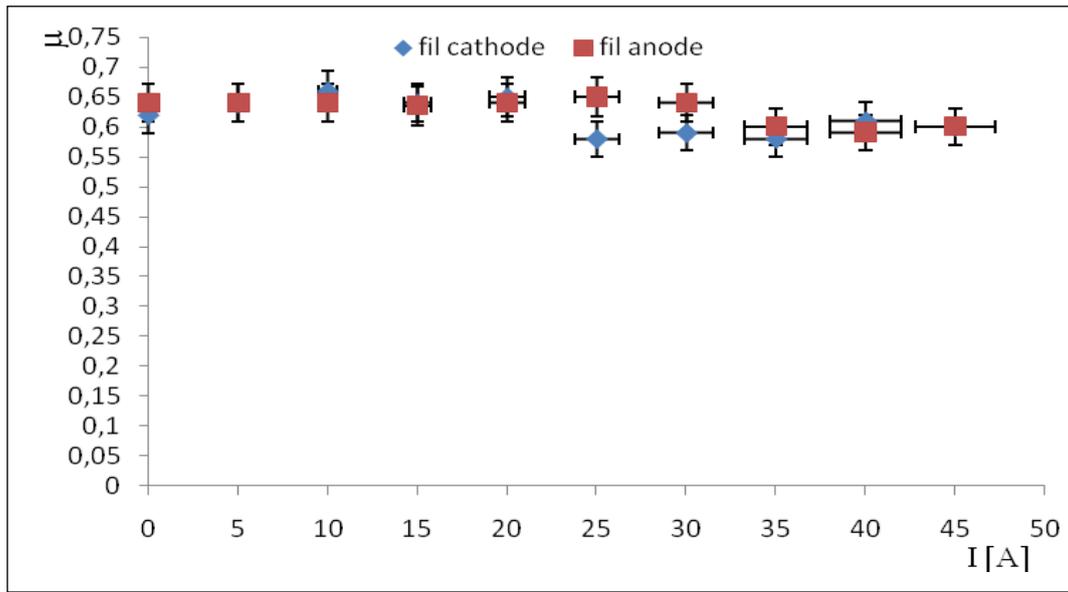


Figure III.5. Variation du coefficient de frottement μ en fonction du courant électrique ($P = 10\text{ N}$, $V = 1,18\text{ m/s}$ et $t = 60\text{ mn}$)

III.2.5. Evolution de la profondeur maximale en fonction du paramètre temps

La figure IV.6 donne la variation de la profondeur maximale du câble avec le paramètre temps. La courbe représentative de $P_{\text{dmax}} = f(t)$ est sensiblement une droite durant les 2 premières heures.

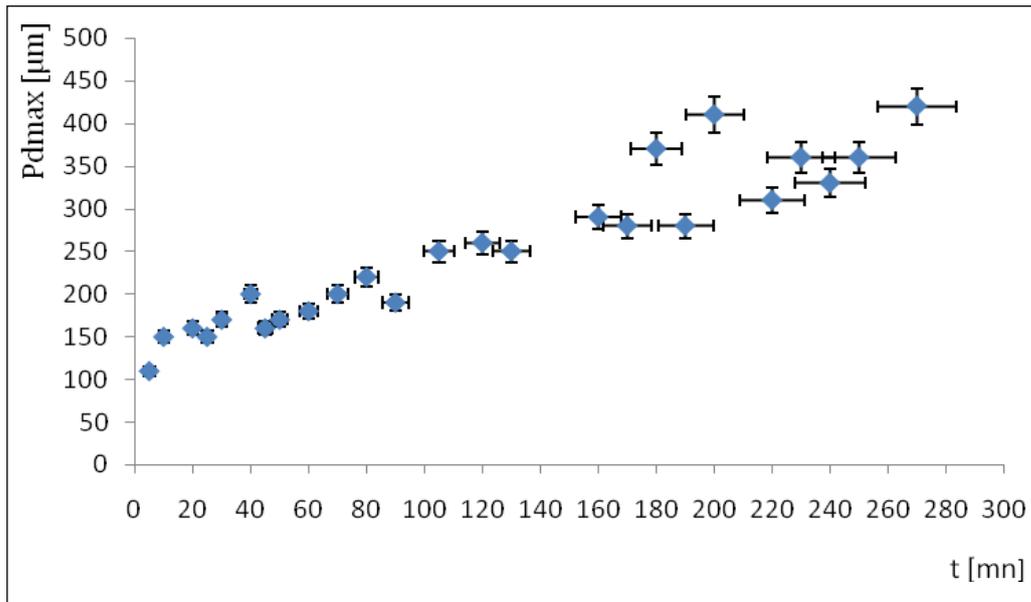


Figure III.6. Variation de la profondeur maximale P_{dmax} en fonction du paramètre temps ($P = 10\text{ N}$, $I = 0\text{ A}$ et $V = 1,18\text{ m/s}$)

III.2. 6. Evolution de la profondeur maximale en fonction de la vitesse

La figure III.7 montre l'évolution de l'usure en fonction de la vitesse, on constate qu'aux faibles vitesses, la faible perte de masse du câble entraîne des incertitudes considérables sur la valeur de P_{dmax} , particulièrement, pour les vitesses inférieures à 1 m/s. Au-delà de 2m/s, l'usure est sensiblement linéaire en fonction de la vitesse.

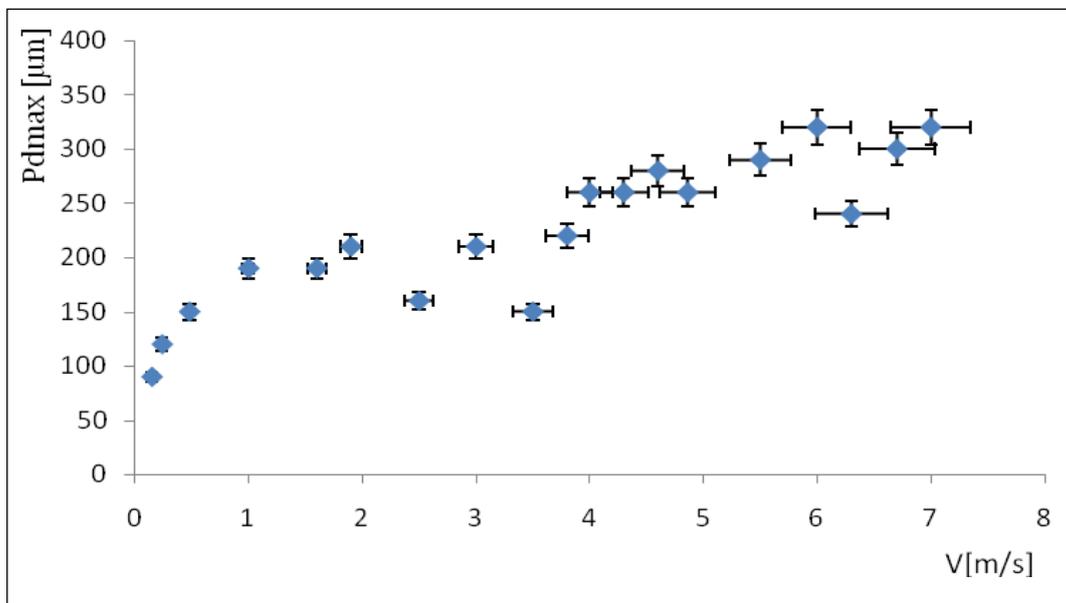


Figure III.7. Variation de la profondeur maximale P_{dmax} en fonction de la vitesse de glissement ($P = 10\text{ N}$, $I = 0\text{ A}$ et $t = 60\text{ mn}$)

III.2.7. Evolution de la profondeur maximale en fonction de la charge normale

L'évolution de la profondeur maximale en fonction de la charge normale est présentée sur la figure III.8. Cette courbe montre que l'usure augmente proportionnellement à la charge appliquée.

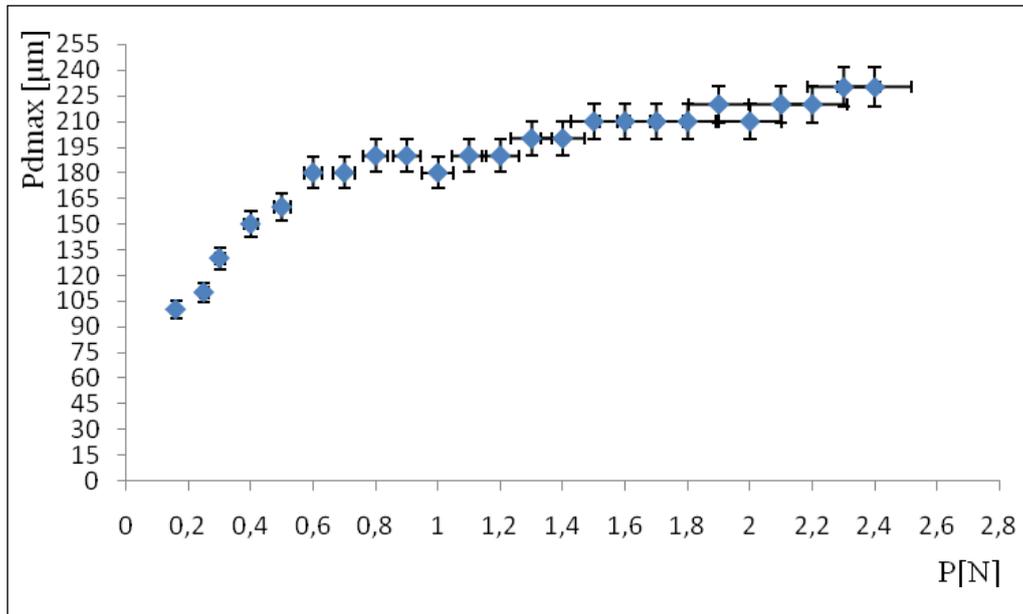


Figure III.8. Variation de la profondeur maximale P_{dmax} en fonction de la charge normale ($V = 1,18 \text{ m/s}$ et $t = 60 \text{ mn}$)

III.2.8. Evolution de la profondeur maximale en fonction du courant électrique

La figure III.9 donne la variation de la profondeur maximale en fonction de l'intensité du courant électrique dans le contact. On ne distingue pas une influence significative de la polarité sur l'usure. Néanmoins, on constate une légère diminution lorsque le câble est anode.

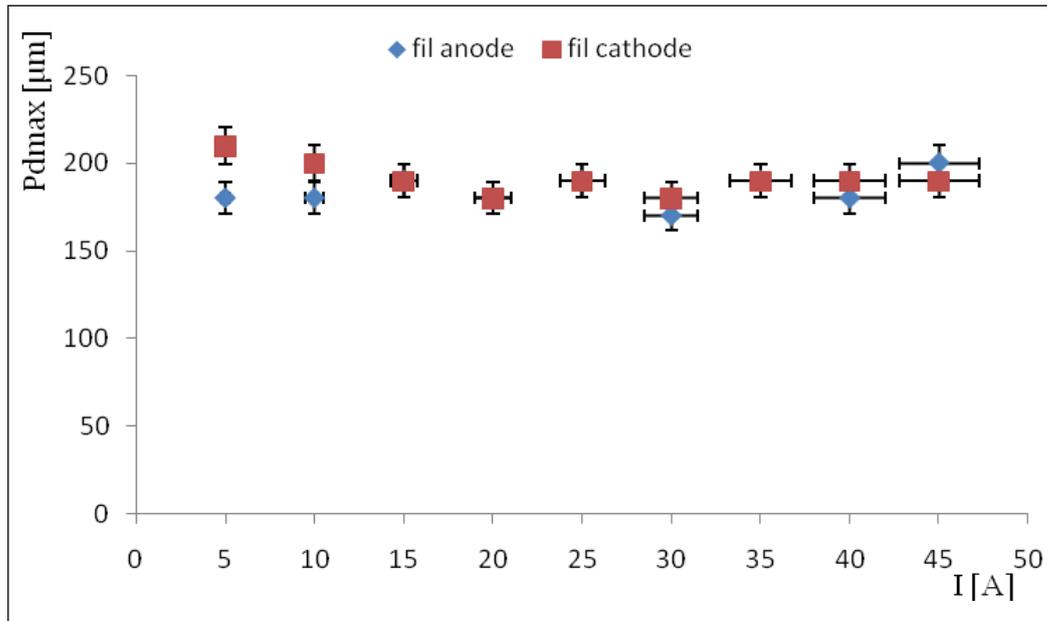


Figure III.9. Variation de la profondeur maximale P_{dmax} en fonction de la polarité du courant électrique ($P = 10$ N, $V = 1,18$ m/s et $t = 60$ mn)

III.2.9. DISCUSSION

III.2.9.1. Effet de la charge sur le frottement et l'usure

Au début, la charge P n'est pas assez forte pour produire un frottement important. Or son augmentation impose une pression sur la surface de contact qui produit un frottement considérable, donc un coefficient de frottement important.

Physiquement, l'augmentation de cette force produit une résistance entre les deux surfaces pour freiner la rotation du disque [3], cette résistance est due particulièrement, à l'état de surface [4]. Elle augmente l'usure. En effet, des travaux [5] ont montré qu'il existe toujours une charge critique au-delà de laquelle l'usure croît considérablement (Fig. III. 8). Dans la première partie de la courbe, sous faible charge, le volume usé est sensiblement proportionnel à la charge (jusqu'à 1,3N). L'accroissement de cette dernière se traduit par un surcroît d'usure et probablement par augmentation du nombre de points de contact (Fig. III.10) et ensuite par élévation de la densité de jonctions.

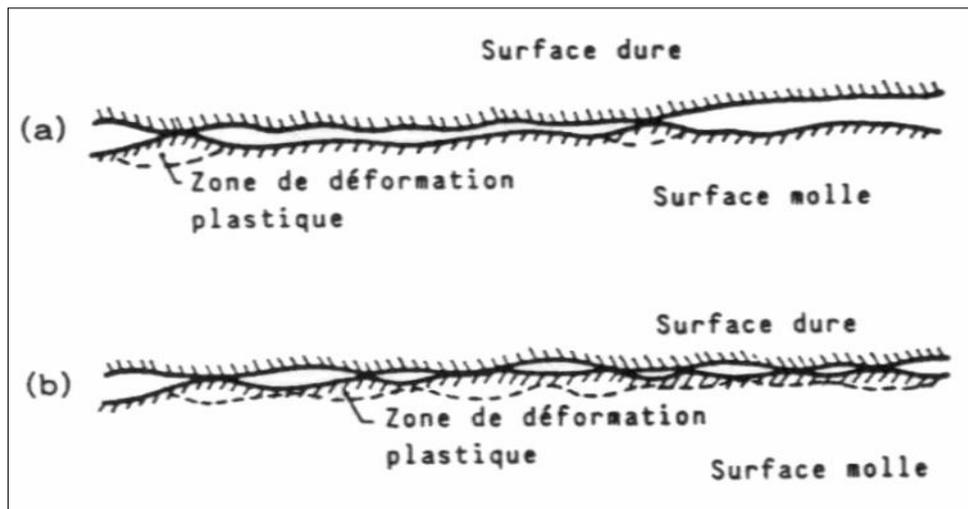


Figure III.10. Corps antagonistes en frottement (a) sous faible charge et (b) sous forte charge

III.2.9.2. Effet du paramètre temps sur le frottement et l'usure

Les conditions de frottement dans les premiers instants sont différentes de celles qui s'établissent après une longue période de glissement (Fig. III.2). En effet, les premiers instants de frottement, ou période de rodage, sont difficiles à reproduire d'un essai à l'autre à cause de la sensibilité aux faibles changements dans la géométrie ou la préparation des surfaces. Après cette période transitoire, les conditions de fonctionnement à l'interface deviennent stables [6]: coefficient de frottement stabilisé, rugosité des surfaces, profondeur des couches déformées, composition et microstructure des couches en surface... L'usure augmente de 35 à 270 minutes (Fig. III.7). Cette augmentation s'explique par l'accroissement de la surface réelle de contact et par fluage. Cette surface de forme elliptique se déforme et s'allonge dans le sens de glissement (Fig. III.11). Au fur et à mesure que l'essai se poursuit, des changements de structure et de composition des surfaces superficielles interviennent et les phénomènes d'oxydation et de transfert mutuel se génèrent et jouent un rôle important dans le comportement en frottement et usure du couple [7].

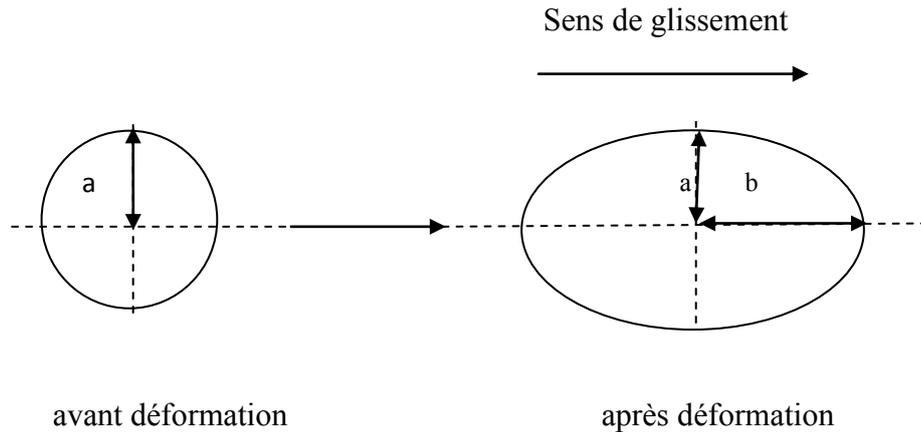


Figure III.11. Evolution de la surface réelle de contact sous l'effet des contraintes appliquées

III. 2.9.3. Effet de la vitesse sur le frottement et l'usure

Le principal effet de la vitesse est d'agir sur la température superficielle atteinte qui peut, dans certaines conditions, dépasser le point de fusion du cuivre (120°C). Dans cette situation, le cuivre se ramolli, l'oxyde se désagrège et on assiste à une compétition entre la formation et la rupture du film d'oxyde formé [8]; ce qui diminue le frottement et augmente l'usure du câble (Figs. III. 3 et III.7).

III.2.9.4. Effet de l'intensité du courant sur le frottement et l'usure

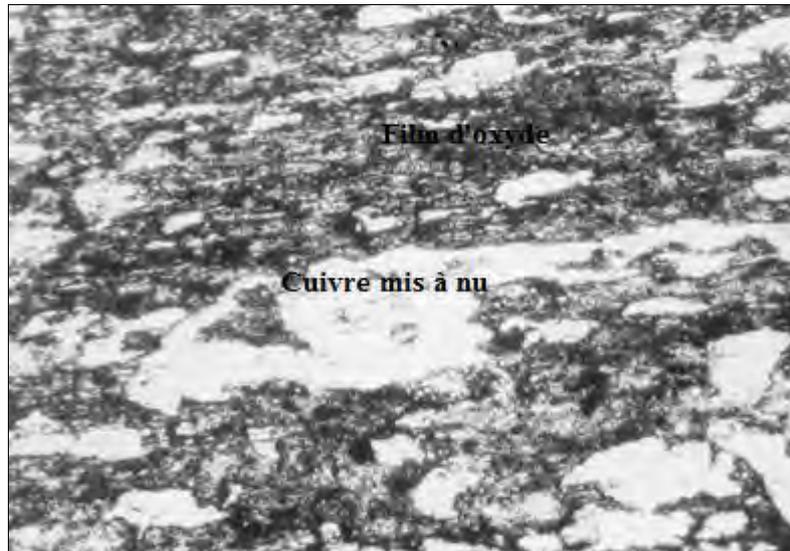
Le courant électrique est un paramètre qui influe considérablement le processus d'oxydation. En effet, pour des intensités faibles et modérées ($I \leq 20 \text{ A}$), l'usure par oxydation domine [9]. En revanche, pour des intensités plus importantes ($I \geq 25 \text{ A}$), en plus de l'usure par oxydation, l'usure abrasive se développe, mais la formation d'une couche d'oxyde qui s'adapte bien aux irrégularités du cuivre semble bien le protéger contre l'endommagement ; ainsi [10], le frottement et l'usure ont tendance à diminuer surtout, aux alentours de 40 A (Fig. III. 9).

III.2.9.5. Effet de la polarité sur le frottement et l'usure

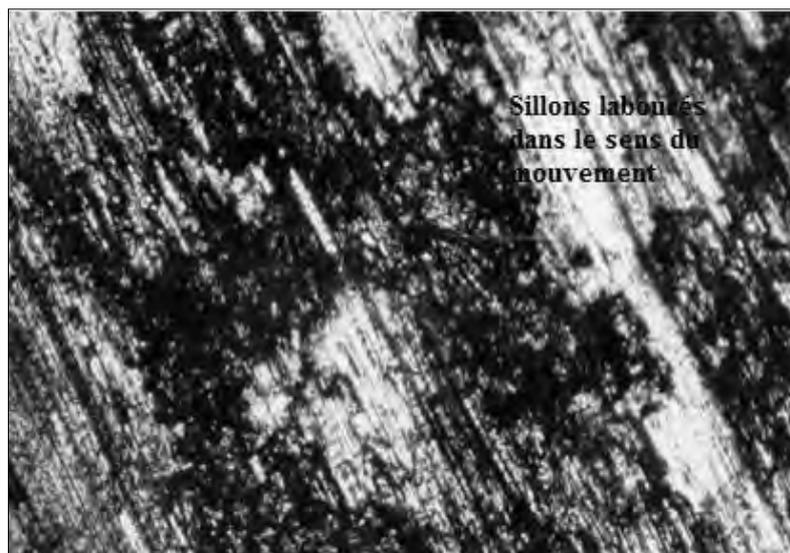
Lorsque le câble est anode, la conduction du courant se produit à travers les surfaces nues en contact, obtenues par rupture du film d'oxyde (Fig. III.12). Ce processus favorise la formation d'une mince couche d'oxyde solidaire au cuivre anode [11]. Quand ce dernier devient cathode le champ électrique s'oppose à la migration des ions sur le cuivre et défavorise l'oxydation sur ce dernier et l'active sur l'acier. Par conséquent, les particules

Chapitre III : Etude expérimentale du comportement tribologique du couple glissant cuivre-acier

abrasives agissent à l'interface, labourent des sillons sur le cuivre (Fig. III.12) et augmente légèrement le coefficient de frottement et l'usure du câble (Figs. III.5 et III.9).



**Figure III.12. Micrographie électronique (MEB) de la face usée du câble ($\times 100$)
($P = 10 \text{ N}$, $T = 360 \text{ N}$, $I = 40 \text{ A}$ et $t = 60 \text{ mn}$)**



**Figure III.13. Micrographie optique de la face usée du câble ($\times 100$)
($P = 10 \text{ N}$, $T = 360 \text{ N}$, $I = 40 \text{ A}$ et $t = 60 \text{ mn}$).**

III.3. ETUDE DU COMPORTEMENT EN FROTTEMENT SEC D'UN CONTACT ELECTRIQUE GLISSANT PION-DISQUE DU COUPLE CUIVRE-ACIER

III.3.1. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement

Cette figure présente la variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse du couple dynamique cuivre-acier. On constate trois zones distinctes : une évolution du coefficient de frottement, une diminution puis une stabilité de ce dernier.

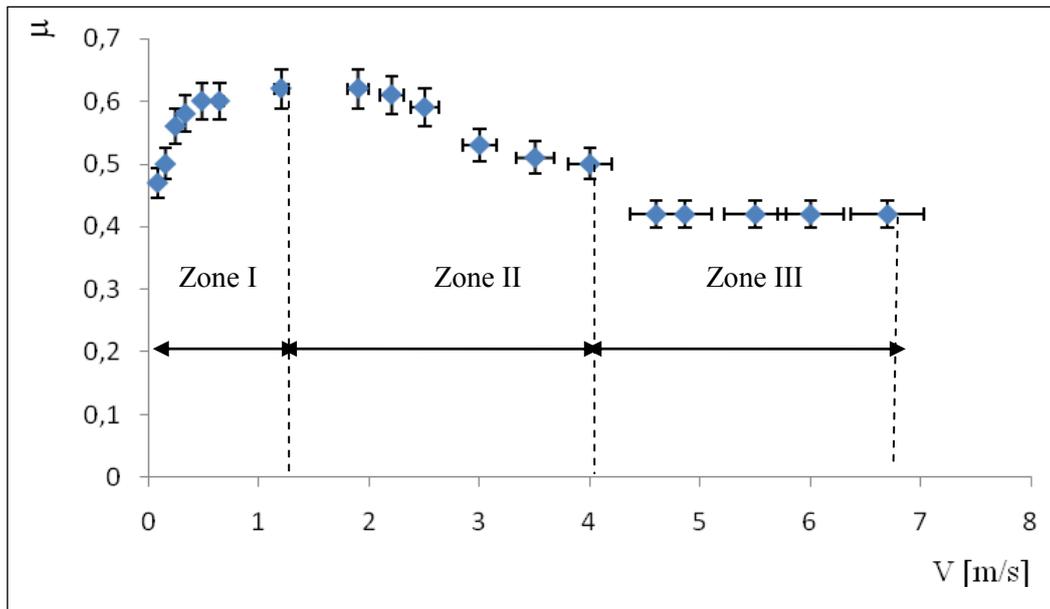


Figure III.14 : Variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement ($P = 10 \text{ N}$, $I = 0 \text{ A}$ et $t = 60 \text{ mn}$)

III.3.2. Evolution du coefficient de frottement en fonction du courant électrique et de la polarité

La figure III.15 illustre la variation de μ en fonction de I et de la polarité. On remarque que le courant électrique et la polarité n'ont pas d'influence significative sur le coefficient de frottement, pour cette raison l'évolution de ce coefficient est quasi statique.

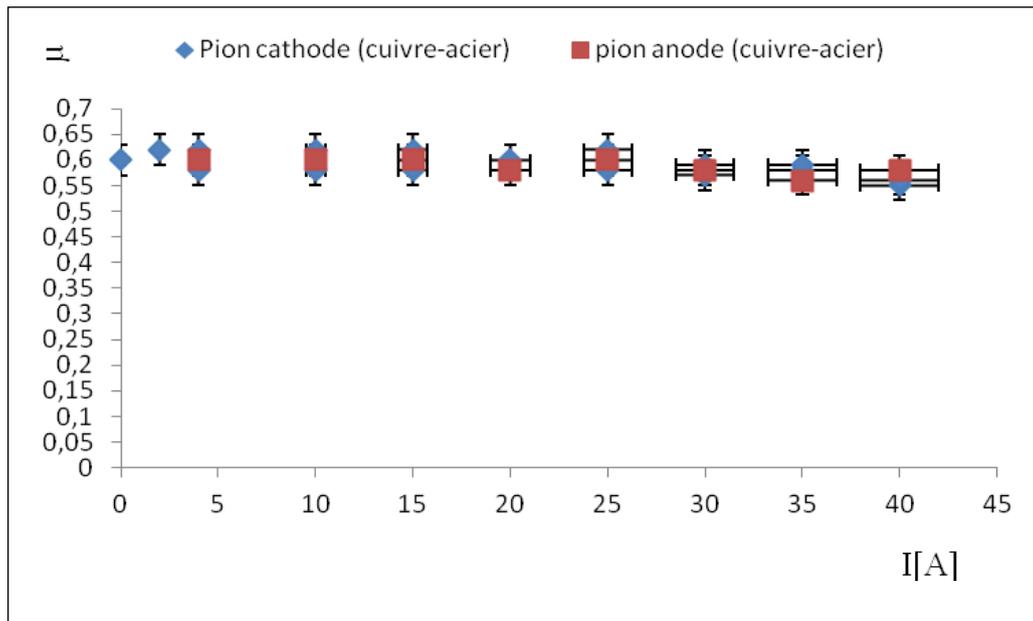


Figure III.15 : Variation du coefficient de frottement en fonction du courant électrique et de la polarité (P = 10 N, V = 1,18 m/s et t = 60 mn)

III.3.3. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la charge normale

Dans cette figure, on constate que le coefficient de frottement est presque stable avec la charge normale.

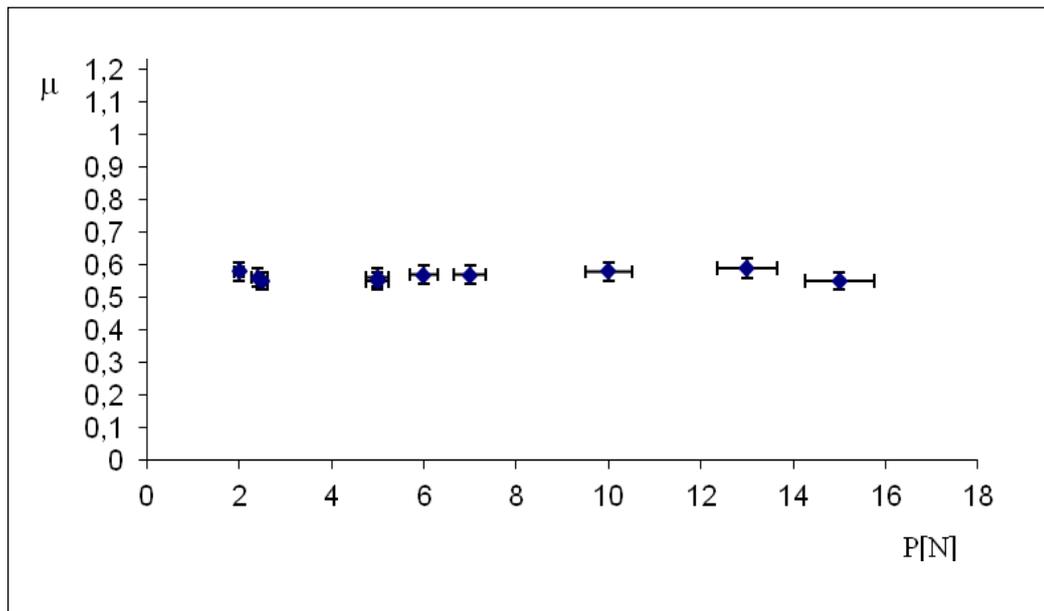


Figure III.16 : Variation du coefficient de frottement en fonction de la charge normale (V = 1,18 m/s, I = 0 A et t = 60 mn)

III.4. EFFET DE LA GEOMETRIE DE CONTACT SUR LE FROTTEMENT SEC DU COUPLE GLISSANT CUIVRE-ACIER

Les expériences ont été effectuées à l'air ambiant en utilisant:

- un tribomètre pion-disque. Le pion a une forme cylindrique de longueur 20 mm et de diamètre égale à 8 mm; qui permet de le fixer dans un trou, à l'aide d'une vis de blocage, sur un bras de charge en aluminium. Le disque de diamètre égal à 50 mm a une épaisseur de 12 mm. Il possède un trou lamé au centre, ce dernier permet la fixation du disque, à l'aide d'une vis sur le support du tribomètre. Le rayon de la piste sur le disque est fixé à 40 mm (Fig. II.1).
- un tribomètre câble tendu-disque (Fig. II.16). Le câble est tendu dans un support en U. La force tangentielle qui en résulte est mesurée par une jauge de contrainte fixée à l'extrémité du bras. Le coefficient de frottement μ est le rapport ($\mu = F/P$). Les échantillons de cuivre sont issus directement des bobines commerciales destinées à la conduction électrique. Ces échantillons ont été recuits sous vide (10^{-5} torr) durant 2 h à 600 °C, pour éliminer l'érouissage et homogénéiser leur structure. L'usure est déterminée par la perte de rayon du cylindre P_{dmax} (câble) mesurée par un pied à coulisse à affichage digital au milieu du câble (partie frottante) : $P_{dmax} = R_i - R_f$.

Le disque en acier est animé d'un mouvement de rotation de vitesse constante. Le pion ou le câble (en cuivre) est appuyé contre le disque par une charge normale P.

Pour avoir le même état de surface et afin d'assurer les mêmes conditions d'essais, le disque est poli à l'aide du papier verre de grade 1200 ($R_a = 0,4 - 0,16 \mu m$). Le courant électrique continu I est délivré par une alimentation A. Un contact tournant à mercure assure convenablement le transfert du courant électrique.

III.4.1. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la charge

La figure ci-dessous illustre l'évolution du coefficient de frottement μ en fonction de la charge normale P, pour les deux types de contact. Les courbes de cette figure montrent une dépendance quasi linéaire en fonction de la charge, ce qui conduit à un coefficient de frottement moyen sensiblement constant ($\mu \sim 0,6$). On constate aussi que, pour les deux géométries l'allure du coefficient de frottement ne change pas.

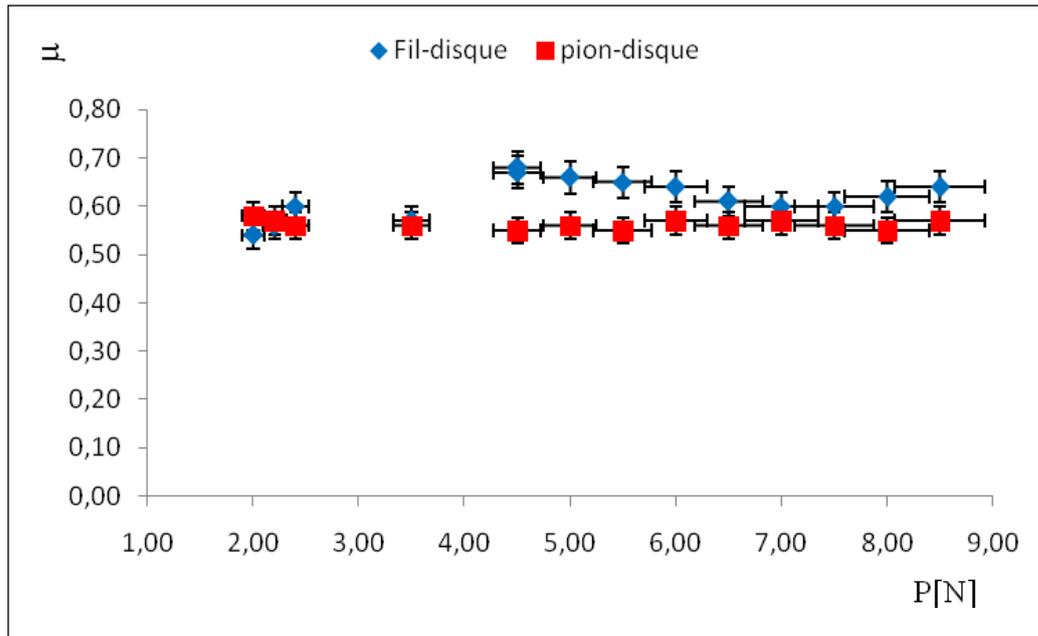


Figure III.18. Variation du coefficient de frottement en fonction de la charge normale pour le couple cuivre-acier ($V = 1,18$ m/s, $I = 0$ A et $t = 60$ mn)

III.4.2. Evolution du coefficient de frottement en fonction du courant électrique et de la polarité

La figure III.19 présente l'évolution du coefficient de frottement en fonction du courant électrique traversant le contact pour les deux types de contact. On remarque que les quatre courbes présentent les mêmes allures et la valeur du coefficient de frottement pour le cas du câble (anode ou cathode) est plus grande que celle du pion.

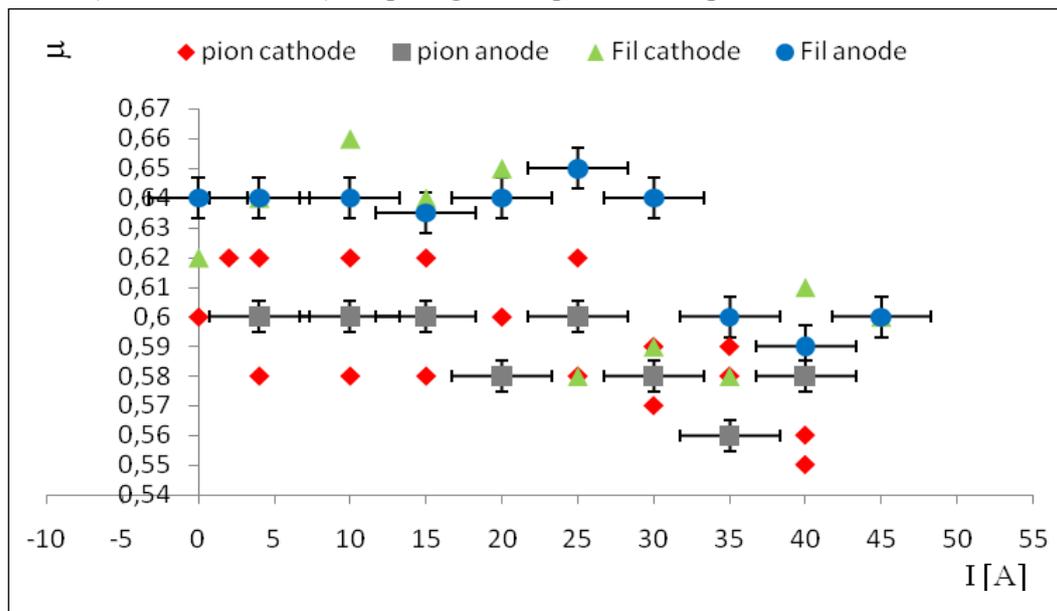


Figure III.19. Variation du coefficient de frottement en fonction du courant électrique pour le couple cuivre-acier ($V = 1,18$ m/s, $P = 10$ N et $t = 60$ mn)

III.4.3. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement

La figure III.20 montre la variation de μ en fonction de la vitesse. On remarque que les deux courbes présentent sensiblement la même allure, et ce, quelle que soit la configuration pion-disque ou câble tendu-disque.

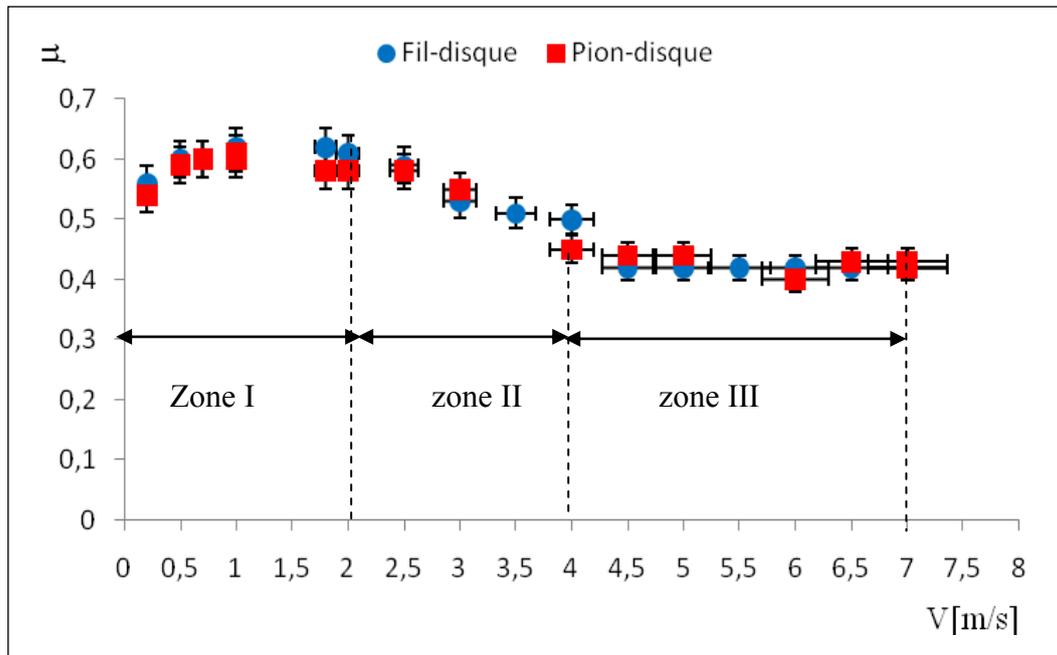


Figure III.20. Variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse pour le couple cuivre-acier ($P = 10$ N, $I = 0$ A et $t = 60$ mn)

III.4.4. Evolution du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps

La figure III.21 montre la variation du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps. On constate deux zones distinctes :

Première zone dite de rodage ou période transitoire d'adaptation, nécessaire à l'évacuation des particules formées lors de la mise en contact des deux contre-faces. Dans ces conditions, le coefficient de frottement enregistre une diminution puis une augmentation pour les deux configurations.

Deuxième zone, le coefficient de frottement est stable durant toute la période de 2700 secondes de fonctionnement et est égale à 0,60. Durant le frottement, le pion perd progressivement sa matière. Ceci est traduit par une augmentation de la surface apparente du contact câble-disque ou pion-disque.

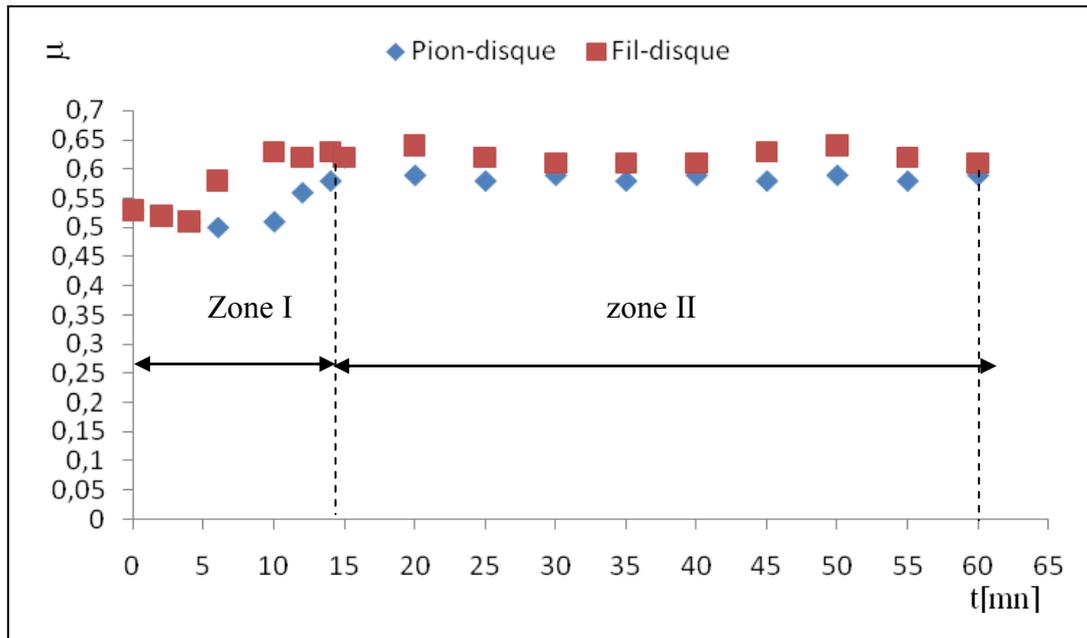


Figure III.21. Variation du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps pour le couple cuivre-acier ($V = 1,18$ m/s, $I = 0$ A et $P = 10$ N)

III.5. DISCUSSION

Des études antérieures ont montré [12] que le courant électrique n'influe pas directement sur l'usure, sauf dans le cas où on observe une électrolyse occasionnelle, mais il peut être la cause d'une haute élévation de température, entraînant un adoucissement du métal le plus doux et une oxydation accrue.

Dans un contact cuivre-acier, l'oxydation joue un rôle prépondérant [13]. Parfois l'usure soit plus faible en présence du courant que sans courant électrique. D'autre part, la chaleur générée par frottement et par effet joule, surtout aux fortes intensités I , facilitent le développement de la couche d'oxyde à l'interface et la résistance électrique de contact augmente. Dans ces conditions, le transfert du courant se produit à travers les surfaces nues en contact, lors de la rupture du film d'oxyde. Quand le fil de cuivre est anode (+), la couche d'oxyde formée sur la face frottée du fil est mince, compacte, uniforme et s'adapte bien aux irrégularités du fil. Les ions positifs de ce dernier diffusent à travers cette couche pour former des filaments métalliques entre les surfaces en regard. Lors du mouvement, aussitôt formés, ces filaments se rompent et leurs extrémités nues s'oxydent. Cette couche diminue également le transfert de cuivre sur le disque et protège le fil contre l'usure par oxydation. De ce fait, elle diminue le processus de diffusion des atomes activés par le champ électrique [14]. Lorsque le fil devient cathode (-), ces filaments ne peuvent plus se former, à cause du champ électrique

Chapitre III : Etude expérimentale du comportement tribologique du couple glissant cuivre-acier

qui contrarie la diffusion des ions positifs de cuivre. En revanche, ce champ favorise la formation des oxydes durs provoquant la rupture partielle de la couche d'oxyde sur le fil. Les zones mises à nu, par l'action de ces oxydes, favorisent le transfert de cuivre sur la piste de friction du disque.

En outre, pour des vitesses et charges élevées et/ou aux fortes intensités I , le mécanisme de transfert de cuivre sur le disque augmente [15]. Ce transfert entraîne la formation d'une couche de cuivre sur le disque. Cette dernière est dense, uniforme et s'adapte bien à la topographie de la piste du disque. En absence d'oxygène, le contact devient alors cuivre-cuivre [16]. Dans ce cas, le fil de cuivre est protégé contre les aspérités dures du disque. En présence d'oxygène, le métal transféré sur le disque s'oxyde, totalement ou partiellement, selon la température atteinte à l'interface et la quantité d'oxygène présente au niveau du contact. L'oxyde de cuivre observé sur la piste du disque a deux origines :

- la couche oxydée sur le fil se rompt par abrasion mécanique (Fig. III.14), car le film d'oxyde est plus dur que le substrat ($H_{\text{oxyde}} = 13,10^8 \text{ Pa} > H_{\text{cu}} = 4.10^8 \text{ Pa}$). Une fraction de la quantité d'oxyde arrachée, se dépose sur la piste pour se mêler au cuivre transféré. Sous l'action combinée de la charge normale et de la force tangentielle, les particules d'oxyde ainsi déposées s'entassent sur la piste, sévèrement endommagée, particulièrement pour les fortes intensités de I (rayures profondes). Ces fines particules remplissent les vallées des aspérités de l'acier, qui peuvent engendrer une usure importante du fil (Figs. III.15-16). Le contact oxyde de cuivre-oxyde transféré, sur la piste, favorise le glissement et diminue l'usure du fil [16].

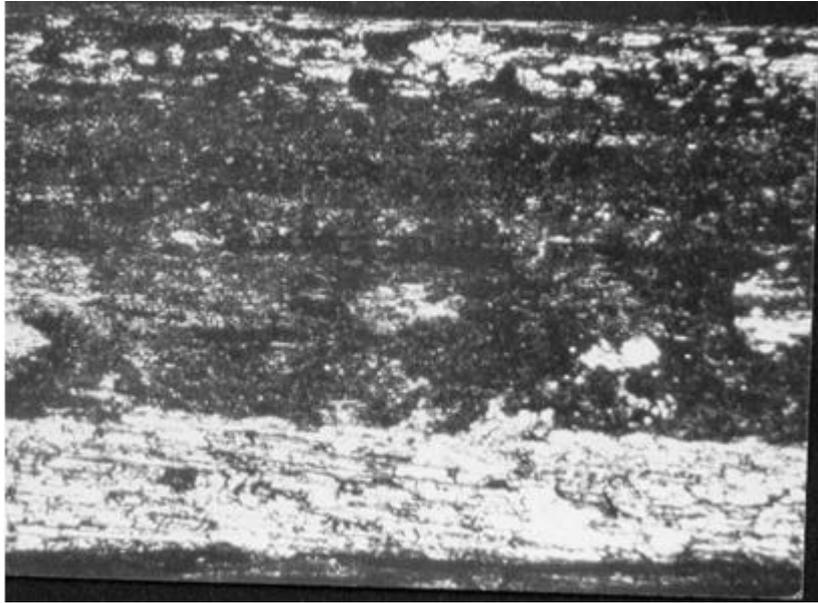
- la pellicule métallique de cuivre transférée s'oxyde et, il semble que l'usure du fil n'est pas gouvernée par le transfert de matière du fil vers le disque, mais par l'oxydation du film transféré. Une réduction ou une absence de l'oxydation de ce dernier, conduit à une diminution de l'usure du fil [17].

Les mécanismes de transfert de cuivre, oxydation de ce dernier et oxydation du cuivre transféré interviennent simultanément [18]. L'oxydation de la surface de contact du fil, sa rupture partielle, par action mécanique et/ou électrique et son dépôt sur la piste, est le mécanisme le plus dominant.

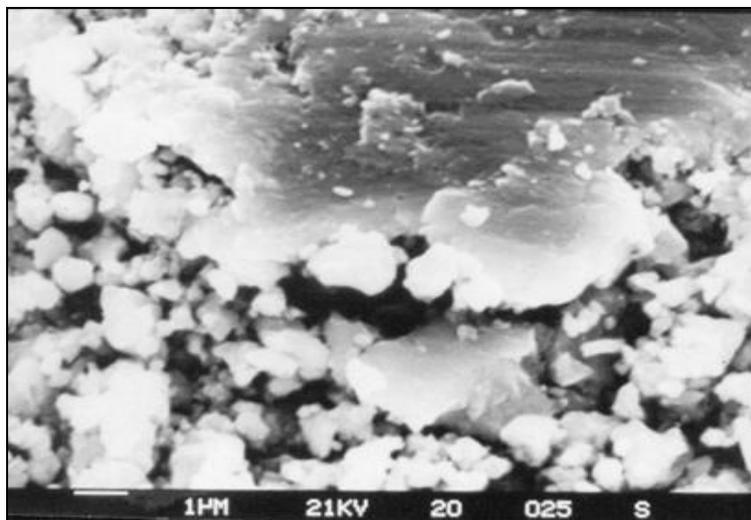
En réalité, lorsque le fil est anode, l'effet du courant électrique est d'augmenter très légèrement la vitesse de croissance de l'oxyde. Dans ce cas, la croissance des oxydes sur le disque est légèrement freinée, ce qui diminue en particulier la formation des oxydes de fer Fe_2O_3 et de chrome Cr_2O_3 , connus comme oxydes abrasifs, et le résultat est une légère diminution de l'abrasion de la couche d'oxyde de cuivre sur le fil [19]. Si le fil est cathode,

Chapitre III : Etude expérimentale du comportement tribologique du couple glissant cuivre-acier

l'effet du courant est d'accroître la vitesse de formation de ces deux oxydes dont l'action abrasive entraîne une usure plus rapide du fil (oxyde et métal) comme l'illustre la figure III.12 et III.13.



**Figure III.14. Micrographie optique de la face usée du câble ($\times 100$)
($P = 10 \text{ N}$, $T = 360 \text{ N}$, $V = 1,2 \text{ m/s}$, $I = 40 \text{ A}$ et $t = 60 \text{ mn}$)**



**Figure III.15. Micrographie électronique de la face usée du câble ($\times 100$)
($P = 10 \text{ N}$, $T = 360 \text{ N}$, $V = 1,2 \text{ m/s}$, $I = 40 \text{ A}$ et $t = 60 \text{ mn}$)**

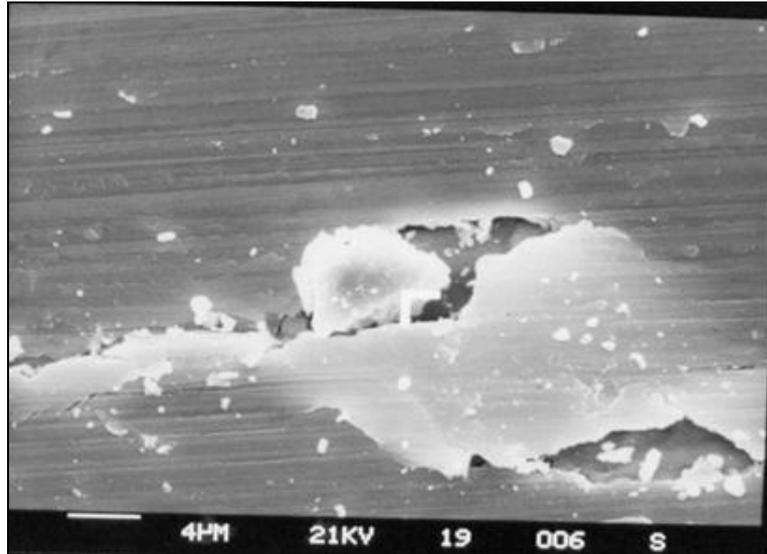


Figure III.16. Micrographie électronique de la face usée du câble ($\times 100$)

($P = 10 \text{ N}$, $T = 360 \text{ N}$, $I = 40 \text{ A}$ et $t = 60 \text{ mn}$)

III.6. CONCLUSION

Il ressort de cette étude que les paramètres mécaniques et électriques jouent un rôle majeur dans le comportement tribologique du contact dynamique cuivre-acier, surtout sur le processus d'oxydation et la croissance de la couche d'oxyde. Les oxydes formés réduisent le nombre de jonctions métalliques, diminuent l'aire d'adhésion, le coefficient de frottement global du contact glissant, et ce quelle que soit la géométrie de contact pion-disque ou câble-disque. Le rôle de cette couche d'oxyde est analogue à celui d'un lubrifiant solide. Le passage du courant électrique contribue à l'échauffement et la formation de ces films d'oxyde qui protège le pion ou le câble contre l'usure. En revanche, la géométrie des surfaces en contact n'a pas d'influence significative sur le comportement en frottement du couple dynamique cuivre-acier.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **A. Bouchoucha**, Etude du comportement en frottement et usure des contacts électriques glissants cuivre-acier et cuivre-graphite, thèse de doctorat INPL, Nancy, France (1997).
- [2] **Y.C. Chiou et al**, Formation mechanism of electrical damage on sliding contacts for steel pair under DC electric field. *Wear* 266, 110-118, (2009).
- [3] **A. Bouchoucha et Al**, Influence of the electrical sliding speed on friction and wear processes in electrical contact copper–stainless steel. *Wear* 203-204, 434-441, (1997).
- [4] **A. Maatta et al**, Friction and adhesion of stainless steel strip against tool steels in unlubricated sliding with high contact load. *Tribology International* 34, 779-786, (2001).
- [5] **J. Blouet et R. Gras**, Influence de la charge sur le comportement tribologique des revêtements. Essais de frottement, Tenue à l'usure. *Revue Mécanique-Electricité*, 29, p. 9-28, (1969).
- [6] **G. Bucca, A. Collina**, A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph–catenary system, *Wear* 266, 46-59, (2009).
- [7] **O. Barrau**; Etude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud. Thèse de doctorat INP de Toulouse ; France, (2004).
- [8] **Z. Lestyan et al**, Contact and thermal analysis of an alumina-steel dry sliding friction pair considering the surface roughness. *Tribology International* 40, 982-994, (2007).
- [9] **S.Q. Wang et al** Transition of elevated-temperature wear mechanisms and the oxidative delamination wear in hot-working die steels. *Tribology International* 43, 577-584, (2010).
- [10] **L. Ceschini et al**, Friction and wear behaviour of sintered steels submitted to sliding and abrasion tests. *Tribology International* 39, 748-755, (2006).
- [11] **K. J. Chin et al**, Study of copper/steel electrical contact, Journées internationales Francophones de tribologie, Obernai, France, (2002).
- [12] **N. Laraqi and al**. Temperature and division of heat in a pin-on-disc frictional device-exact analytical solution, *Wear*, 08.016, (2008).
- [13] **W. Park Y and al**. The influence of current load on fretting of electrical contacts. *Tribology International*, 09.004L, (2008).
- [14] **D. Majcherczak and al**, Tribological, thermal and mechanical coupling aspects of the dry sliding contact, *Tribology International* 40, 834-843, (2007).
- [15] **Y. C. Chiou and al**. Formation mechanism of electrical damage on sliding contacts for steel pair, *Wear* 266, 110–118, (2009).
- [16] **M. G. Diehl**. *Wear of electrical contacts*, Vol. 1 *Wear*, References p. 376, (1958).

Chapitre III : Etude expérimentale du comportement tribologique du couple glissant cuivre-acier

- [17] **P. Stempfle and al.** Evaluation of the real contact area in three-body dry friction by microthermal analysis. Tribology International. 10.1016, (2010).
- [18] **J. Denape and N. Laraqi**, Thermal aspect of friction: Experimental evidence and theoretical approaches, 563-579, December (2000).
- [19] **Da Hai He and al**, A sliding wear tester for overhead wires and current collectors in light rail systems, Wear 239, 10–20, (2000).
- [20] **C. Boubechou, A. Bouchoucha and H. Zaidi**, Friction and wear behavior of a dry sliding electrical contact stretched cable-disc. International Review of Mechanical Engineering (IREME), Editor: Praise worthy Prise, Italy, Vol 5 n 7, pp. 1327-1332, ISSN: 1970-8734, November (2011).

CHAPITRE IV

INFLUENCE DES PARAMETRES THERMOELECTROMECHANIQUES SUR LE COMPORTEMENT EN FROTTEMENT SEC : ETUDE COMPARATIVE DES COUPLES CUIVRE-ACIER ET CUIVRE-GRAPHITE

IV.1. INTRODUCTION

Dans les réseaux électrifiés des chemins de fer la puissance nécessaire à la traction des véhicules sur rail est assurée par transfert du courant électrique à travers le contact caténaire-pantographe. Ce couple est soumis à des conditions très sévères de fonctionnement. En effet, en plus des paramètres mécaniques et électriques le couple est exposé à des conditions climatiques très variables. Vu le nombre de passage important, la caténaire s'use et son remplacement s'avère onéreux. Des travaux antérieurs [1] ont montré que la nature des matériaux frottants contre la caténaire joue un rôle primordial dans le comportement en usure de cette dernière. D'autres travaux [2] ont mis en évidence l'effet du courant électrique sur la durée de service du couple.

Le but de ce chapitre est d'étudier l'influence du courant électrique sur le frottement des couples glissants cuivre-acier et cuivre-graphite ainsi que son effet sur l'oxydation et les modifications des surfaces de contact.

La discussion des résultats s'appuie sur des observations au MEB et des analyses EDS des surfaces usées ainsi que les phénomènes interfaciaux résultant du frottement des deux couples.

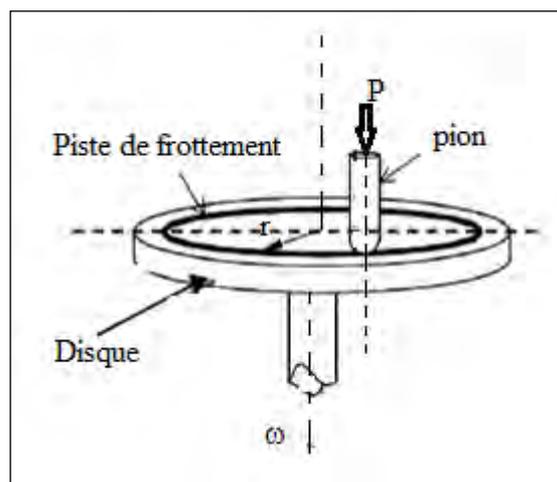


Figure IV.1. Schéma de l'ensemble pion-disque

IV.2. RESULTATS

IV.2.1. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la charge normale

La figure IV.2 illustre la variation du coefficient de frottement (moyen) μ en fonction de la charge normale appliquée pour les deux couples. En examinant cette figure, la courbe relative au couple cuivre-acier, montre une dépendance linéaire en fonction de la charge, ce qui conduit à un coefficient de frottement sensiblement constant ($\mu \sim 0,58$). En revanche, pour le contact dynamique cuivre-graphite, on constate une diminution initiale entre 2 et 8 N, puis le coefficient de frottement demeure constant à environ $\mu = 0,26$.

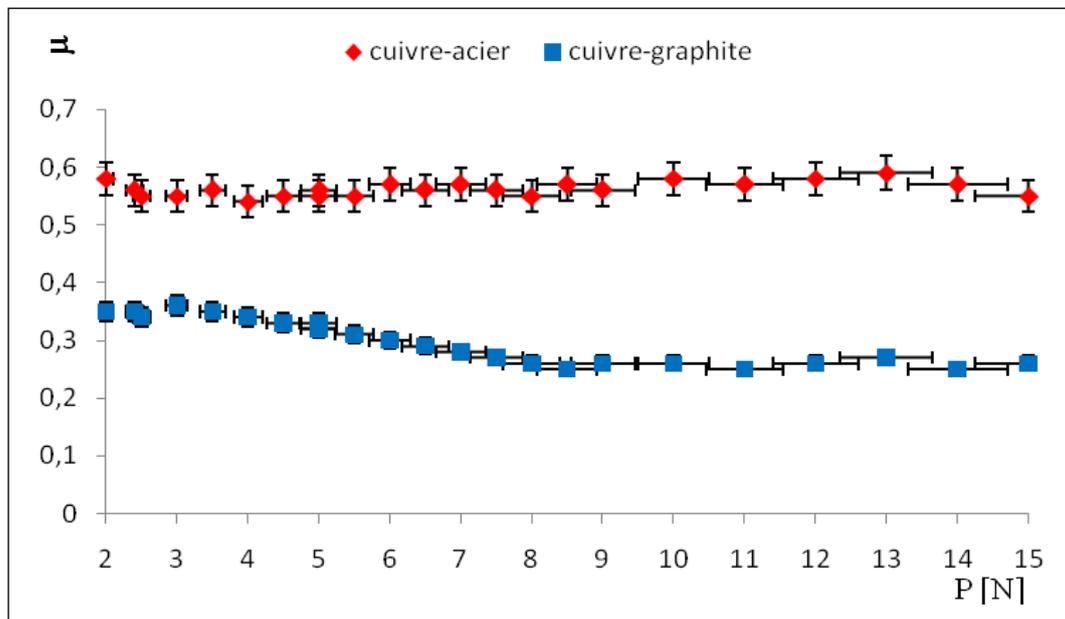


Figure IV.2. Variation du coefficient de frottement en fonction de la charge
($V = 1,2$ m/s et $t = 60$ mn)

IV.2.2. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse

Le coefficient de frottement, en régime stationnaire, varie également avec la vitesse : Les courbes de la figure IV.3 montrent les variations de μ avec la vitesse de glissement. Sur ces deux courbes, on peut distinguer trois zones :

- couple cuivre-acier : le coefficient de frottement augmente de $\mu \sim 0,54$, pour atteindre une valeur maximale de l'ordre de 0,60, aux alentours de $V = 1,2$ m/s (zone I). Ensuite, le coefficient de frottement diminue sensiblement quand la vitesse augmente, pour atteindre une valeur limite μ de l'ordre de 0,45 (zone II). Enfin μ devient relativement stable (zone III).

Chapitre IV : Influence des paramètres thermoélectromécaniques sur le comportement en frottement sec des couples cuivre-acier et cuivre-graphite

- couple cuivre-graphite : le coefficient de frottement augmente légèrement (zone I). Il continue à augmenter progressivement pour atteindre un maximum $\mu = 0,30$ (zone II), puis diminue pour se stabiliser à la valeur de $\mu = 0,24$ environ (zone III).

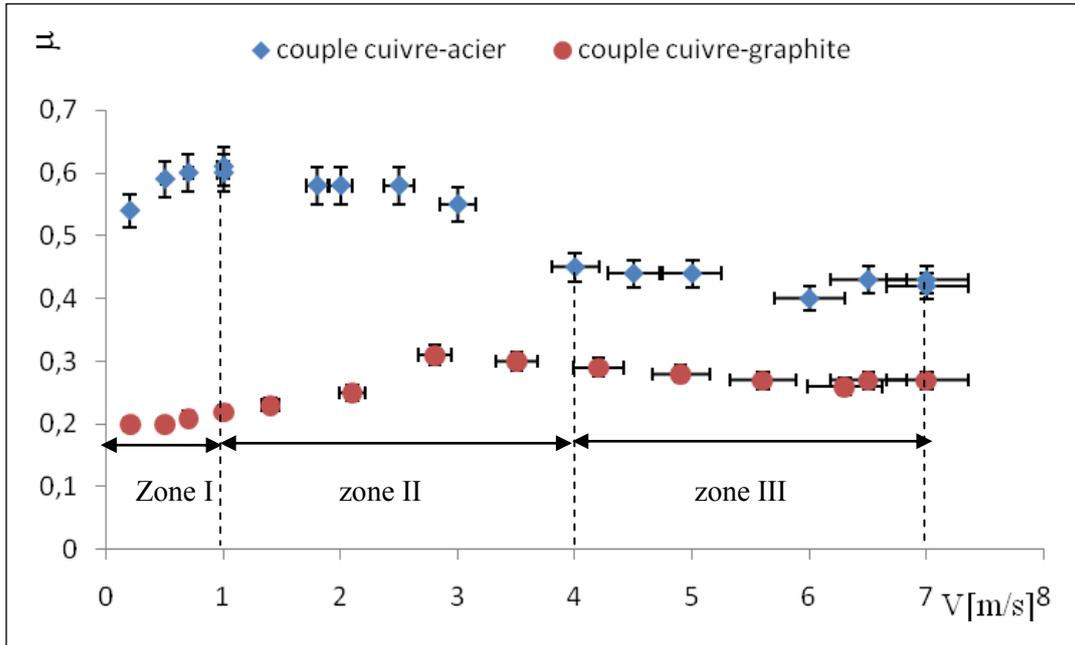


Figure IV.3. Variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse ($P = 10 \text{ N}$ et $t = 60 \text{ mn}$).

IV.2.3. Evolution du coefficient de frottement en fonction du courant électrique

- couple cuivre-acier : la figure IV.4 montre l'évolution du coefficient de frottement moyen en fonction de l'intensité du courant, on ne remarque pas de changement significatif avec et sans courant, si ce n'est une légère diminution de μ au-delà de 25 A. L'amplitude des fluctuations de μ augmente avec le courant et ce, que le pion soit anode ou cathode.

- couple cuivre-graphite : on constate que lorsque l'intensité du courant croît le coefficient de frottement diminue et semble tendre vers une limite.

IV.2.4. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la polarité du pion

La figure IV.4 indique que l'effet de la polarité est insignifiant lorsque le pion frotte contre le disque en acier, si ce n'est une légère diminution de μ au-delà de 25 A. Par contre, la polarité a un effet significatif quand le pion glisse contre le graphite et μ_{anode} est supérieur à μ_{cathode} .

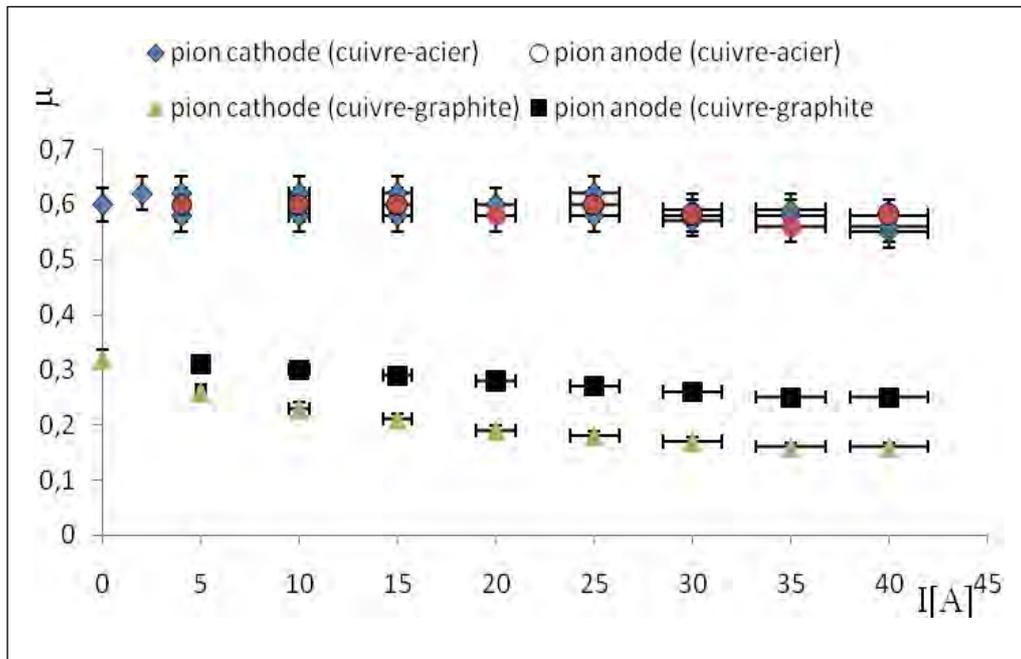


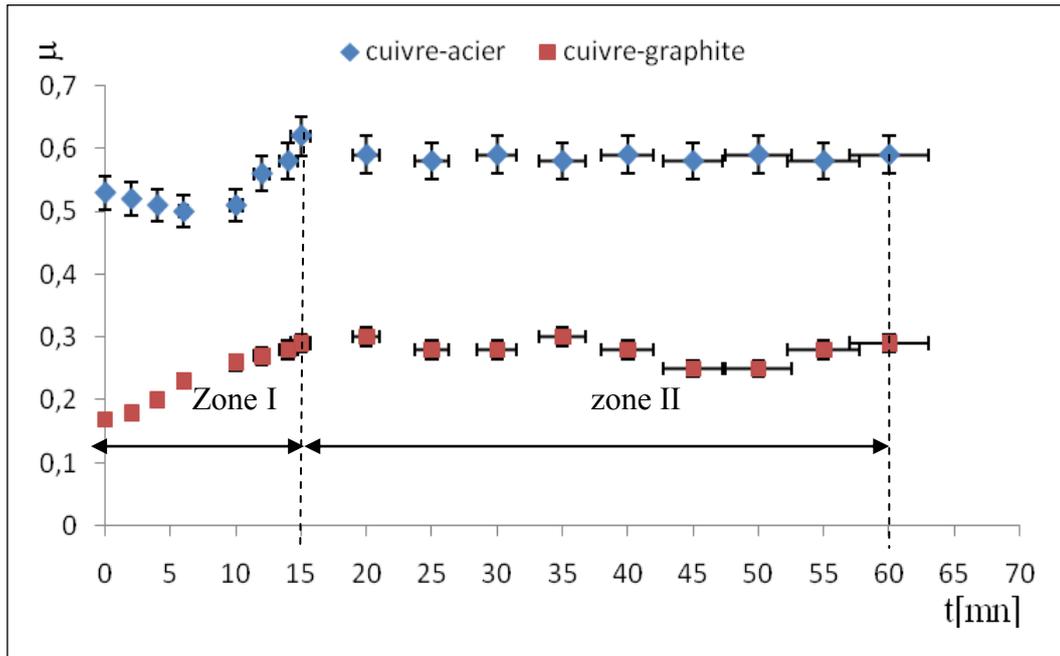
Figure IV.4. Variation du coefficient de frottement en fonction du courant électrique (V = 1,2 m/s, P = 10 N et t = 60 mn).

IV.2.5. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps

La figure IV.5 montre l'évolution du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps, on peut distinguer deux zones distinctes :

- zone I : phase transitoire dite de rodage ou période transitoire d'adaptation, nécessaire à l'évacuation des particules formées lors de la mise en contact des deux contre-faces ; où μ évolue progressivement pour le couple cuivre-graphite mais pour le deuxième couple, ce coefficient indique une diminution puis une augmentation.
- zone II : caractérise le régime stationnaire, dans lequel l'état d'équilibre est établi, par stabilité des conditions de fonctionnement à l'interface pour le couple cuivre-graphite.

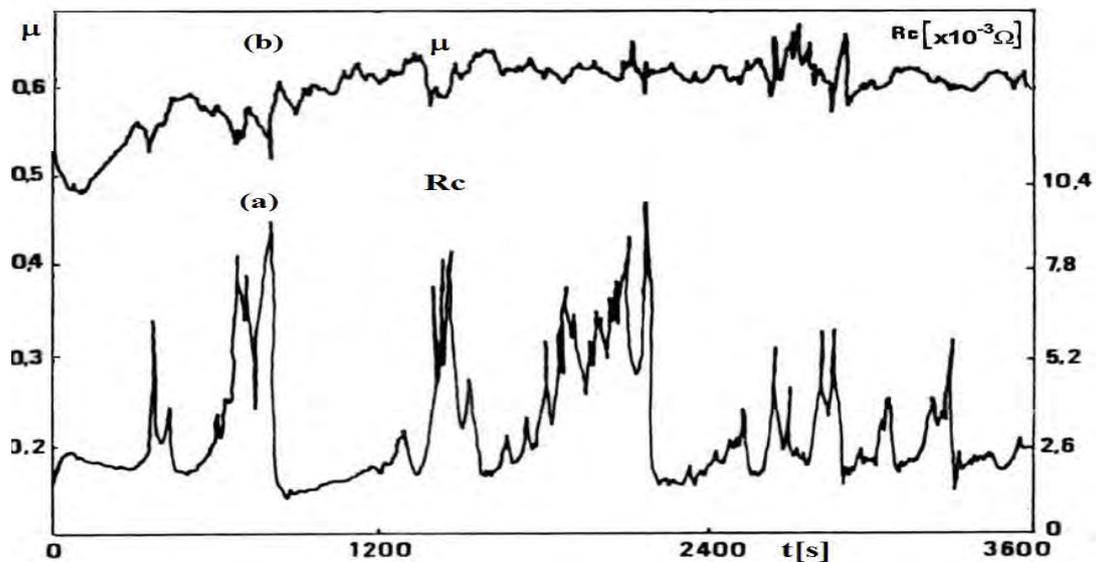
Pour des valeurs de vitesses élevées, les phénomènes observés aux faibles vitesses changent à cause, particulièrement du processus d'oxydation qui régit le comportement tribologiques des couples étudiés [4].



**Figure IV.5. Variation du coefficient de frottement en fonction du temps
(V = 1,2 m/s et P = 10 N).**

IV.2.6. Evolution de la résistance électrique de contact en fonction du paramètre temps

La figure IV.6 montre que le passage du courant électrique à travers les jonctions, entraîne de fortes fluctuations de la résistance électrique de contact et du coefficient de frottement indépendamment du sens du courant.



**Figure IV.6. Variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse
(P = 10 N et t = 60 mn).**

IV.3. MODELISATION

IV.3.1. Evaluation de l'aire réelle de contact

Considérons la surface réelle de contact entre le pion et le disque, circulaire de rayon a , obtenu à partir de la relation :

$$F = \mu.P = 0,6.H.\pi.a^2 \quad (IV.1)$$

$$P = H.\pi.a^2 \text{ d'où } a = \sqrt{\frac{P}{\pi.H}} \quad (IV.2)$$

IV.3.2. Evaluation de l'élévation de la température de contact

La chaleur générée par frottement et par effet Joule, $Q = Q_d + Q_p$ est la somme des quantités de chaleurs par unité de temps du disque mobile Q_d et du pion Q_p . La quantité de chaleur Q est distribuée entre les deux surfaces, de telle sorte que l'élévation de température à l'interface ΔT_m soit la même pour les deux solides. Ce qui permet de calculer les flux thermiques à travers chaque composant du couple, et qui dépendent surtout des paramètres mécaniques, de l'intensité du courant électrique, de la géométrie du contact, de la capacité calorifique et du nombre de Péclet L [5] :

$$L = \frac{V.a}{2.\chi} \quad \text{avec : } \chi = \frac{\lambda}{\rho.C_p} \quad (IV.3)$$

- Si $L < 0,1$, on peut considérer être en régime établi et la température du pion à l'interface s'exprime par :

$$\Delta T_m = \frac{Q_p}{4.a.\lambda_p} \quad (IV.4)$$

- Pour le domaine $0,1 < L < 5$, on considère la relation :

$$\Delta T_m = \alpha.\frac{Q_p}{4.a.\lambda_p} \quad (IV.5)$$

- Dans le cas de vitesse telle que $L > 5,0$:

$$\Delta T_m = \frac{0.31Q_p}{a.\lambda_p} \sqrt{\frac{\chi_p}{V.a}} \quad (IV.6)$$

Chapitre IV : Influence des paramètres thermoélectromécaniques sur le comportement en frottement sec des couples cuivre-acier et cuivre-graphite

La quantité de chaleur par unité de temps du pion est exprimée par :

$$Q_p = Q_m + Q_e + Q_a \quad (IV.7)$$

- Sans passage de courant électrique :

$$Q_p = Q_m = \mu \cdot P \cdot V \quad (IV.8)$$

- En présence du courant et sans arc électrique :

$$Q_p = Q_m + Q_e = \mu \cdot P \cdot V + R_c \cdot I^2 \quad (IV.9)$$

- En présence du courant et avec arc électrique :

$$Q_p = Q_m + Q_e + Q_a = \mu \cdot P \cdot V + R_c \cdot I^2 + V \cdot I \quad (IV.10)$$

Q_m la quantité de chaleur par frottement, Q_e quantité de chaleur électrique et Q_a quantité de chaleur due à l'arc électrique.

Avec α variant de 0,85 à 0,35, lorsque L varie de 0,1 à 5. La relation entre L et α est donnée par :

$$\alpha = -0,102 \cdot L + 0,860 \quad (IV.11)$$

$$\lambda_p \text{ (cuivre)} / \lambda_d \text{ (acier)} = 25 \text{ et } \lambda_p \text{ (cuivre)} / \lambda_d \text{ (graphite)} = 14$$

IV.3.3. Evaluation de l'épaisseur critique de la couche d'oxyde de cuivre

La résistance électrique de contact R_c entre les zones de contact réel des matériaux en frottement s'exprime en fonction de :

- La résistance de constriction :

$$R_{\text{const}} = \frac{\rho_{\text{cu}}}{2 \cdot a} \quad (IV.12)$$

- La résistance de la couche d'oxyde :

$$R_{\text{oxyd}} = \frac{\sigma_o}{\pi \cdot a^2} \quad \text{avec : } \sigma_o = \zeta \cdot \rho_o \quad (IV.13)$$

- La résistance de contact est la somme des résistances de constriction et du film [2] :

$$R_c = \frac{\rho_{\text{cu}}}{2 \cdot a} + \frac{\rho_o \cdot \zeta_c}{\pi \cdot a^2}$$

Chapitre IV : Influence des paramètres thermoélectromécaniques sur le comportement en frottement sec des couples cuivre-acier et cuivre-graphite

$$\text{Avec : } \zeta_c = \frac{\pi a^2 R_c}{\rho_o} \quad (\text{IV.14})$$

IV.3.4. Evaluation de la contrainte de rupture

La relation exprimant la force de cisaillement à rupture est :

$$F_{\text{frott}} = \tau_{\text{rup}} \cdot \pi a^2 \quad (\text{IV.15})$$

La contrainte de rupture est :

$$\tau_{\text{rup}} = \frac{F_{\text{frott}}}{\pi a^2} \quad \text{ou : } \tau_{\text{rup}} = 0,6.H \quad (\text{IV.16})$$

IV.3.5. Evaluation du champ électrique de rupture

Le champ électrique de rupture est exprimé par la relation :

$$E = \frac{R_c.I}{\zeta_c} \quad (\text{IV.17})$$

IV.3.6. Evolution du rayon de contact en fonction de la charge

La figure IV.7 présente la variation du rayon de contact en fonction de la charge normale pour les deux couples à faible et forte oxydation. On constate qu'il y a une proportionnalité entre la charge et le rayon de contact.

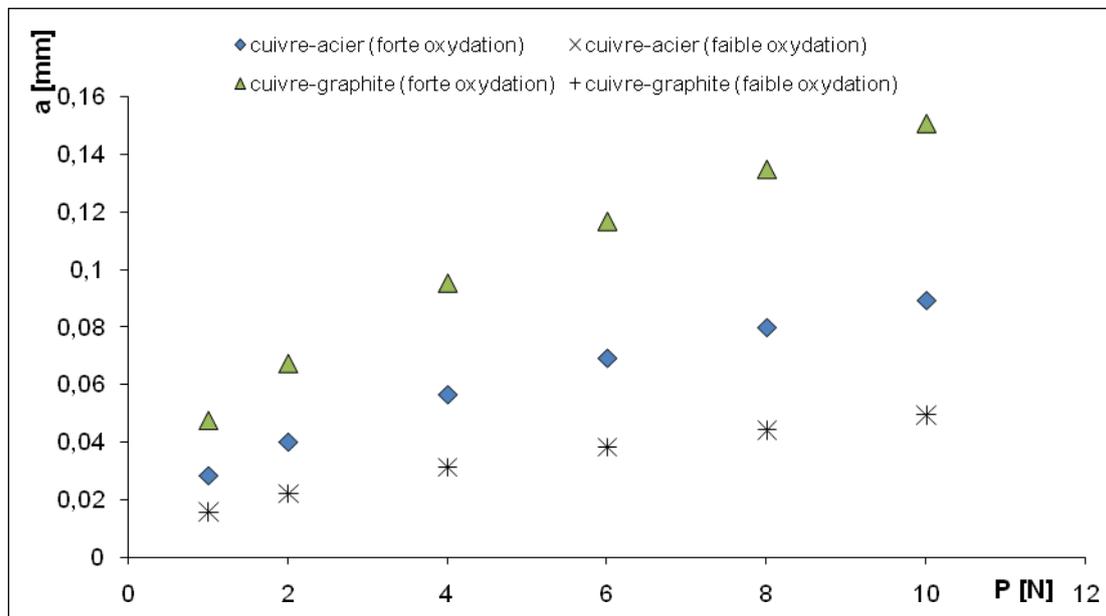


Figure IV.7. Variation du rayon de contact en fonction de la charge pour les deux couples à faible et forte oxydation ($V = 7 \text{ m/s}$ et $t = 60 \text{ mn}$).

IV.3.7. Evolution de l'épaisseur du film d'oxyde en fonction de la charge normale

La figure IV.8 montre une évolution quasi linéaire de l'épaisseur du film d'oxyde en fonction de la charge normale pour les deux couples. En examinant ces droites on remarque que la croissance de l'épaisseur de la couche d'oxyde est beaucoup plus importante pour le couple cuivre-graphite (520 Å) surtout en présence du courant électrique (forte oxydation). Par contre, en absence du courant (faible oxydation), cette épaisseur devient à peu près le quart ($\xi_{I=10A} = 4.\xi_{I=0A}$). Pour le couple cuivre-acier, l'épaisseur de la couche d'oxyde sur le cuivre est proche de celle sans courant et l'influence du courant est quasi insignifiante.

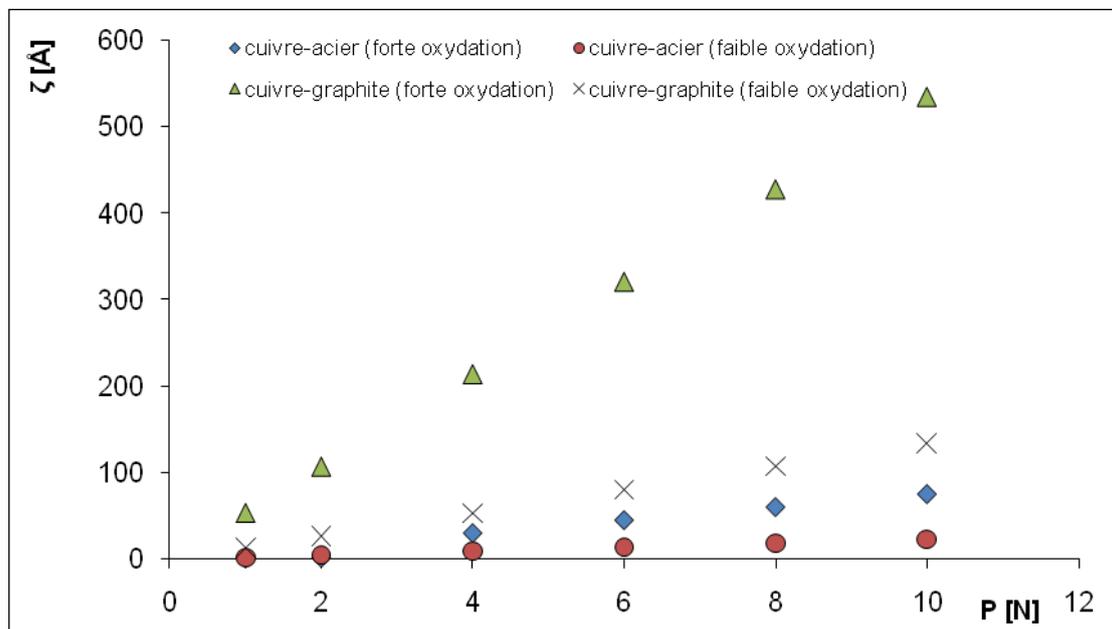


Figure IV.8. Variation de l'épaisseur du film d'oxyde en fonction de la charge normale pour les deux couples à faible et forte oxydation (($V = 7$ m/s et $t = 60$ mn))

IV.3.8. Evolution de l'épaisseur du film d'oxyde en fonction du rayon de contact

Cette figure illustre la variation de l'épaisseur du film d'oxyde en fonction du rayon de contact a . On constate que l'épaisseur augmente proportionnellement avec le rayon a et ce, quel que soit le couple glissant. La remarque précédente ($\xi = f(p)$) reste valable pour la variation de $\xi = f(a)$.

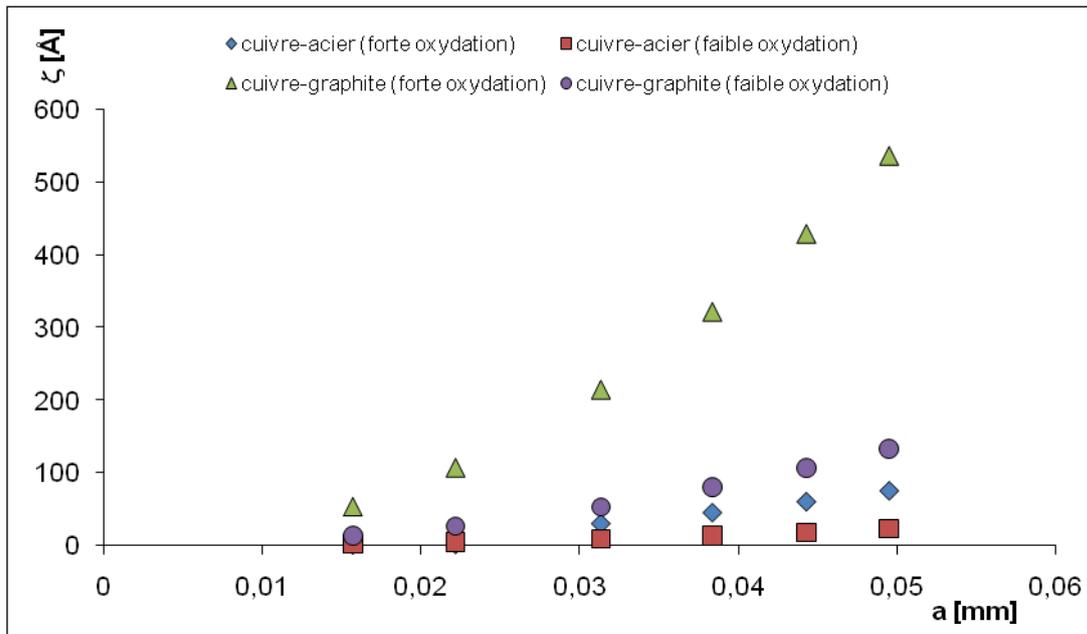


Figure IV.9. Variation de l'épaisseur du film d'oxyde en fonction du rayon de contact pour les deux couples à faible et forte oxydation ($V = 7$ m/s, $P = 10$ N et $t = 60$ mn)

IV.3.9. Evolution de la quantité de chaleur en fonction du rayon de contact

La figure IV.10 montre la variation de la quantité de chaleur en fonction du rayon de contact $Q_p = f(a)$. On remarque que Q_p augmente sensiblement avec le rayon et le couple cuivre-acier présente une quantité de chaleur du pion supérieure à celle du couple cuivre-graphite. Cela est dû aux propriétés thermiques du cuivre qui sont meilleures (~ 25 fois).

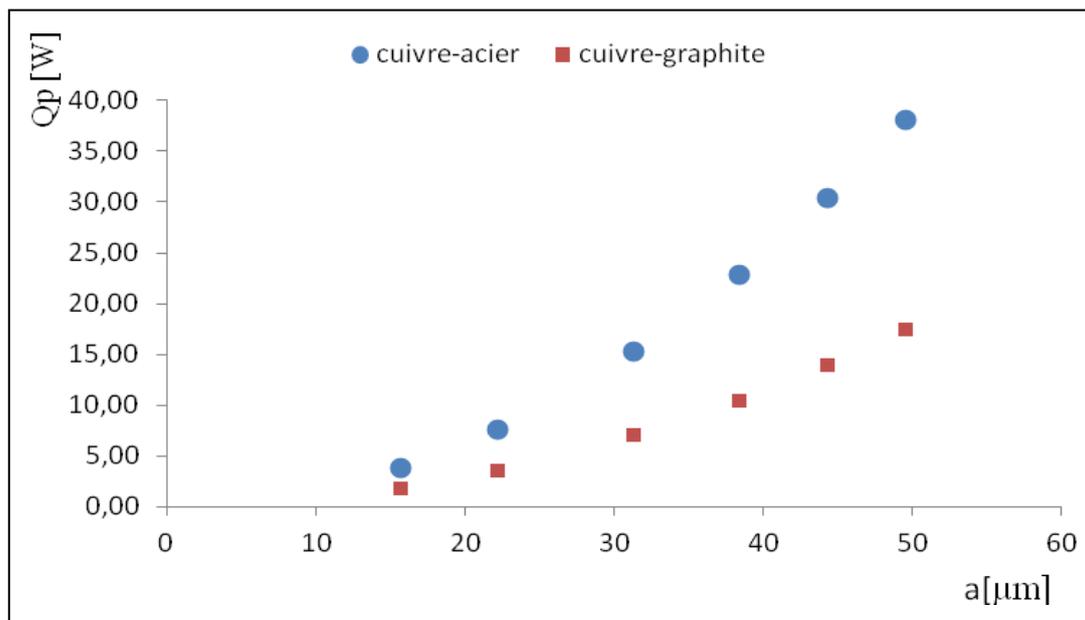


Figure IV.10. Variation de la quantité de chaleur en fonction du rayon de contact pour les deux couples à faible et forte oxydation ($V = 7$ m/s, $P = 10$ N et $t = 60$ mn).

IV.3.10. Evolution de l'élévation de la température de contact en fonction de la charge normale avec passage du courant électrique

L'évolution de ΔT en fonction de la charge normale pour une intensité du courant électrique de 10A est présentée dans la figure IV.11. On constate que la valeur de l'élévation de la température pour les deux couples, à forte oxydation, est plus grande que celle à faible oxydation.

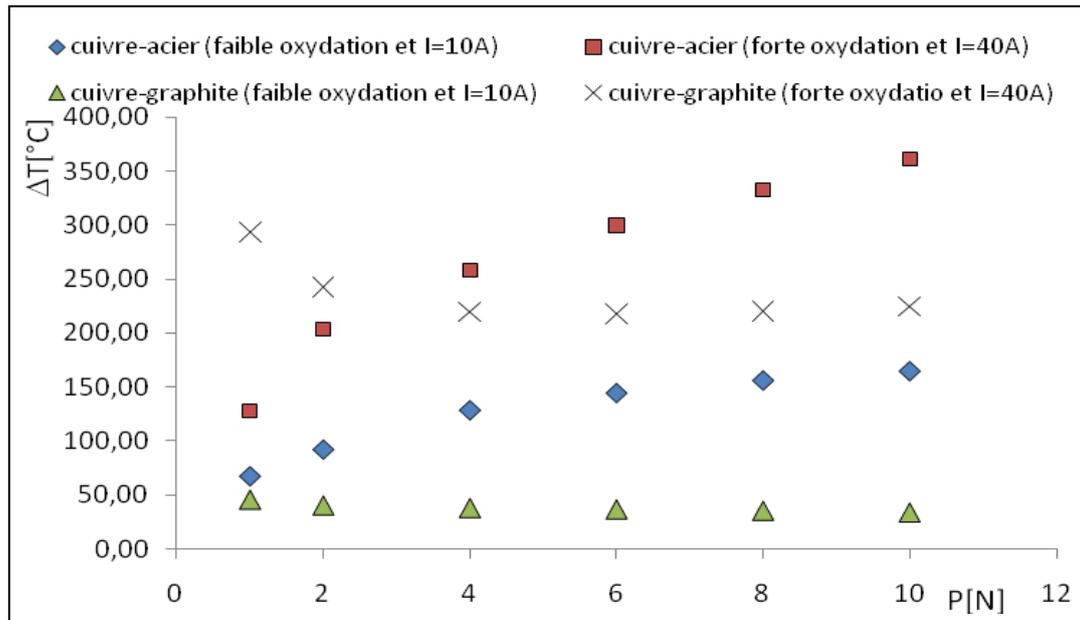


Figure IV.11. Variation de l'élévation de la température de contact en fonction de la charge normale en présence du courant électrique pour les deux couples à faible et forte oxydation ($V = 7$ m/s et $t = 60$ mn).

IV.3.11. Evolution de l'élévation de la température de contact en fonction de la charge normale

La figure IV.12 présente l'évolution de l'élévation de la température en fonction de la charge normale, sans passage du courant électrique. On constate que ΔT présente une allure sensiblement croissante avec la charge et que la variation de la température du couple cuivre-graphite, à faible oxydation, est plus faible que l'autre couple.

Chapitre IV : Influence des paramètres thermoélectromécaniques sur le comportement en frottement sec des couples cuivre-acier et cuivre-graphite

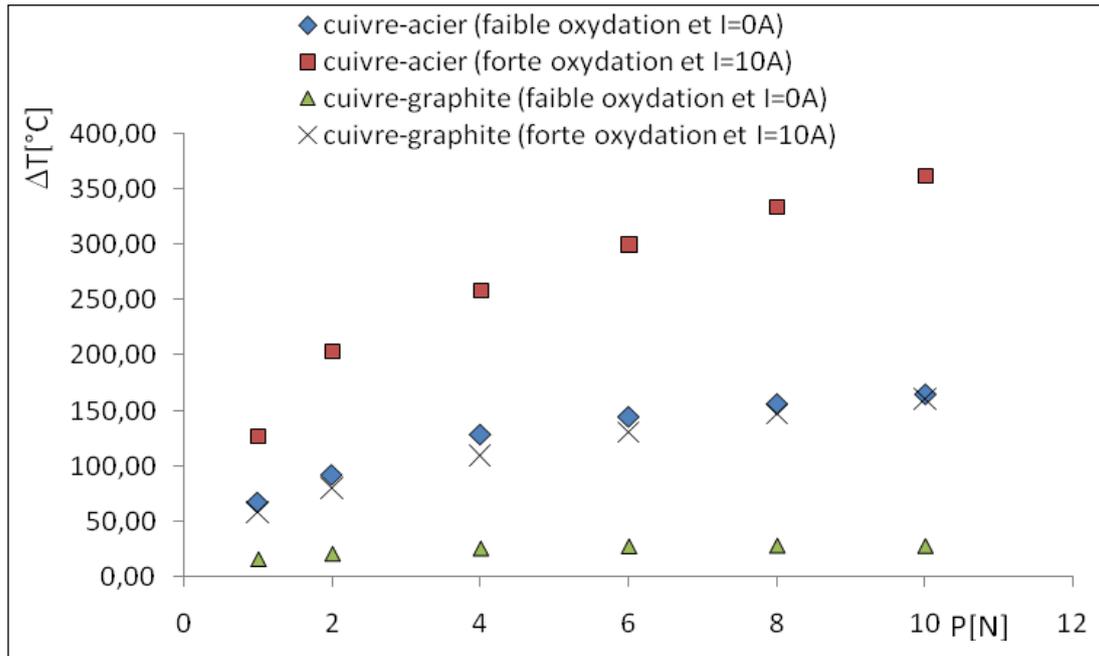


Figure IV.12. Variation de l'élévation de la température de contact en fonction de la charge normale pour les deux couples à faible et forte oxydation ($V = 7$ m/s et $t = 60$ mn)

IV.4. VALEURS CALCULEES

IV.4.1. Contact cuivre-acier

- pour une rupture dans le cuivre avec $P = 10$ N, $H_v = 4.10^8$ Pa et $\mu = 0,58$, on obtient un rayon de la zone réelle de contact $a = 89$ μ m.

- pour une rupture dans l'oxyde de cuivre dont la dureté est de l'ordre de $H_v = 13.10^8$ Pa, on obtient un rayon du cercle de contact de l'ordre de 50 μ m ($50 \leq a \leq 90$ μ m). En prenant les valeurs limites de a et la vitesse de 7 m/s, en l'absence et en présence de courant électrique traversant l'interface, on obtient les résultats, consignés dans le tableau IV.1.

Chapitre IV : Influence des paramètres thermoélectromécaniques sur le comportement en frottement sec des couples cuivre-acier et cuivre-graphite

Tableau IV.1 : Couple cuivre-acier

I [A]	0		40			
a [μm]	50	90	50	90	50	90
L	1,53	2,77	1,53	2,77	1,53	2,77
α	0,7	0,58	0,7	0,58	0,7	0,58
Q_p [w]	38,04	38,04	39,96	39,96	57,24	57,24
ΔT_m [$^{\circ}\text{C}$]	350,17	159,57	367,85	167,62	526,93	240,11
$\tau_{rup} \cdot 10^8$ [pa]	7,8	2,4	7,8	2,4	7,8	2,4
R_c [m Ω]	-		1,2		12	
E [V/m]	0		$24 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^6$	$24 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^6$
ζ [\AA]			2	8	20	80

IV.4.2. Contact cuivre-graphite

- pour une rupture dans le cuivre avec $P = 10$ N, $H_v = 4 \cdot 10^8$ Pa et $\mu = 0,28$, on obtient $a = 89 \mu\text{m}$.

- pour une rupture dans l'oxyde du cuivre dont la dureté est de l'ordre de $H_v = 13 \cdot 10^8$ Pa, on obtient $a = 49 \mu\text{m}$.

- dans le cas d'une rupture dans le graphite : $H = 1,4 \cdot 10^8$ Pa, le rayon du cercle de contact est de l'ordre de $150 \mu\text{m}$ ($49 \leq a \leq 150 \mu\text{m}$). En prenant comme précédemment les deux cas extrêmes, $a = 49 \mu\text{m}$ (Cu_2O) et $a = 150 \mu\text{m}$ (graphite), cas les plus généraux pour le tribocontact cuivre-graphite. Les valeurs obtenues sont données dans le tableau IV. 2.

Tableau IV.2. Couple cuivre-graphite

I [A]	0		40			
a [µm]	49	150	49	150	49	150
L	1,53	4,67	1,53	4,67	1,53	4,67
α	0,7	0,38	0,7	0,38	0,7	0,38
Q_p [w]	17,44	17,44	65,44	65,44	129,44	129,44
ΔT_m [°C]	160,54	28,7	602,44	107,7	1191,65	213,03
τ_{rup}·10⁸ [pa]	7,8	0,84	7,8	0,84	7,8	0,84
R_c [mΩ]	-		30		70	
E [V/m]	0		20·10 ⁶	2,4·10 ⁶	28·10 ⁶	2,8·10 ⁶
ζ [Å]			60	500	100	1000

IV.5. DISCUSSION

IV.5.1. Effet de la charge normale sur le frottement

Si on augmente la charge de 2 à 20 N, le coefficient de frottement en fonction de la charge suit une loi presque linéaire pour le couple cuivre-acier (Fig. IV.2). Pour des charges supérieures ou égales à 15 N, la résistance électrique de contact diminue et se stabilise (~1,5 mΩ). La plupart des particules arrachées sont du métal (surtout du cuivre), la force de frottement augmente linéairement avec la charge. Ceci traduit un accroissement de la surface réelle de contact (Fig. IV.7) et le coefficient de frottement reste sensiblement constant. On est donc toujours dans un domaine de contact réel adhésif [4]. En ce qui concerne le couple cuivre-graphite, la diminution de la charge normale entraîne une augmentation du champ électrique [6]; par conséquent l'influence du courant électrique sur le comportement en frottement augmente quand la charge normale diminue.

IV.5.2. Effet de la vitesse sur le frottement

- dans le domaine de faibles vitesses, entre 0,25 et 1,2 m/s, le coefficient de frottement est élevé, car les jonctions métalliques ont le temps nécessaire pour accroître leurs sections par fluage et la surface réelle de contact s'élargit radialement et dans le sens du mouvement (forme elliptique) (Fig. III.11).

Chapitre IV : Influence des paramètres thermoélectromécaniques sur le comportement en frottement sec des couples cuivre-acier et cuivre-graphite

- dans le domaine de vitesses comprises entre 1,2 et 4 m/s, d'une part, la température croît et l'oxydation augmente (Figs. IV.8-12). Le nombre de contacts métalliques est réduit par génération d'une couche d'oxyde sur la face frottante du pion (Fig. IV.3). En conséquence, elle diminue le frottement et protège la surface contre l'endommagement en offrant une bonne résistance à l'usure.
- dans le domaine de vitesses plus élevées, $4 \leq V \leq 7$ m/s, la température augmente encore, un ramollissement du cuivre survient, l'oxyde se désagrège, on observe un coefficient de frottement sensiblement constant.

IV.5.3. Effet du courant électrique sur le frottement

- pour $0 \leq I \leq 20$ A : Le coefficient de frottement moyen est plus ou moins constant (Figs. IV.4 et IV.5) par contre, les évolutions de $\mu = f(t)$ et $R_c = f(t)$ (Fig. IV. 6) présentent des fluctuations qui augmentent avec l'intensité de courant. Les débris d'usure sont un mélange d'oxydes et de métal, la déformation de la piste de frottement augmente avec l'intensité du courant, la couche oxydée est compacte mais facilement détachable du substrat.
- pour $20 \leq I \leq 40$ A : Quelle que soit la polarité du pion de contact, les fluctuations deviennent encore plus grandes, la piste est de plus en plus détériorée, mais contrairement à ce qui se produit pour des intensités plus faibles, la pellicule d'oxyde devient très adhérente et difficilement détachable du substrat (Cu), bien que les débris recueillis soient en totalité des particules d'oxyde. Au voisinage de $I = 40$ A, le coefficient de frottement moyen a tendance à diminuer. Quand le disque est en graphite, le courant a tendance à orienter les plans basaux perpendiculairement au plan de glissement [7]. Cette tendance joue en faveur de la conduction électrique, cependant, elle diminue les caractéristiques tribologiques du graphite. Il y a alors compétition entre l'action mécanique dans le contact et l'action du courant, l'action finale résulte donc d'un équilibre entre ces deux processus. De plus, la croissance de la couche d'oxyde sur le pion en cuivre est augmentée par l'action du champ électrique (intensité du courant électrique). Cette couche protectrice empêche le transfert du cuivre sur le disque du graphite, de ce fait, les liaisons métalliques ne se forme pas à l'interface ce qui diminue le coefficient du frottement.

IV.5.4. Effet de la polarité sur le frottement

Quand le pion est anode, la vitesse de croissance de la couche d'oxyde est plus importante que lorsqu'il est cathode. En effet, quand le pion est anode, les ions positifs de cuivre diffusent à travers la couche mince d'oxyde formée sur la partie frottante du pion, pour

Chapitre IV : Influence des paramètres thermoélectromécaniques sur le comportement en frottement sec des couples cuivre-acier et cuivre-graphite

former des filaments métalliques entre les surfaces en contacts. A cause des mouvements du couple, aussitôt formés, ces liaisons se rompent et leurs extrémités nues (activées chimiquement) s'oxydent. Quand le pion est cathode, les liaisons en question ne peuvent plus se former, à cause du champ électrique qui défavorise la diffusion des ions positifs du cuivre. Toutefois, on remarque que dès que la température de l'interface augmente cet effet diminue. Des analyses de surfaces, qu'on a effectuée appuient ces résultats et montrent que, la vitesse de croissance de la couche d'oxyde Cu_2O est fortement présentée sur la face de contact avec le disque, et ceci est d'autant plus marqué que l'intensité I est élevée. Ce qui explique la diminution du coefficient μ lorsque I dépasse 25 A pour le contact cuivre-acier (Fig. IV.4). S'agissant du contact glissant cuivre-graphite, la diminution de μ en fonction de I est due à la surface du graphite et à la modification de sa structure par déformation du réseau qui diminue la rugosité de surface (Fig. IV.4).

IV.5.5. Effet du champ électrique sur le frottement

Le transfert du courant électrique à travers le contact crée un champ électrique dont la valeur est proportionnelle à l'intensité du courant et à la résistance électrique de contact. Cette dernière est inversement proportionnelle à la charge normale. Le champ électrique augmente lorsque la charge diminue, par conséquent, l'influence du courant sur le comportement en frottement, surtout du graphite, augmente quand la charge diminue. D'autre part, la direction du champ de contact est influencée par la vitesse de glissement quand le disque est en graphite. En effet, pour de faibles valeurs de cette vitesse, le champ est perpendiculaire au contact. A grande vitesse, le champ a une composante parallèle au plan de glissement [6].

Le taux d'oxydation est contrôlé par la diffusion à travers les couches superficielles. Elle dépend de la densité des défauts et de l'intensité du champ électrique de contact [8]. La croissance du film d'oxyde est accompagnée par une diminution du champ électrique de contact et par une montée des contraintes de cisaillement maximales du contact [5]. L'épaisseur critique de rupture du film peut avoir lieu soit par cisaillement soit par rupture électrique.

IV.5.6. Effet de la résistance électrique de contact sur le frottement

En examinant l'évolution de la résistance électrique de contact en fonction du temps (Fig. IV. 6) et durant une fluctuation, on remarque les successions d'événements suivants :

- lorsque la résistance électrique de contact augmente, μ diminue simultanément, ceci peut s'interpréter par la création sur les surfaces d'un dépôt d'impuretés, probablement un mélange

Chapitre IV : Influence des paramètres thermoélectromécaniques sur le comportement en frottement sec des couples cuivre-acier et cuivre-graphite

d'oxydes de métal transféré et de particules d'usure provenant des surfaces, jouant le rôle de lubrifiant. La rupture du film est cyclique et a lieu à partir d'une épaisseur critique caractérisée par une variation de la résistance électrique de contact ΔR_c (Fig. IV. 6).

- par contre, au moment où μ augmente, on assiste durant cette période, vraisemblablement à une rupture du film d'oxyde (d'où diminution de μ), par action mécanique et/ou électrique [12] et la mise en contact des surfaces métalliques nues favorise le passage du courant électrique.

IV.5.7. Effet de l'élévation de température sur le frottement

ΔT_m indique l'élévation de température localisée à la zone de contact réel, comme le pion de cuivre a une conductivité thermique élevée par rapport à celle de l'acier (environ 25 fois) [10] et comme son coefficient de transfert global avec l'extérieur est réduit, la température du pion s'élève en fonction du temps jusqu' à équilibre thermique (tableau IV.1). A cause des propriétés thermiques du graphite qui sont meilleures (~14 fois), cette élévation est plus marquée lorsque le pion est en contact avec le disque en graphite (tableau IV.2). On a mesuré (en utilisant un thermocouple placé dans le pion à 2 mm de la surface de contact), des températures du pion comprises selon les conditions de fonctionnement du couple (Fig. IV.11 et IV.12) entre 30 et 350°C environ, ce qui donne des températures à l'interface pouvant atteindre des valeurs beaucoup plus élevées que celles mesurées.

IV.5.8. Effet de l'arc électrique sur le frottement

Des analyses spectroscopiques par dispersion d'énergie [8], ont révélé l'existence de transfert d'éléments de fer, de chrome et quelques traces de nickel. La figure IV.13 montre les cratères creusés à la surface du cuivre par les arcs électriques. Leur diamètre varie de 10 à 20 μm . La fusion du métal, sous l'action de l'arc, quand le contact est rompu, est à l'origine de ces cratères [11]. Dans ces conditions, les températures de plasma de l'arc sont comprises entre 3500 et 4000°C [9]. La solidification des composés fusionnés, issus des matériaux en contact, donnent naissance à des particules de forme particulièrement sphériques, qui engendrent des fluctuations du coefficient de frottement (Fig. IV. 6 et IV.13).

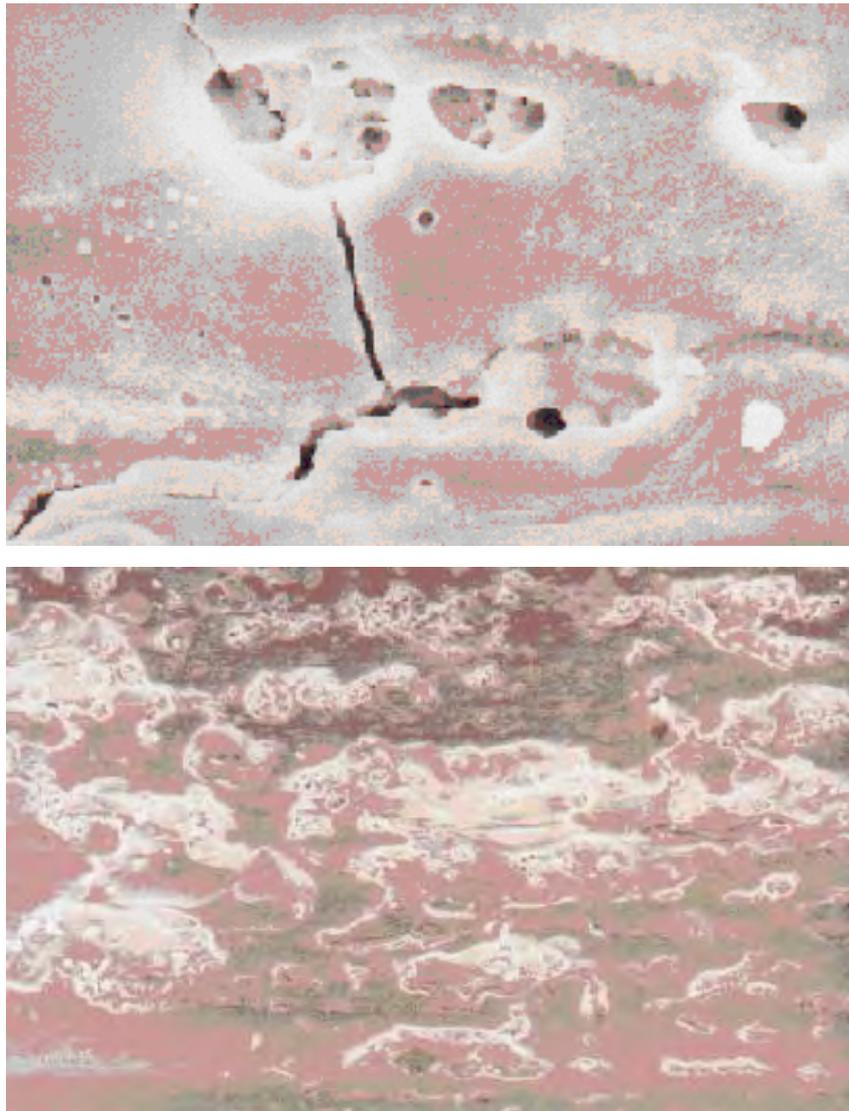


Figure IV.13. Cratères creusés à la surface de contact du cuivre en présence d’arcs électriques ($P = 10 \text{ N}$, $V = 1,2 \text{ m/s}$, $t = 30 \text{ mn}$ et $I = 40 \text{ A}$)

IV.6. CONCLUSION

Cette étude a permis d'apporter une réponse à certaines questions relatives au frottement d'un pion en cuivre soumis à une charge normale pour un contact électrique glissant contre soit un disque en acier soit un disque en graphite.

Les zones de contacts évaluées ont conduit à des aires de contact réelles dont le rayon est fonction du degré d'oxydation et de l'ordre de 50 à $90 \mu\text{m}$, pour le contact cuivre-acier, et de l'ordre de 49 à $150 \mu\text{m}$, lorsqu'il s'agit du contact cuivre-graphite. De même, l'évaluation de l'épaisseur critique des couches d'oxydes a permis de les situer entre 20 \AA et 80 \AA pour le

Chapitre IV : Influence des paramètres thermoélectromécaniques sur le comportement en frottement sec des couples cuivre-acier et cuivre-graphite

couple cuivre-acier et entre 100 Å et 1000 Å, dans le cas du contact cuivre-graphite. On a aussi évalué l'élévation de température à l'interface dans les zones de contact en fonction des conditions expérimentales; ce qui permet de mieux comprendre le rôle du comportement plastique des zones en contact, sous l'action de la contrainte de rupture et du champ électrique de rupture et leur effet sur le frottement des couples étudiés.

Il ressort donc que les paramètres thermiques, électriques et mécaniques jouent un rôle majeur dans le mécanisme de formation et de rupture des films d'oxyde formés à l'interface et régissent le comportement en frottement des couples cuivre-acier et cuivre-graphite.

Ces oxydes réduisent le nombre de jonctions métalliques, diminuent l'aire d'adhésion et le coefficient de frottement global. Leur fonction est analogue à celui d'un lubrifiant solide.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **A. Bouchoucha**. Contribution à l'étude du comportement en frottement et usure du cuivre dans un contact dynamique cuivre-acier traversé par un courant électrique. Thèse de doctorat INPL, Nancy, France (1988).
- [2] **R. Holm**. Electric contacts, Springer (1967).
- [3] **A. Bouchoucha and al**. Influence of electric fields on the tribological behavior of electrodynamical copper/steel contacts. *Wear* 203-204, 434-441, (1997).
- [4] **A. Bouchoucha et al**. Influence of the electrical sliding speed on friction and wear processes in electrical contact copper–stainless steel. *Applied Surface Science*, 223, 330-342, (2004).
- [5] **J. F. Archard**. *Wear* 2, 438-455, (1958/1959).
- [6] **E. Hounkponou and al**. Tribological behavior of graphite/graphite and graphite/copper couples in sliding electrical contact: influence on the contact electric field on the surface passivation. *Applied Surface Science* 70/71, 176-179, (1993).
- [7] **H. Zahouani and al**. Effect of roughness scale on contact stiffness between solids, *Wear* 04.067, (2008).
- [8] **A. Bouchoucha and al**. *Surface and Coatings Technology* 76-77, 521-52, (1995).
- [9] **S. Jacobson and S. Hogmark**. Surface modifications in tribological contacts, *Wear* 04.035S, (2008).
- [10] **N. Laraqi and al**. Temperature and division of heat in a pin-on-disc frictional device-Exact analytical solution, *Wear* (2008) 08.016.
- [11] **Woo Park Y and al**. The influence of current load on fretting of electrical contacts. *Tribology International*, 09.004L, (2008).
- [12] **C. Boubechou, A. Bouchoucha, H. Zaidi**. Tribological analysis of formation and rupture of oxide films in an electrical sliding contact copper-steel. *Study of Civil Engineering and Architecture (SCEA) Volume 3*, 54- 58, (2014).

CHAPITRE V

INFLUENCE DE LA VITESSE, LA CHARGE NORMALE ET L'INTENSITE DU COURANT ELECTRIQUE SUR LE COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE DES COUPLES GLISSANTS ACIER-ACIER ET LAITON-ACIER

V.1. INTRODUCTION

Dans le cas de deux surfaces métalliques en contact et sous l'action combinée de la charge normale et la force tangentielle, les pics des aspérités qui constituent la surface réelle sont soumis à des contraintes de contacts élevées et des variations importantes de température [1]. En effet, l'interface dissipe l'énergie mécanique due au frottement (proportionnelle à la charge et à la vitesse) et devient source de chaleur. Si on fait passer un courant électrique à travers le contact, dans ce cas, en plus de la dissipation de chaleur mécanique, s'ajoute la dissipation par effet Joule [2] et dans certaines conditions celle des arcs électriques. De plus, l'intensité du courant électrique et sa polarité induisent un champ électrique dans le contact qui favorise le processus d'oxydation, et donc la croissance du film d'oxyde qui joue un rôle majeur et détermine la durée de service des couples électriques glissants [3].

Dans ce chapitre on présente les résultats tribologiques expérimentaux et analytiques des contacts glissants à l'air ambiante avec ou sans passage du courant électrique pour comparer les phénomènes observés. La discussion des résultats repose sur les résultats expérimentaux, les calculs théoriques, les phénomènes interfaciaux résultants du processus de frottement et usure des deux couples antagonistes, les observations et les analyses par microscopie électronique à balayage, microscope et profilomètre optique effectuées sur des pions en laiton et en acier A60 ayant frotté sur l'acier 42CrMo4 pour des charges allant de 5 N à 30 N, des vitesses de 0,1 m/s à 0,5 m/s et des intensités du courant de 3A à 10 A pendant 30 minutes.

V.2. RESULTATS EXPERIMENTAUX

V.2.1. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps

La figure V.1 montre l'évolution du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps des deux couples. Sur cette courbe on peut distinguer deux zones distinctes :

Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

a) Première zone ($t = 0$ à 10 min) : il s'agit d'une phase transitoire (de rodage), au cours de laquelle le coefficient de frottement évolue entre deux valeurs extrêmes pour le couple laiton-acier et une forte diminution pour le couple acier-acier.

b) Deuxième zone ($t = 10 - 30$ min) : elle caractérise un régime stationnaire, dans lequel l'état d'équilibre est établi par stabilité des conditions de fonctionnement à l'interface. Pour la deuxième zone, le coefficient de frottement se stabilise à la valeur $\mu = 0,23$ pour le couple laiton-acier mais ce coefficient indique une augmentation, pour atteindre une valeur de $\mu = 0,47$ pour le deuxième couple.

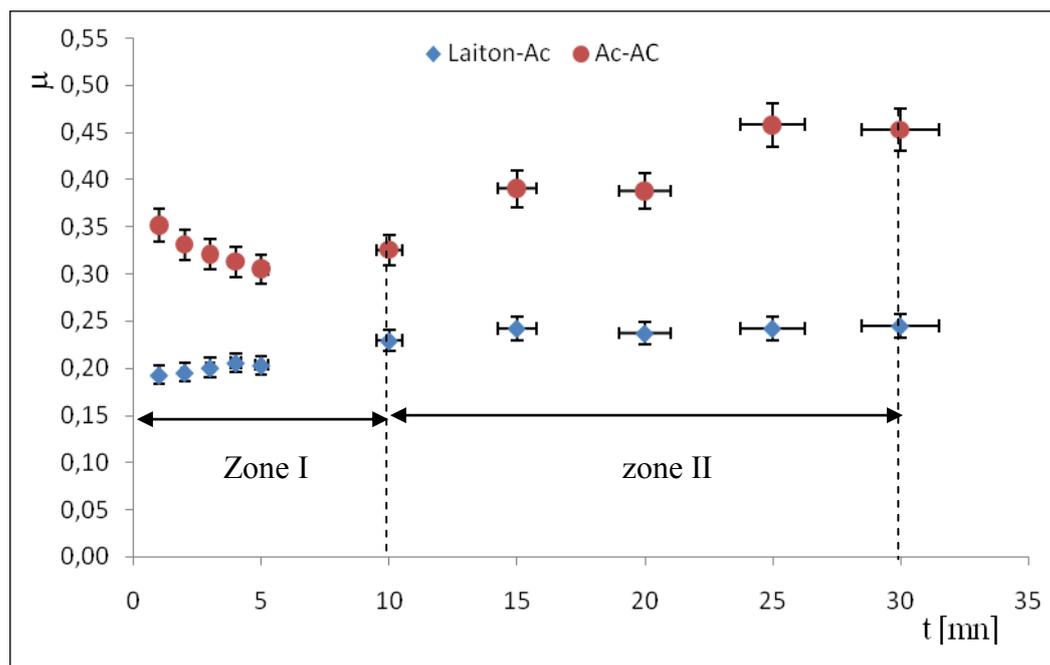


Figure V.1. Variation du coefficient de frottement en fonction du temps pour les deux couples ($P = 20$ N, $V = 0,5$ m/s et $I = 0$ A).

V.2.2. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps avec passage du courant électrique

Cette figure présente la variation du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps pour les deux couples avec passage du courant électrique. En examinant cette figure, on constate que le coefficient de frottement est stable durant toute la période de 30 minutes pour le couple laiton-acier, par contre, pour le couple acier-acier, on observe une dispersion des points pendant les cinq premières minutes puis une stabilité des points est enregistrée.

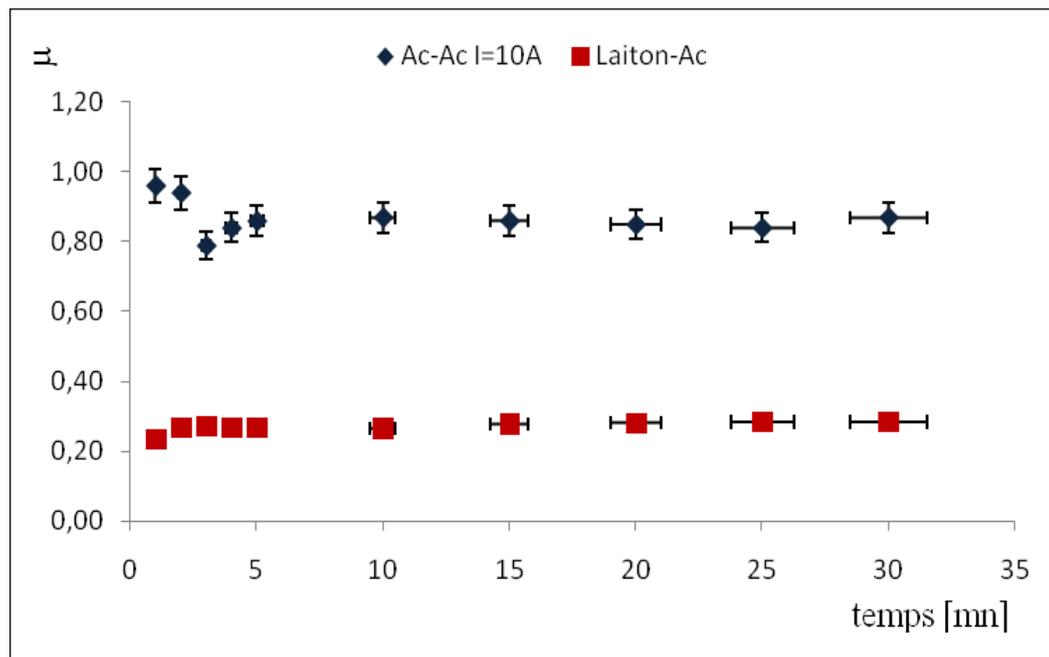


Figure V.2. Variation du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps pour les deux couples ($P = 20 \text{ N}$, $V = 0,5 \text{ m/s}$ et $I = 10 \text{ A}$)

V.2.3. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la charge normale

La figure V.3 montre l'évolution du coefficient de frottement avec la charge normale pour les deux couples glissants. On constate également deux phases :

- phase I : le coefficient de frottement diminue progressivement aux faibles charges,
- phase II : le coefficient de frottement se stabilise aux alentours de $\mu = 0,25$ pour le couple laiton-acier et $\mu = 0,5$ pour le couple acier-acier.

En outre, l'examen de cette figure indique qu'il y a une diminution initiale entre 5 et 10 N ensuite, le coefficient de frottement se stabilise à une valeur ($\mu \sim 0,23$) pour le couple laiton-acier. En revanche, pour le contact acier-acier, le coefficient de frottement se stabilise aux alentours de $\mu = 0,46$.

V.2.4. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la charge normale avec passage du courant électrique

La figure V.4 donne la variation du coefficient de frottement en fonction de la charge normale pour une intensité du courant électrique fixée à 10 A. Cette courbe a une allure décroissante pour les deux couples. En effet, le coefficient de frottement diminue de $\sim 0,98$,

Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

pour le contact acier-acier et $\sim 0,64$ pour le contact laiton-acier, pour atteindre la valeur de $\sim 0,42$ pour le couple acier-acier et $\sim 0,24$ pour l'autre couple.

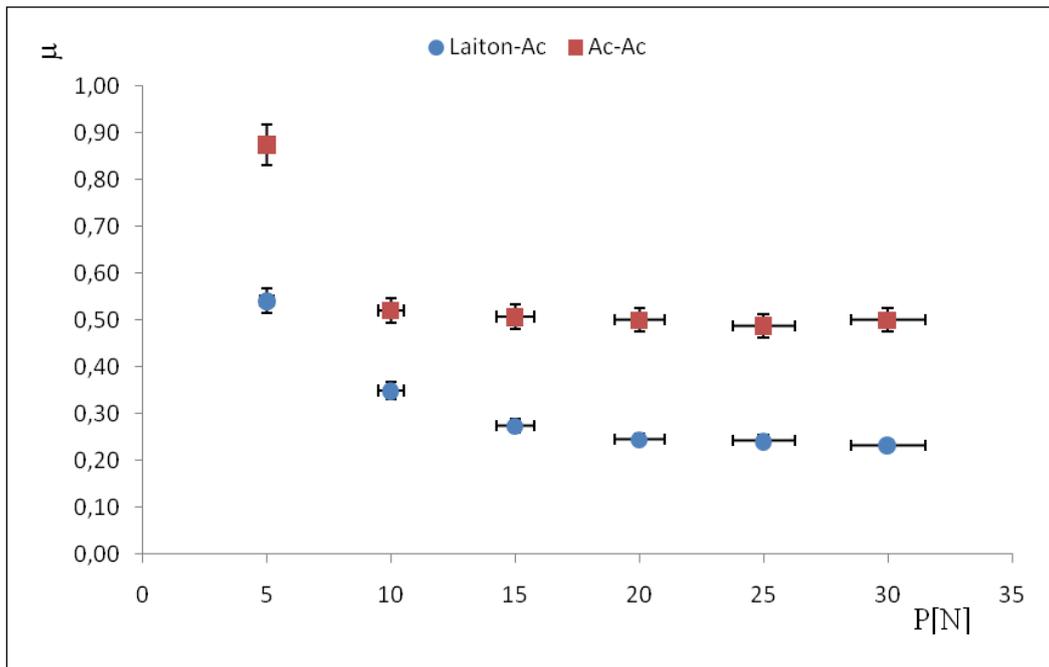


Figure V.3. Variation du coefficient de frottement en fonction de la charge normale ($V = 0,5$ m/s, $t = 30$ mn et $I = 0$ A).

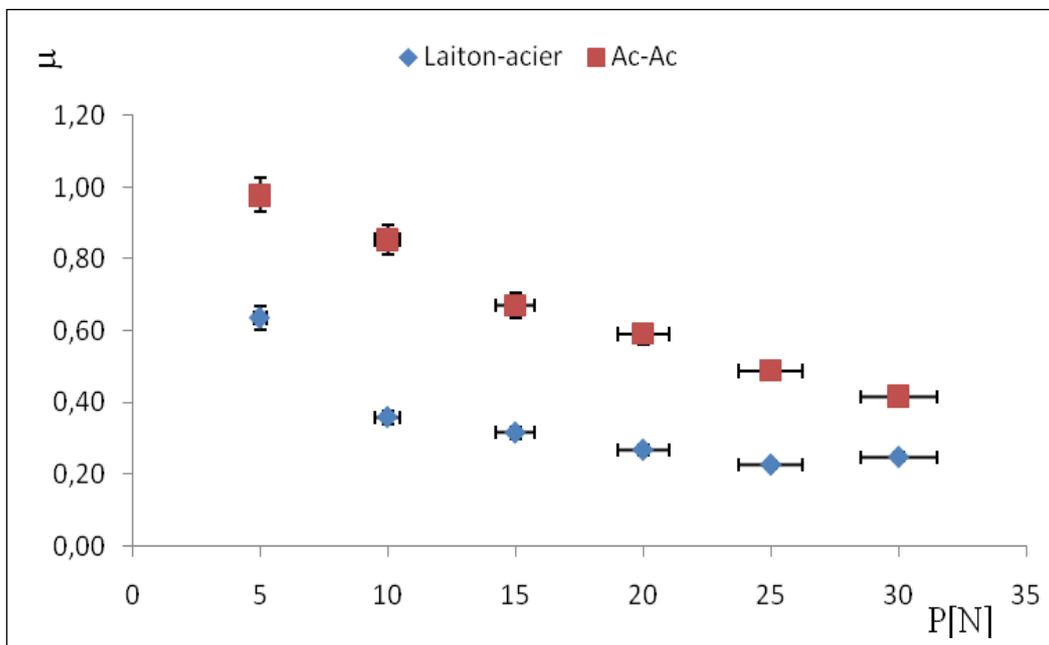


Figure V.4. Variation du coefficient de frottement en fonction de la charge avec le passage du courant électrique ($I = 10$ A, $V = 0,5$ m/s et $t = 30$ mn).

V.2.5. Evolution du coefficient de frottement avec la vitesse de glissement

Sur les courbes de la figure V.5, on peut constater deux zones différentes pour le contact dynamique acier-acier :

- la première zone : $0,1 \leq V \leq 0,2$ m/s, le coefficient de frottement μ croît légèrement pour atteindre une valeur maximale de 0,50.
- la deuxième zone : $0,2 < V \leq 0,5$ m/s, le coefficient de frottement se stabilise à une valeur limite de $\mu = 0,50$.

En revanche, pour le couple laiton-acier, le coefficient de frottement présente une dépendance linéaire avec la vitesse de glissement et demeure constant quelle que soit la valeur de la vitesse.

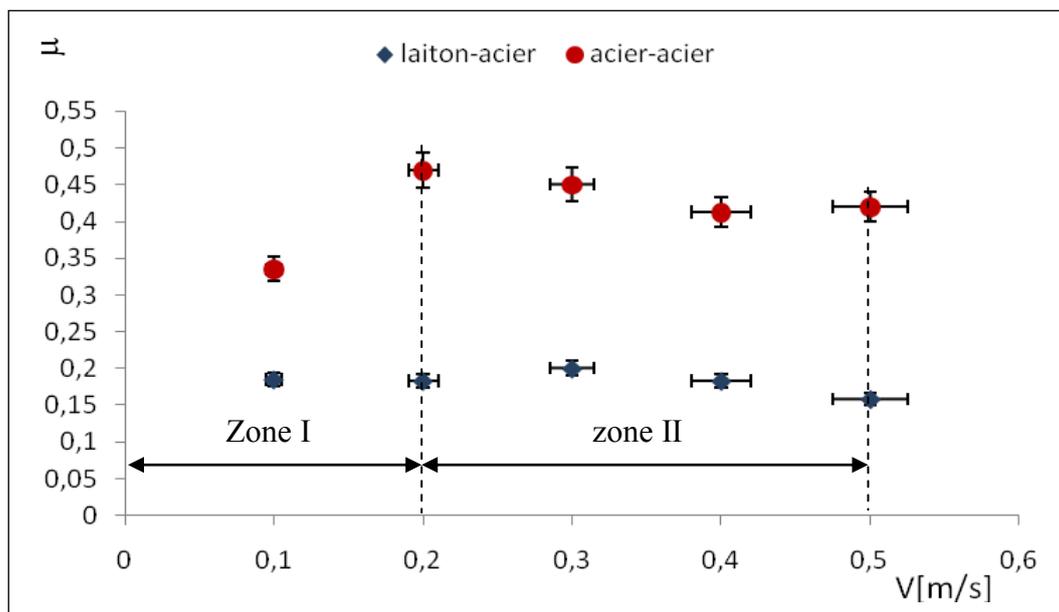


Figure V.5. Variation du coefficient du frottement en fonction de la vitesse de glissement pour les deux couples ($P = 20$ N, $t = 30$ mn et $I = 0$ A).

V.2.6. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement avec passage du courant électrique

La figure V.6 montre la variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement lorsque l'interface est traversée par un courant électrique. On constate que le coefficient de frottement garde une allure sensiblement constante ($\mu = 0,25$) pour le contact laiton-acier. Pour le couple acier-acier, le coefficient de frottement évolue progressivement de 0,80 jusqu'à une valeur maximale de 0,98.

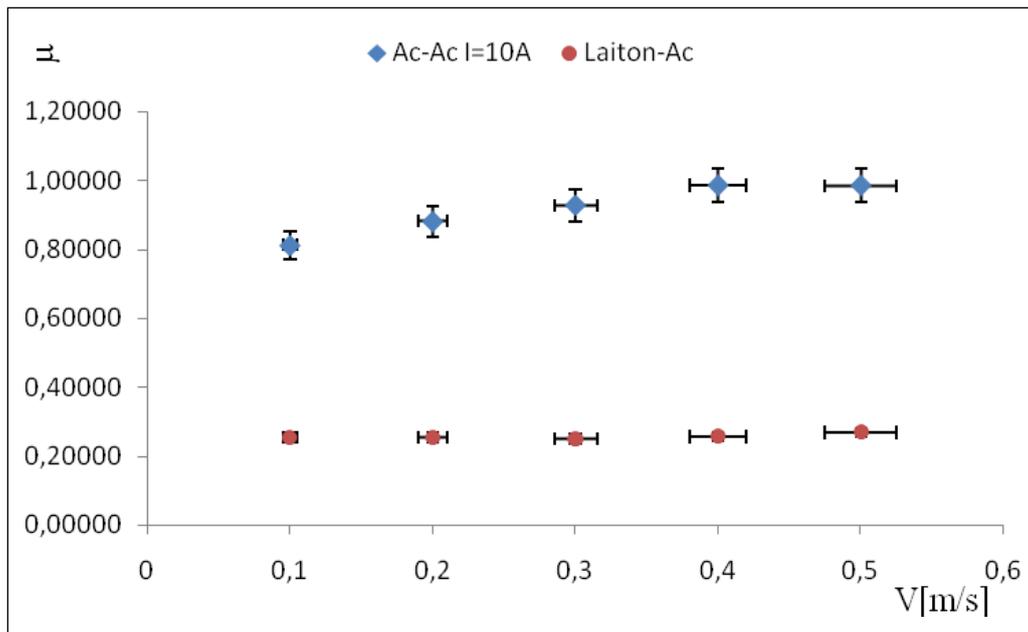


Figure V.6. Variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse avec passage du courant électrique pour les deux couples ($P = 20 \text{ N}$, $t = 30 \text{ mn}$ et $I = 10 \text{ A}$)

V.2.7. Evolution du coefficient de frottement en fonction de l'intensité du courant électrique

La figure V.7 donne l'évolution du coefficient de frottement en fonction de l'intensité du courant électrique pour les deux contacts glissants. On remarque par ailleurs, que les courbes représentatives $\mu = f(I)$ sont sensiblement des droites pour chacun des deux couples. Par conséquent, l'intensité du courant électrique n'a pas d'influence significative sur le coefficient de frottement.

V.2.8. Evolution de l'usure en fonction de la charge normale sans passage du courant électrique

La figure V.8 illustre l'évolution de l'usure en fonction de la charge normale appliquée pour les deux couples. On constate que la variation de l'usure est une fonction linéaire croissante avec la charge normale et est plus importante pour le contact acier-acier que pour le contact laiton-acier.

Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

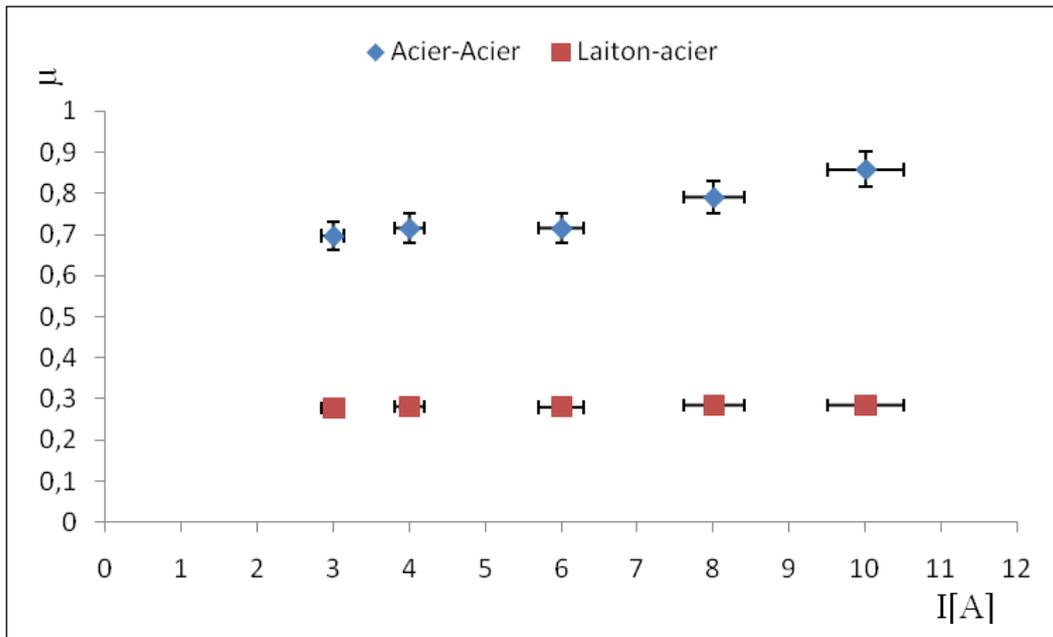


Figure V.7. Variation du coefficient de frottement en fonction du courant électrique pour les deux couples dynamiques ($P = 20$ N, $V = 0,5$ m/s et $t = 30$ mn).

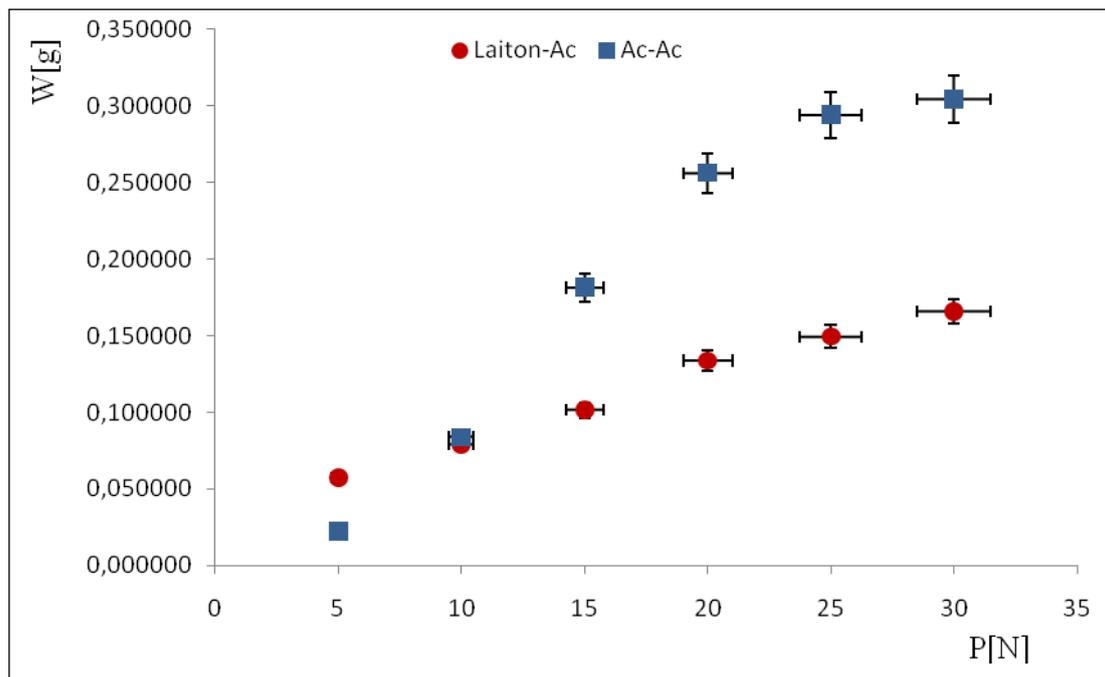


Figure V.8. Variation de l'usure en fonction de la charge normale pour les deux couples glissants ($V = 0,5$ m/s, $t = 30$ mn et $I = 0$ A).

V.2.9. Evolution de l'usure en fonction de la charge normale avec passage du courant électrique

La figure V. 9 illustre la variation de l'usure en fonction de la charge normale pour les deux couples glissants avec passage du courant électrique. En examinant cette figure, on note que W présente un accroissement important pour le contact acier-acier par rapport au contact laiton-acier.

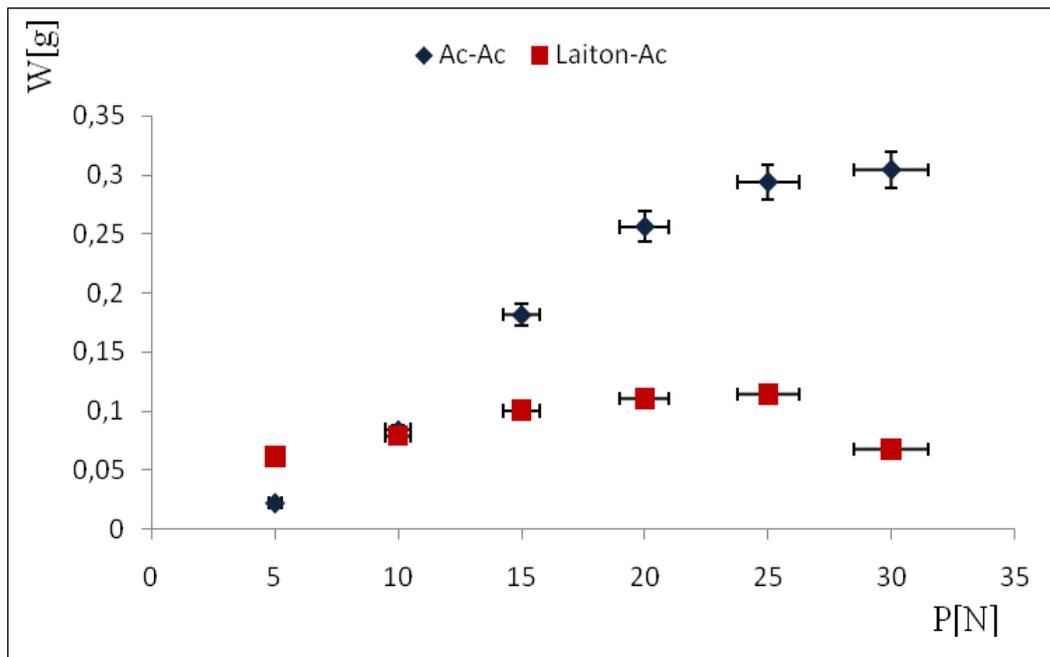


Figure V.9. Variation de l'usure en fonction de la charge normale avec passage du courant électrique pour les deux couples glissants ($V = 0,5$ m/s, $t = 30$ mn et $I = 10$ A).

V.2.10. Evolution de l'usure en fonction de l'intensité du courant électrique

La figure V.10, illustre l'évolution de l'usure en fonction de l'intensité de courant I , sur les courbes expérimentales obtenues on constate ce qui suit :

- pour le couple acier-acier : l'usure diminue avec I , elle passe de $W_{\max} = 360$ mg à $W_{\min} = 200$ mg quand I varie de 3 à 10 A.
- pour le couple laiton-acier : l'usure présente une augmentation relative de l'usure de 100 à 150 mg lorsque I varie de 3 à 10 A.

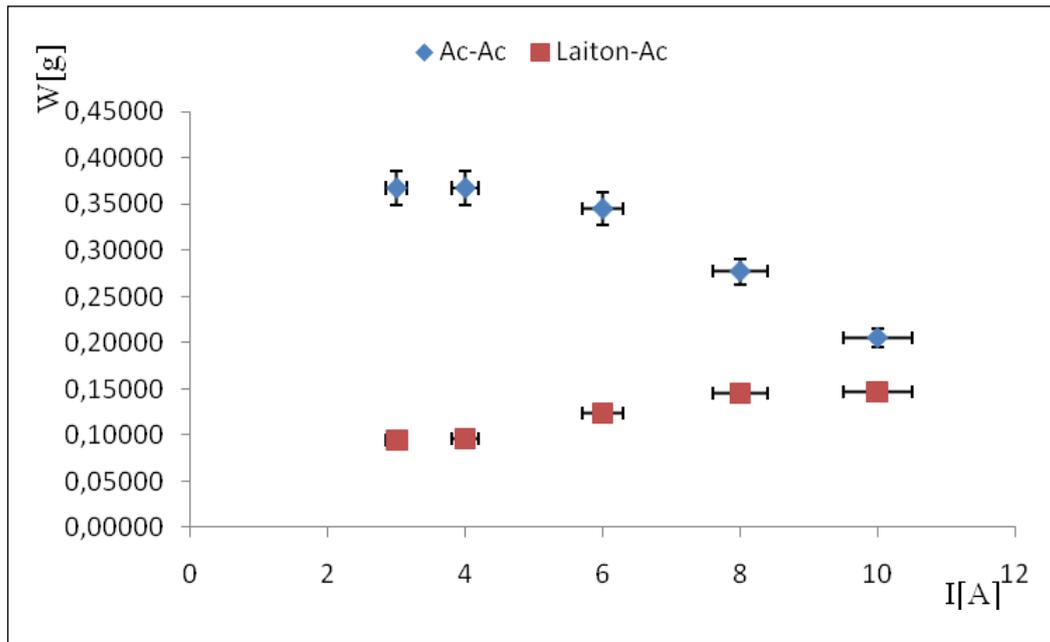


Figure V.10. Variation de l'usure en fonction du courant électrique pour les deux couples glissants ($P = 20 \text{ N}$, $V = 0,5 \text{ m/s}$ et $t = 30 \text{ mn}$).

V.2.11. Evolution de l'usure en fonction de la vitesse de glissement

La vitesse est un paramètre essentiel qui a un effet important sur l'usure des couples tribologiques étudiés. En effet, sur les courbes de la figure V. 11, on peut distinguer :

- couple acier-acier : l'usure croît d'une manière quasi linéaire avec la vitesse.
- couple laiton-acier : l'usure croît d'une manière moins significative, que précédemment, tout en ayant une allure quasi linéaire aussi, avec la vitesse.

V.2.12. Evolution de l'usure en fonction de la vitesse de glissement avec passage du courant

La figure V. 12 présente la variation de l'usure en fonction du paramètre vitesse pour une valeur de $I = 10 \text{ A}$, avec les constatations suivantes :

- $V < 0,3 \text{ m/s}$: l'usure du couple laiton-acier est presque constante $\sim 50 \text{ mg}$, par contre, l'usure du couple acier-acier croît de 100 mg à 557 mg .
- $V > 0,3 \text{ m/s}$: l'usure du couple laiton-acier augmente légèrement de 50 mg à 140 mg . Tandisque, l'usure du contact acier-acier a tendance à augmenter suivant une allure linéaire.

Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

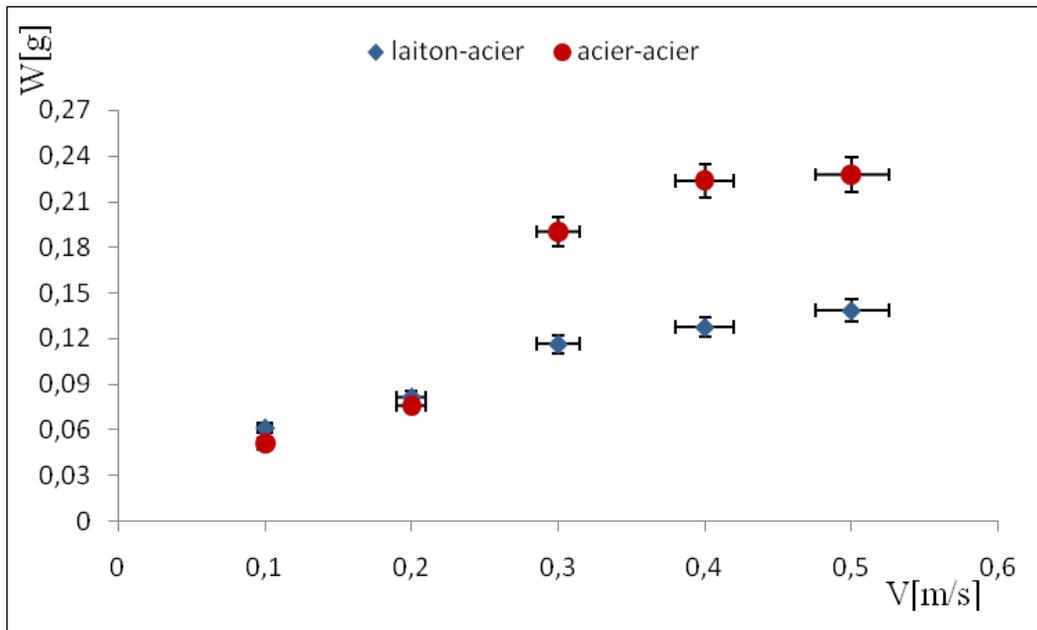


Figure V.11. Variation de l'usure en fonction de la vitesse de glissement pour les deux couples glissants ($P = 20 \text{ N}$, $t = 30 \text{ mn}$ et $I = 0 \text{ A}$).

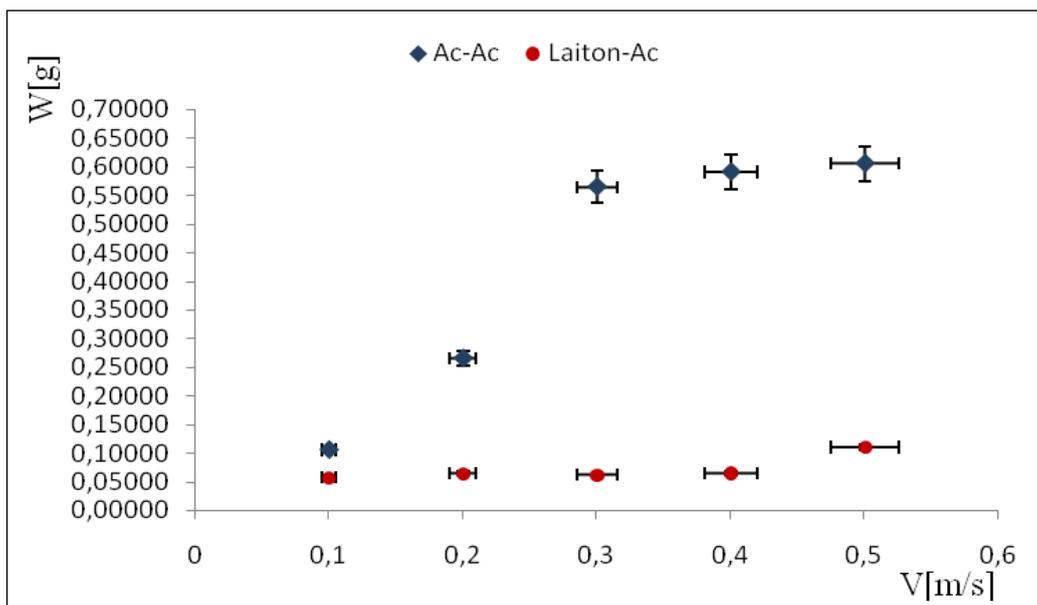


Figure V.12. Variation de l'usure en fonction de la vitesse de glissement pour les deux couples glissants ($P = 20 \text{ N}$, $t = 30 \text{ mn}$ et $I = 10 \text{ A}$).

V.2.13. Evolution de la résistance électrique de contact en fonction du courant électrique

Cette figure donne la variation de la résistance électrique de contact R_c en fonction de l'intensité du courant électrique, pour le couple acier-acier et laiton-acier ; les deux courbes sont décroissantes et se confondent à partir de $I = 8 \text{ A}$.

Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

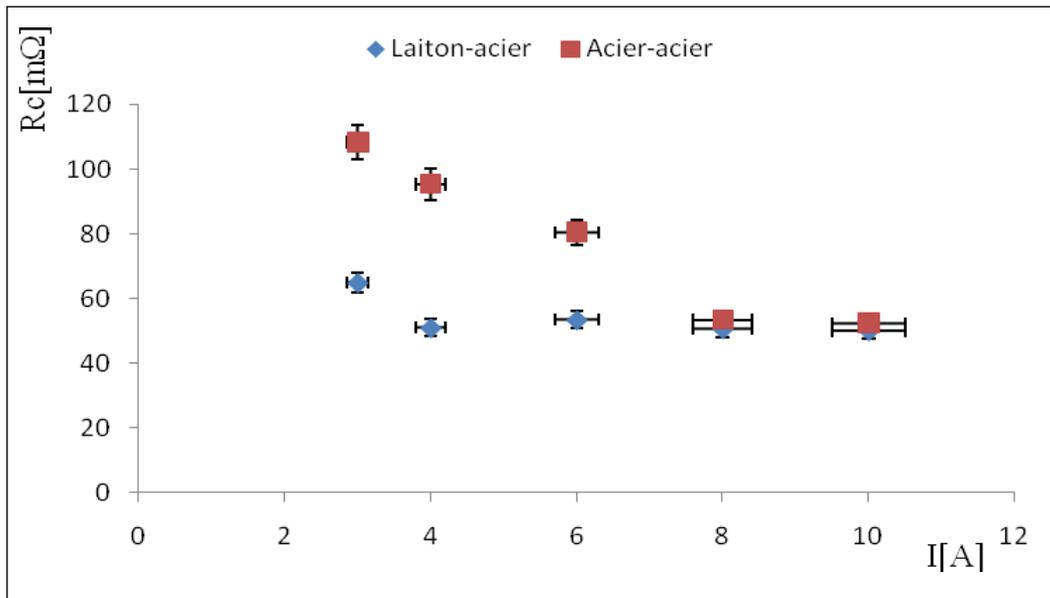


Figure V. 13. Variation de la résistance électrique de contact en fonction du courant électrique pour les deux couples ($P = 20 \text{ N}$, $V = 0,5 \text{ m/s}$ et $t = 30 \text{ mn}$).

V.2.14. Evolution de la résistance électrique de contact en fonction du paramètre temps

La variation de la résistance électrique de contact en fonction du paramètre temps est présentée dans la figure V. 14. On constate deux zones différentes pour les deux couples glissants.

- la première zone ($0 \leq t \leq 10 \text{ mn}$) : une diminution progressive de la résistance électrique de contact jusqu'à $30 \text{ m}\Omega$.
- la deuxième zone ($10 \leq t \leq 30 \text{ mn}$) : une nette croissance est enregistrée. La courbe représentative de R_c du contact laiton-acier se situe au dessous de l'autre courbe.

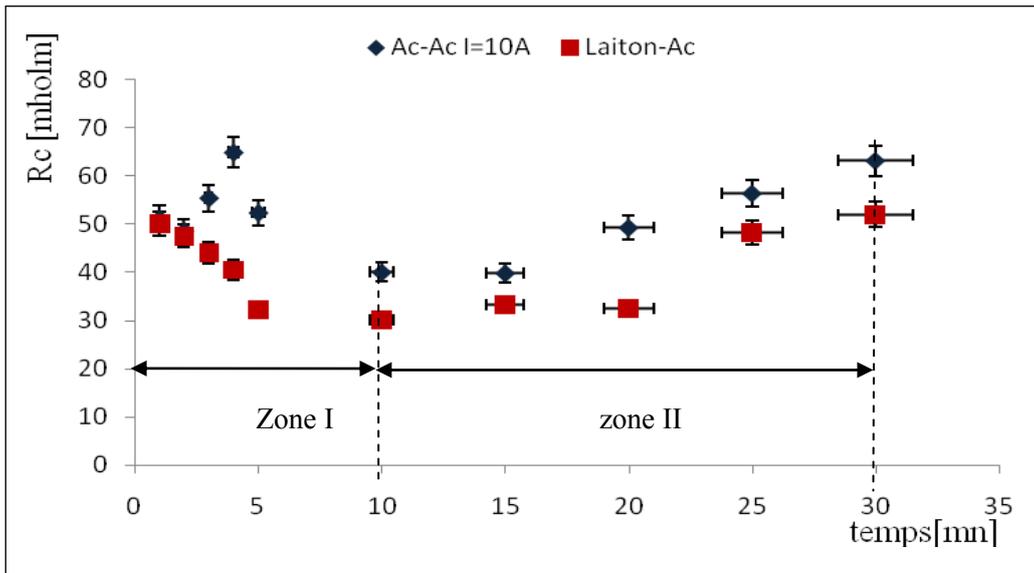


Figure V. 14. Variation de la résistance électrique de contact en fonction du paramètre temps pour les deux couples ($P = 20$ N, $V = 0,5$ m/s et $I = 10$ A).

V.2.15. Evolution du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps pour différentes valeurs du courant électrique (couple laiton-acier)

Cette figure montre la variation du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps pour différentes valeurs du courant électrique. On remarque que pour les faibles valeurs de t ($t \leq 5$ min), une dispersion des valeurs de μ est constatée. Par contre, au de là de cette valeur, μ demeure à peu près constant et ce quelle que soit l'intensité de I .

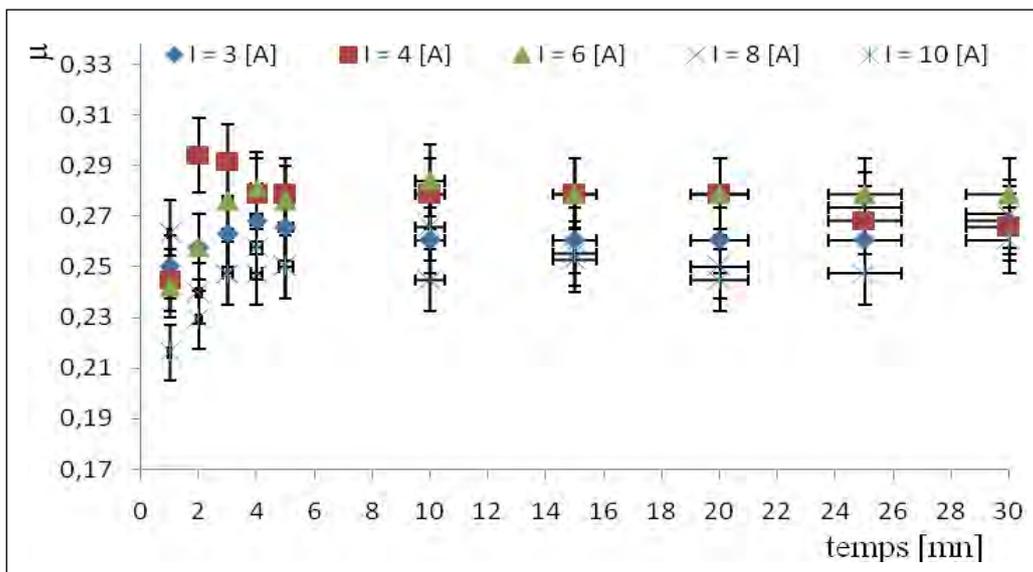


Figure V. 15. Variation du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps du couple glissant laiton-acier pour différentes valeurs du courant électrique ($P = 20$ N et $V = 0,5$ m/s)

V.2.16. Evolution du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps pour différentes valeurs du courant électrique (couple acier-acier)

La figure V.16 donne la variation du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps avec différentes valeurs du courant électrique pour le couple acier-acier. On constate qu'au début de chaque essai jusqu'à $t = 5$ minutes, il y a une grande divergence entre $I = 4$ A et $I = 10$ A. Après les cinq premières minutes, le coefficient du frottement se stabilise quelque soit la valeur de I . On peut dire que le paramètre courant électrique n'a pas un effet significatif sur la valeur de μ .

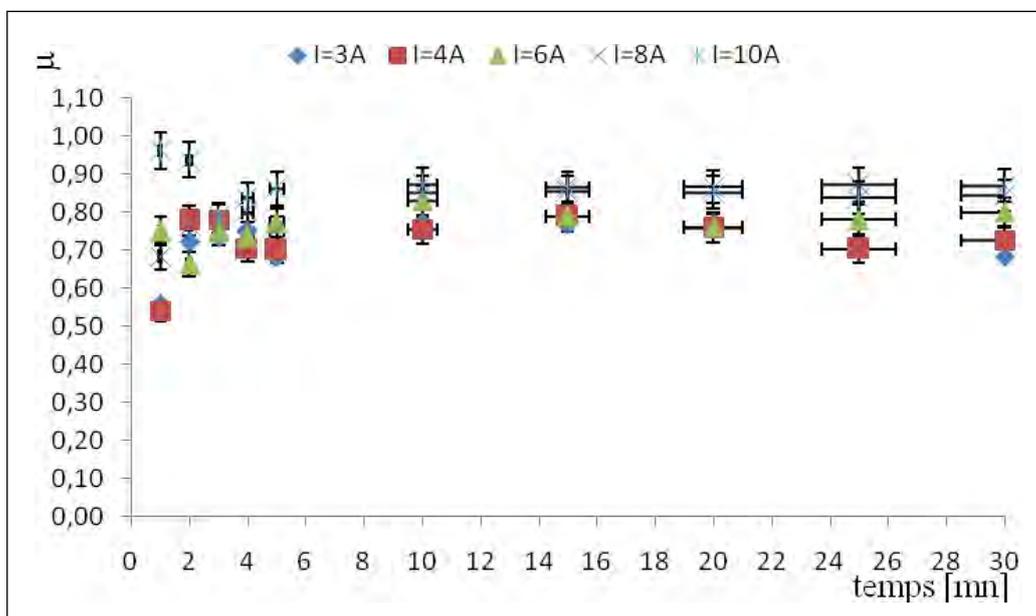


Figure V. 16. Variation du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps du couple glissant acier-acier pour différentes valeurs du courant électrique ($P = 20$ N et $V = 0,5$ m/s).

V.2.17. Evolution du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps avec différentes valeurs de vitesse pour le couple laiton-acier

Cette figure montre que la vitesse de glissement n'a pas un effet significatif sur le frottement.

Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

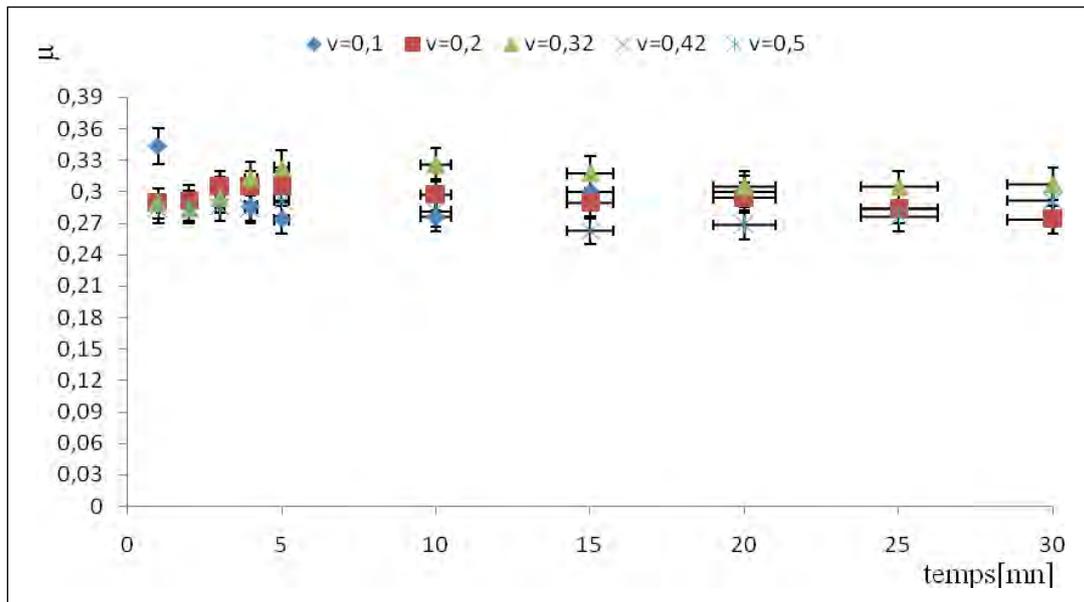


Figure V. 17. Variation du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps du couple glissant laiton-acier pour différentes valeurs de vitesse ($P = 20 \text{ N}$ et $I = 0 \text{ A}$).

V.2.18. Evolution du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps avec différentes valeurs de vitesse pour le couple acier-acier

La variation du coefficient de frottement en fonction du temps pour différentes valeurs de vitesses pour le contact glissant acier-acier, sans passage du courant électrique est illustrée par la figure V.18. On constate que cette variation présente des fluctuations allant de 0,52 à 0,47 pour une vitesse de 0,4 m/s et de 0,35 à 0,43 pour une vitesse de 0,5 m/s.

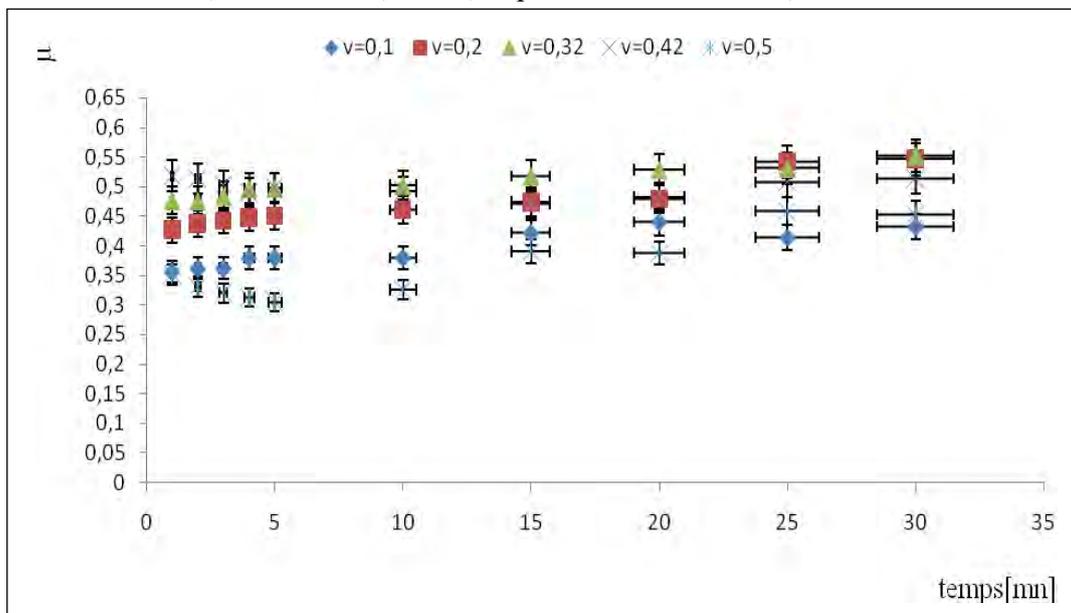


Figure V. 18. Variation du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps du couple glissant acier-acier pour différentes valeurs de vitesse ($P = 20 \text{ N}$ et $I = 0 \text{ A}$).

V.2.19. Evolution du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps pour différentes valeurs de la charge normale pour les couples acier-acier et laiton-acier

L'effet du paramètre temps sur le coefficient du frottement, pour différentes valeurs de la charge normale, sans passage du courant électrique est donné sur la figure V. 19. Pour le couple laiton-acier, le coefficient du frottement est respectivement égal à 0,3 et 0,2, pour les charges normales 10 N et 30 N. Ce dernier se stabilise à partir de la quinzième minute. Pour le deuxième couple, μ est égal respectivement à 0,3 et 0,6 pour les charges de 10 N et 30 N.

La figure V. 20 montre la variation du coefficient de frottement en fonction du temps pour les charges appliquées 10 N, 20 N, 25 N et 30 N et une intensité du courant électrique de 10 A. Pour le couple dynamique laiton-acier, le coefficient de frottement prend une valeur moyenne de 0,33 lorsque $P = 10$ N et $\mu = 0,22$ pour $P = 30$ N. Enfin, pour le couple acier-acier, $\mu = 0,87$ quand $P = 10$ N et $\mu = 0,40$ lorsque $P = 30$ N.

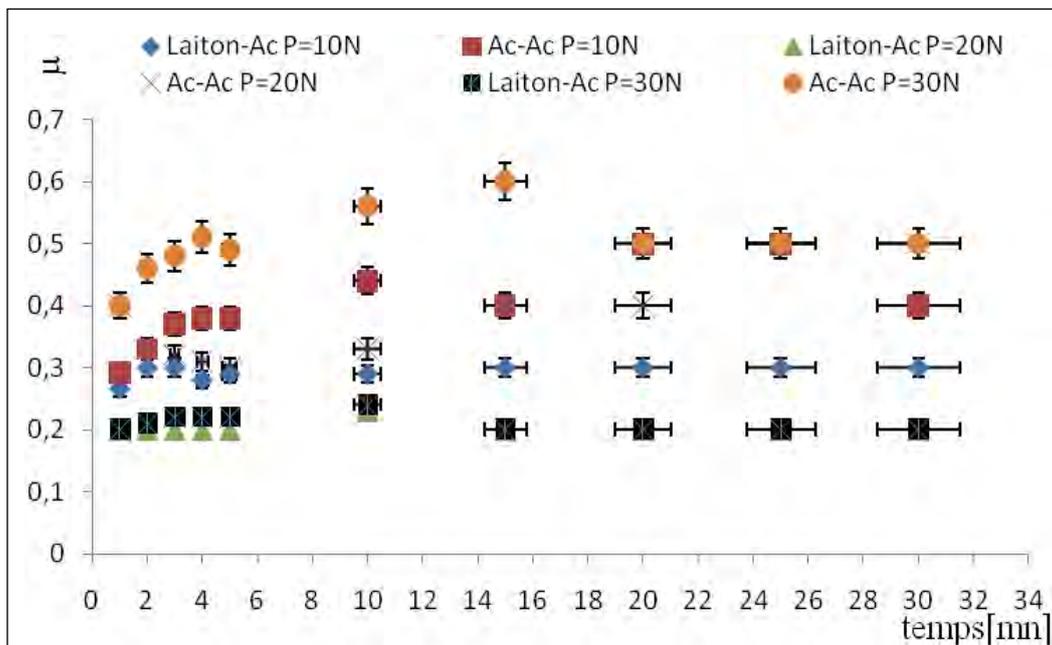


Figure V. 19. Variation du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps pour les charges normales $P = 10$ N, $P = 20$ N et $P = 30$ N ($V = 0,5$ m/s et $I = 0$ A).

Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

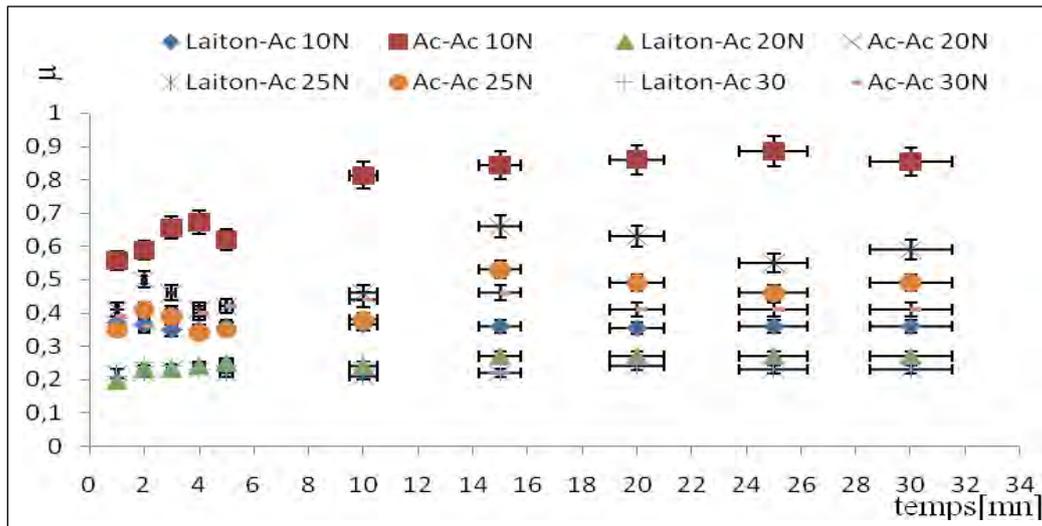


Figure V. 20. Variation du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps pour les charges normales $P = 10\text{ N}$, $P = 20\text{ N}$ et $P = 30\text{ N}$ ($V = 0,5\text{ m/s}$ et $I = 10\text{ A}$).

V.2.20. Evolution du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps pour différentes valeurs de la vitesse de glissement

La figure V. 21 donne la variation du coefficient du frottement en fonction du paramètre temps pour différentes valeurs de la vitesse de glissement avec une charge normale de 20 N et une intensité du courant électrique de 10 A. L'augmentation de la vitesse de glissement entraîne une faible diminution du coefficient de frottement pour les deux couples glissants. En effet, l'écart entre les valeurs du coefficient de frottement est de 0,18 pour laiton-acier et est de 0,10 pour acier-acier durant les premiers instants. Une fois cette durée est dépassée, cet écart est devient négligeable.

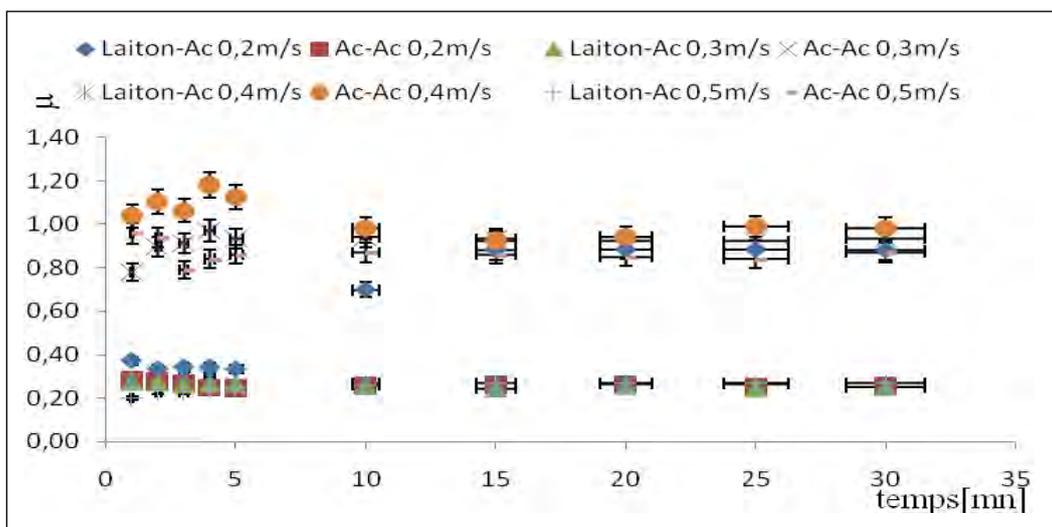


Figure V. 21. Variation du coefficient de frottement en fonction du paramètre temps pour des vitesses $V = 0,2\text{ m/s}$, $V = 0,3\text{ m/s}$, $V = 0,4\text{ m/s}$ et $V = 0,5\text{ m/s}$ ($P = 20\text{ N}$ et $I = 10\text{ A}$)

V.2.21. Evolution de la résistance électrique de contact et le coefficient du frottement en fonction de la charge appliquée pour le couple laiton-acier

La figure V.22 montre la variation de R_c et de μ en fonction de la charge normale du couple laiton-acier. Pour des efforts normaux allant de 5 N à 30 N et une intensité du courant électrique de 10 A, la résistance électrique de contact est quasi-constante, par contre, le coefficient du frottement présente des fluctuations plus ou moins importantes.

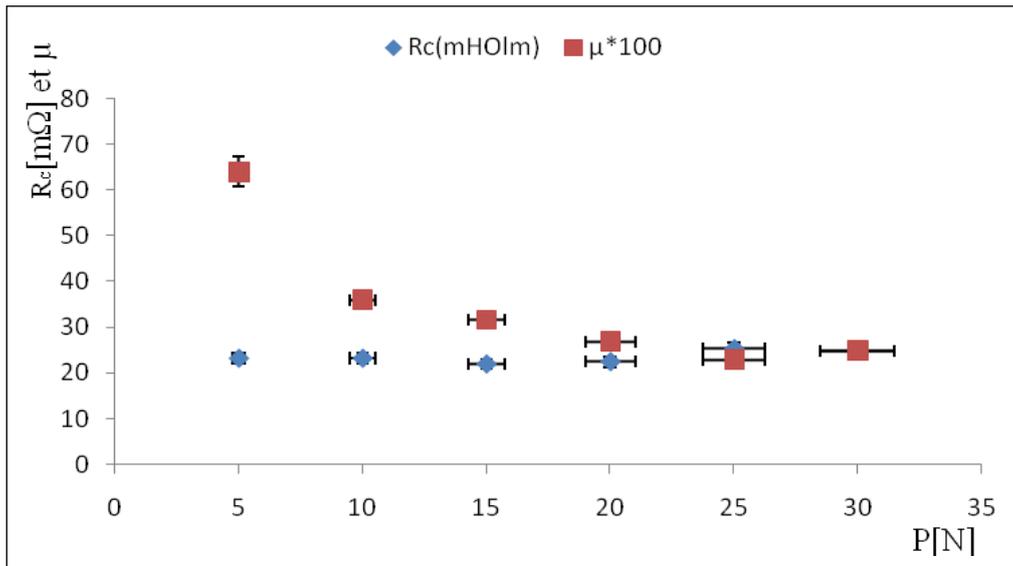


Figure V. 22. Variation de la résistance électrique de contact et le coefficient du frottement en fonction la charge appliquée ($V = 0,5$ m /s, $t = 30$ mn et $I = 10$ A).

V.2.22. Evolution de la résistance électrique de contact et le coefficient du frottement en fonction de la charge appliquée pour le couple acier-acier

Cette figure montre l'évolution du coefficient de frottement et la résistance électrique de contact en fonction de la charge normale pour le couple acier-acier. On constate que le coefficient du frottement diminue avec la charge appliquée et la résistance électrique de contact présente de légères fluctuations.

Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

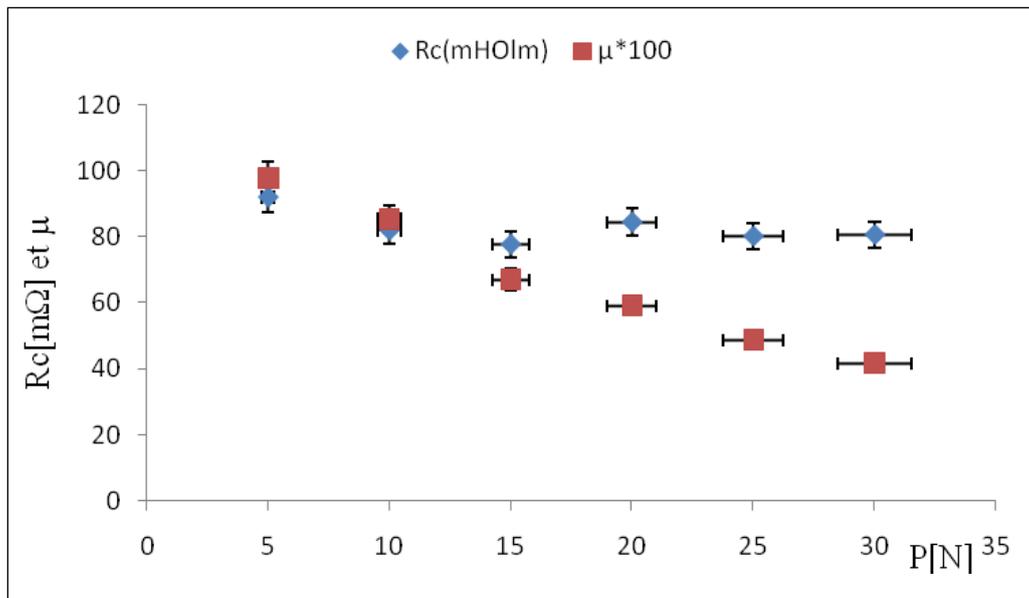


Figure V. 23 : Variation de la résistance électrique de contact et le coefficient du frottement en fonction la charge appliquée ($V = 0,5$ m /s, $t = 30$ mn et $I = 10$ A).

V.3. CALCULS THEORIQUES DES PARAMETRES

On a calculé tous les paramètres (rayon de contact, épaisseur du film d'oxyde, variation de la température, quantité de chaleur et le champ électrique) en utilisant le modèle d'Achard (c.f chapitre 4).

V.3.1. Contact laiton-acier

- pour une rupture dans le laiton avec $P = 20$ N, $H_v = 1,2 \cdot 10^9$ Pa et $\mu = 0,25$, on obtient un rayon de la zone réelle de contact $a = 70$ μ m.

- pour une rupture dans l'oxyde de cuivre (oxyde dominant) dont la dureté est de l'ordre de $H_v = 1,3 \cdot 10^9$ Pa, on obtient un rayon du cercle de contact de l'ordre de 80 μ m ($70 \leq a \leq 80$ μ m).

En prenant les valeurs limites de a et la vitesse de 0,5 m/s, en l'absence et en présence de courant électrique traversant l'interface, on obtient les résultats, consignés dans le tableau V.1.

Tableau V.1. Couple laiton-acier

I [A]	0		10			
a [μm]	70	80	70	80	70	80
L	1,53	0,15	1,53	0,15	1,53	0,15
α	0,70	0,84	0,70	0,84	0,70	0,84
Q_p [J]	1,85	3,31	2,97	3,70	6,85	8,32
ΔT_m [°C]	30,72	69,75	62,6	78	150,42	182,7
$t_{rup} \cdot 10^7$ [Pa]	7,2	78	7,2	78	7,2	78
R_c [m Ω]	-		11,2		50,1	
E [V/m]	-		$41,5 \cdot 10^6$	$30,85 \cdot 10^6$	$40,3 \cdot 10^6$	$30,85 \cdot 10^6$
ζ [Å]	-		27	36,3	124,32	162,38

V.3.1.1. Evolution de l'épaisseur du film d'oxyde en fonction de la charge appliquée pour le couple laiton-acier

L'évolution de l'épaisseur du film d'oxyde en fonction de la charge est présentée sur la figure V.24. En examinant cette figure, on constate que la courbe est une droite. Le film d'oxyde augmente avec la charge normale.

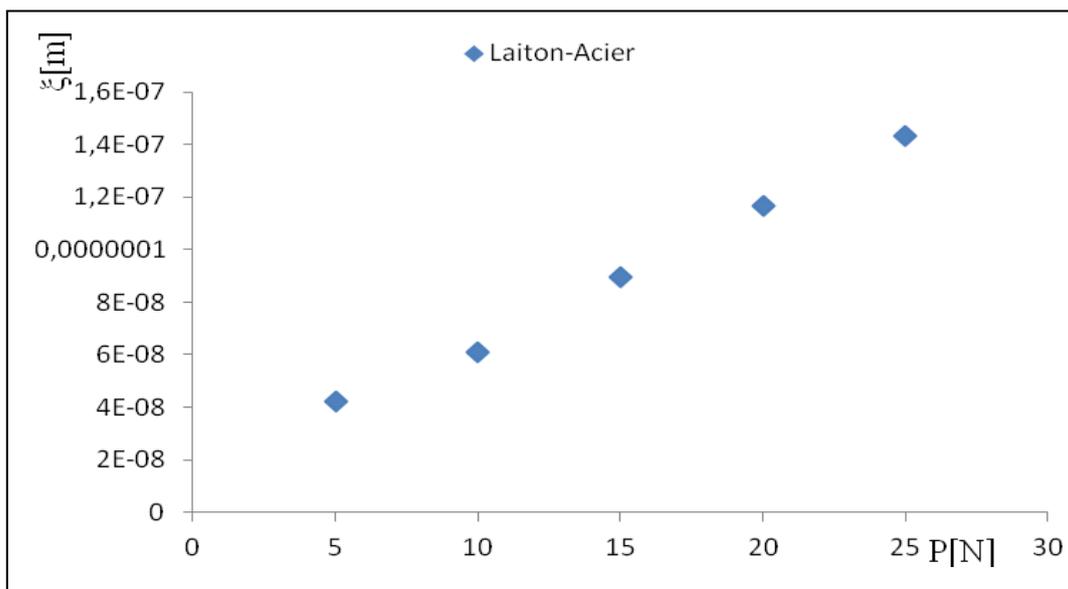


Figure V. 24. Variation l'épaisseur du film d'oxyde en fonction la charge normale (V = 0,5 m /s, t = 30 mn et I = 10 A).

V.3.1.2. Evolution du rayon du contact en fonction de la charge appliquée pour le couple laiton-acier

On constate sur la figure ci dessous que le rayon a augmente proportionnellement avec la charge appliquée pour un courant de 10 A et une vitesse de glissement de 0,5 m/s. Le modèle de Hisakado et Tsukizoe [22] qui exprime l'aire réelle de contact, l'effort normal appliqué, la pression moyenne, la densité de probabilité des rayons de courbure et le nombre de contacts montre que l'aire de contact est toujours proportionnelle à l'effort appliqué et décroît quand la rugosité augmente et ce quelque soit le type du couple en contact.

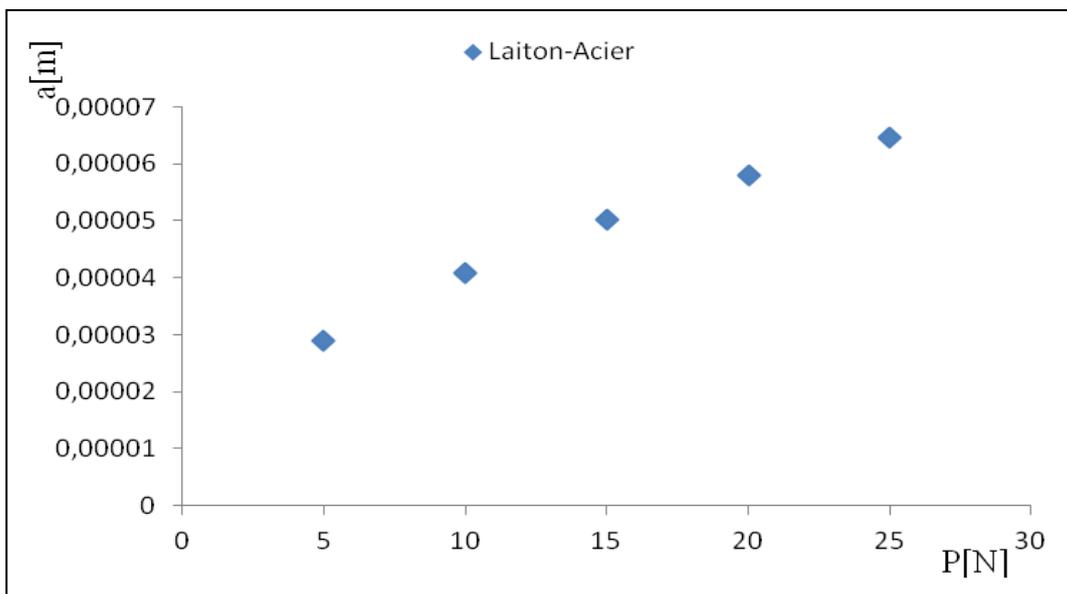


Figure V. 25. Variation du rayon de contact a en fonction la charge normale P (V = 0,5 m /s, t = 30 mn et I = 10 A).

V.3.1.3. Evolution de l'élévation de la température de contact en fonction de la charge normale avec passage du courant électrique

L'évolution de ΔT en fonction de la charge normale pour une intensité du courant électrique de 10 A est montrée par la figure V. 26. On observe deux zones distinctes :

- zone I ($5 \leq P \leq 10$ N) : l'élévation de la température de contact ΔT présente une diminution progressive allant de 414,47 jusqu'à 240,78°C.
- zone II ($10 \leq P \leq 25$ N) : l'allure de ΔT est sensiblement constante.

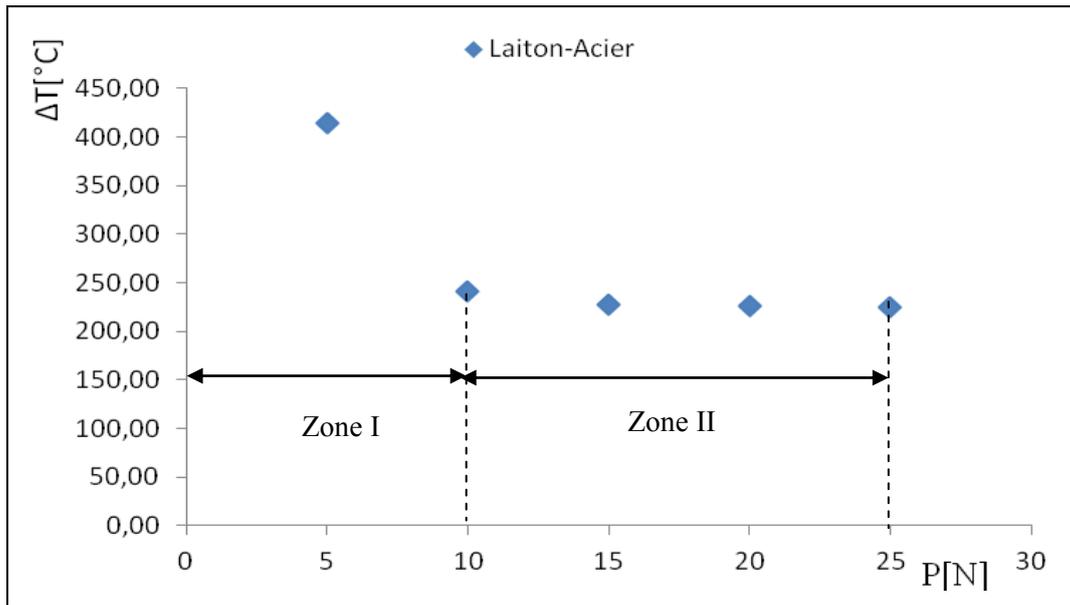


Figure V. 26. Variation de ΔT en fonction la charge normale
($V = 0,5 \text{ m/s}$, $t = 30 \text{ mn}$ et $I = 10 \text{ A}$).

V.3.1.4. Evolution de la quantité de chaleur en fonction de la charge normale et la vitesse avec passage du courant électrique

La figure V.27 montre la variation de la quantité de chaleur dégagée par frottement et par effet Joule en fonction de l'effort normal et la vitesse de glissement, pour le couple laiton-acier. On note que la quantité de chaleur augmente sensiblement avec la charge appliquée et la vitesse.

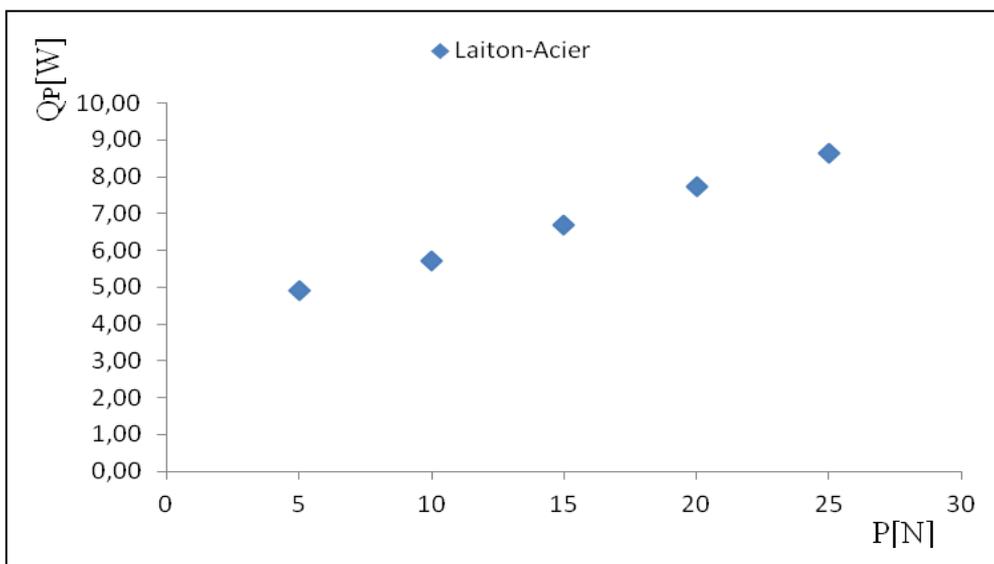


Figure V. 27. Variation de la quantité de chaleur en fonction de l'effort normal
($V = 0,5 \text{ m/s}$, $I = 10 \text{ A}$ et $t = 30 \text{ mn}$).

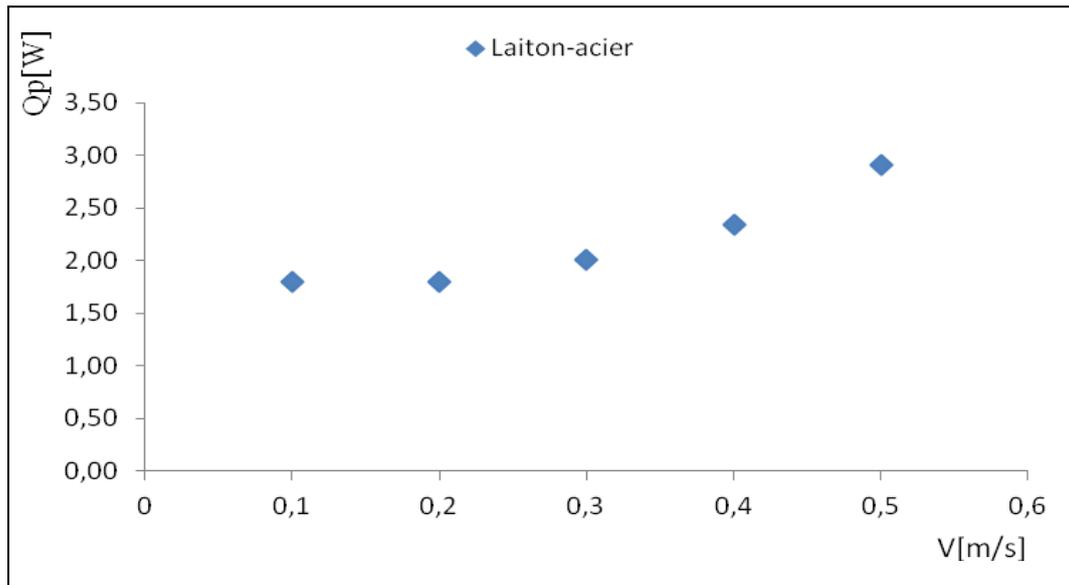


Figure V. 28. Variation de la quantité de chaleur en fonction de la vitesse de glissement (V = 0,5 m/s, I = 10 A et t = 30 mn).

V.3.2. Couple acier-acier

- pour une rupture dans l'acier avec une charge normale $P = 20 \text{ N}$, une dureté Vickers $H_v = 1,9 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ et un coefficient de frottement $\mu = 0,87$, on obtient un rayon de la zone réelle de contact $a = 60 \text{ }\mu\text{m}$.

- pour une rupture dans l'oxyde ferrique Fe_2O_3 dont la dureté est de l'ordre de $H_v = 10^{10} \text{ Pa}$, on obtient un rayon du cercle de contact de l'ordre de $30 \text{ }\mu\text{m}$ ($30 \leq a \leq 60 \text{ }\mu\text{m}$). En prenant les valeurs limites de a et la vitesse de $0,5 \text{ m/s}$, en l'absence et en présence de courant électrique traversant l'interface, on obtient les résultats, consignés dans le tableau V.2.

Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

Tableau V.2. Couple acier-acier

I [A]	0		10			
a [μm]	30	60	30	60	30	60
L	0,66	1,16	0,66	1,16	0,66	1,16
α	0,74	0,79	0,74	0,79	0,74	0,79
Q _p [W]	4,34	5,75	8,38	8,78	10,8	12,24
ΔT _m [°C]	669	365,9	1291,9	540,9	1665	754
τ _{rup} .10 ⁸ [pa]	7,2	60	7,2	60	7,2	60
R _c [mΩ]	-		40,1		64,9	
E [V/m]	-		92.10 ⁶	17.10 ⁶	92.10 ⁶	13.10 ⁶
ζ [Å]	-		43,5	237	70,5	500

V.3.2.1. Evolution du film d'oxyde en fonction de la charge normale

La figure V.29 illustre l'évolution de l'épaisseur du film d'oxyde ζ en fonction de la charge normale P. On constate que l'augmentation de l'effort normal entraîne une forte croissance du film d'oxyde.

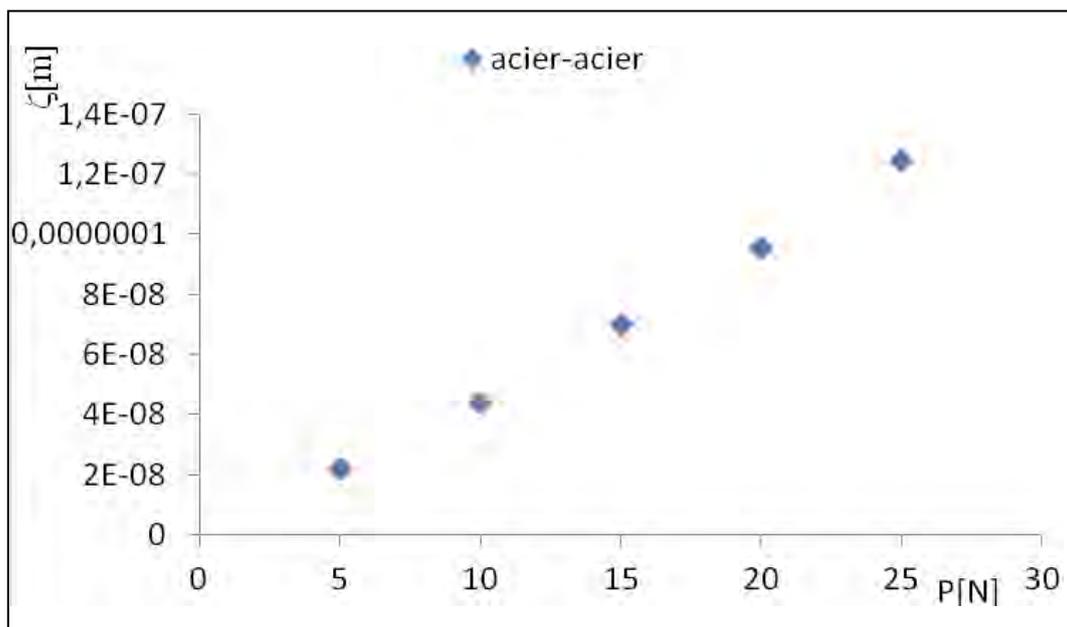


Figure V. 29. Variation de l'épaisseur du film d'oxyde en fonction de l'effort normal (V = 0,5 m/s, I = 10 A et t = 30 mn).

Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

V.3.2.2. Evolution du film d'oxyde en fonction de la vitesse de glissement

D'après cette figure, on constate que la vitesse de glissement n'a pas d'influence sur l'épaisseur du film d'oxyde.

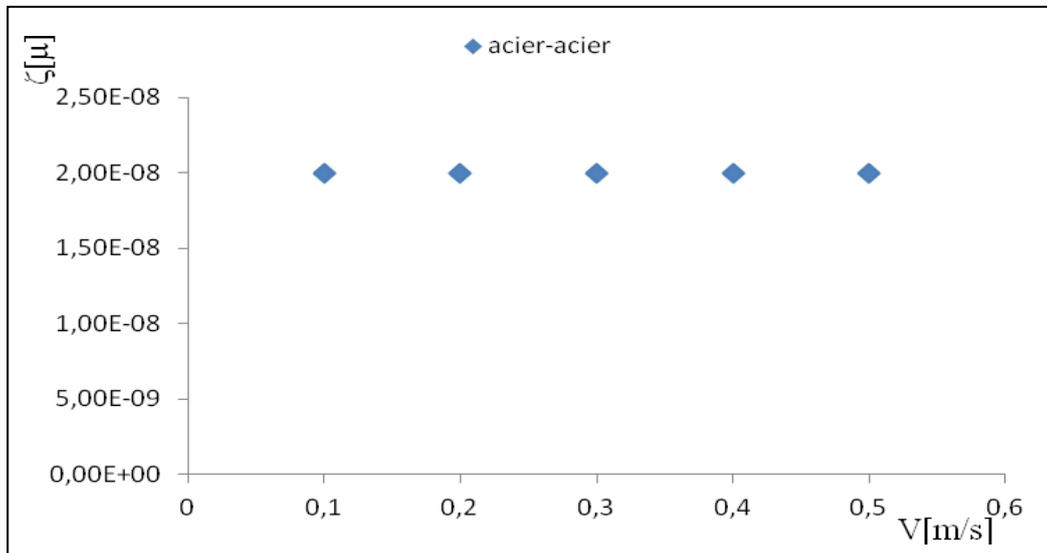


Figure V. 30. Variation de l'épaisseur du film d'oxyde en fonction de la vitesse (P = 20 N, I = 10 A et t = 30 mn).

V.3.2.3. Evolution du rayon de contact en fonction de la charge appliquée

La figure V.31 présente la variation de a en fonction de P . Le rayon de contact augmente proportionnellement avec la l'effort normal. On constate, un bon accord entre les valeurs expérimentales et celles théoriques [23]. La modélisation proposée présente une linéarité de la relation entre le rayon réel de contact et l'effort appliqué.

V.3.2.4. Evolution de ΔT en fonction de P

La figure V.32 illustre la variation de la température en fonction de la charge normale. On remarque que pour le couple glissant acier-acier, ΔT présente une diminution avec la charge normale. La variation de la température est inversement proportionnelle à la l'effort normal P .

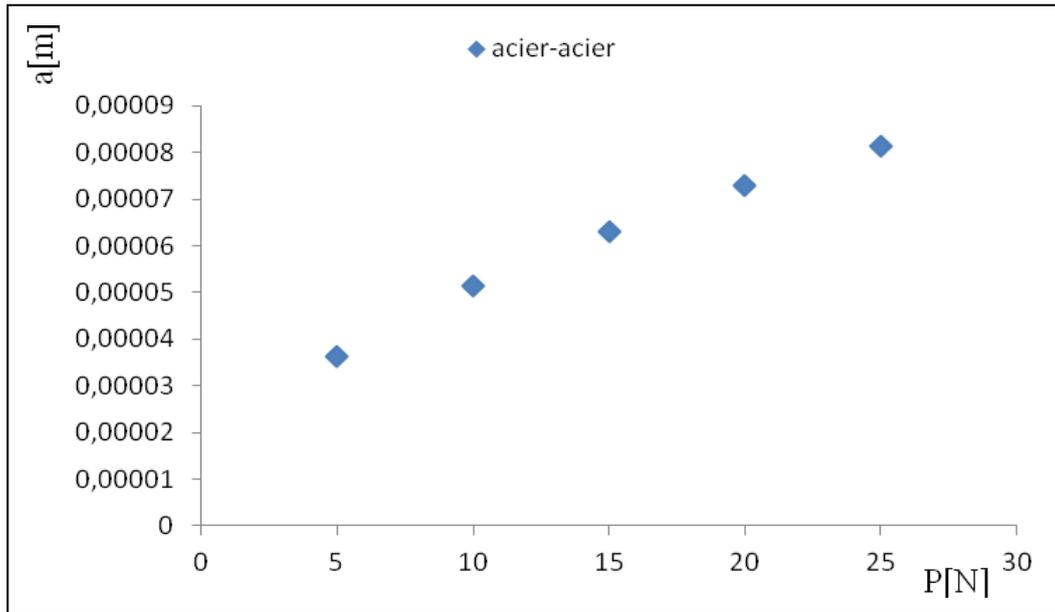


Figure V. 31. Variation du rayon de contact en fonction de la charge normale ($V = 0,5$ m /s, $t = 30$ mn et $I = 10$ A).

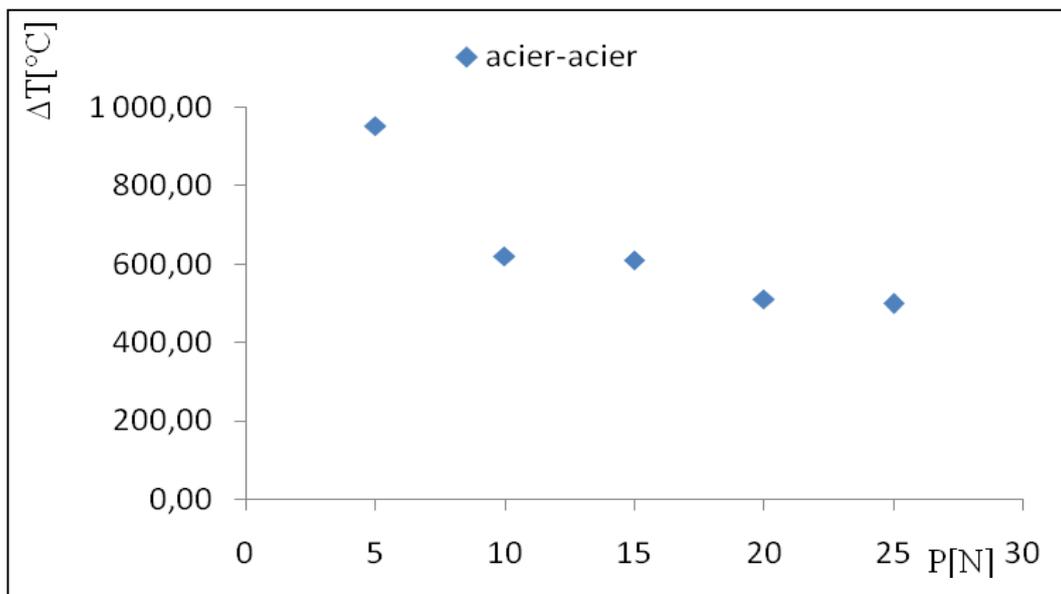


Figure V. 32. Variation de ΔT en fonction de P ($V = 0,5$ m /s, $t = 30$ mn et $I = 10$ A)

V.3.2.5. Evolution de la quantité de chaleur totale en fonction de la charge normale

La figure V.33, donne la variation de la chaleur en fonction de la charge normale pour le couple acier-acier. On constate que cette quantité augmente sensiblement avec l'effort appliqué durant toute la période.

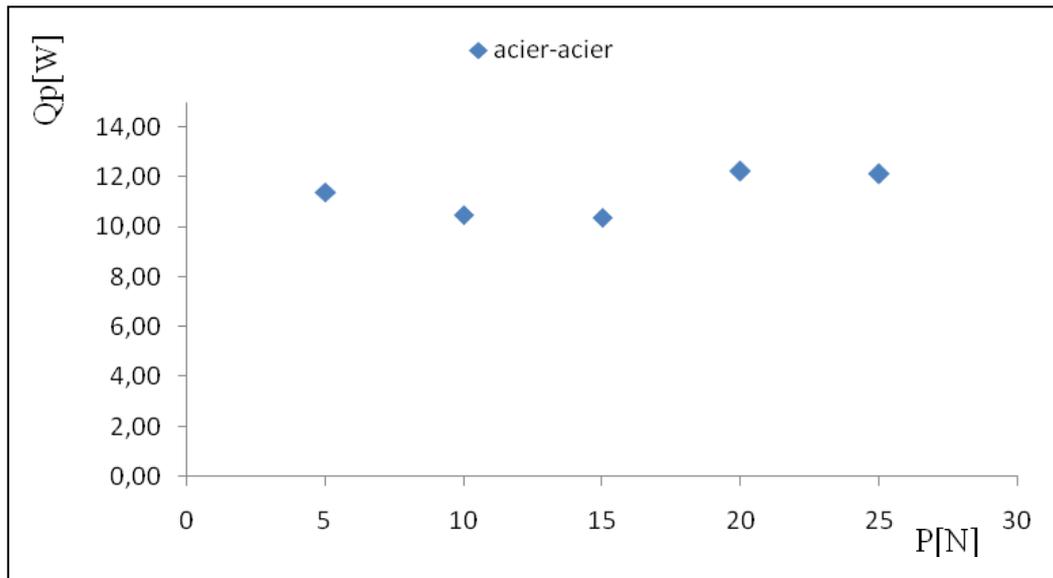


Figure V. 33. Variation de la quantité chaleur totale en fonction de la charge normale P ($V = 0,5 \text{ m/s}$, $t = 30 \text{ mn}$ et $I = 10 \text{ A}$).

V.4. DISCUSSION DES RESULTATS

V.4.1. Effet de la charge normale sur le frottement et l'usure

Aux faibles charges, les surfaces des matériaux antagonistes ne se touchent que par les aspérités les plus élevées. La surface de contact croît au fur et à mesure que la charge P augmente, sous l'action combinée de la pression normale et la contrainte tangentielle, les aspérités s'enchevêtrent pour former la surface réelle du contact [4]. Après rodage les surfaces s'adaptent et deviennent lisses, le coefficient de frottement diminue puis se stabilise lorsque les conditions de fonctionnement à l'interface deviennent stables [5] (Figs V.3 et V.4).

Pour des faibles charges (Figs V.8 et V.9), l'usure du pion diminue, à cause du nombre limité des points de contact entre les surfaces [6]. Lorsqu'on augmente la charge, la surface réelle de contact et la température interfaciale augmentent aussi, ce qui entraîne différentes conséquences et en particulier facilite le processus de formation et de rupture de l'oxyde [7].

Les résultats analytiques indiquent que l'aire réelle de contact (rayon de contact) est plus importante lorsque le pion est en laiton que lorsqu'il est en acier. Ceci s'explique par le fait que le module d'Young du laiton est environ deux fois plus petit que celui de l'acier. Donc, pour le même effort normal le laiton se déformera plus facilement que l'acier, et l'aire réelle de contact augmente (Tableaux V.1 et V.2).

Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

L'aire de contact est proportionnelle à l'effort appliqué et décroît quand la rugosité augmente (Fig. V.37). En effet, lorsque la rugosité diminue, l'amplitude des variations d'altitude diminue tandis que les rayons des aspérités augmentent; du point de vue de la mécanique du contact ceci correspond au fait que les surfaces de plus faible rugosité sont plus rigides, car elles mettent en jeu des aspérités de plus grands rayons et d'altitudes très proches [7].

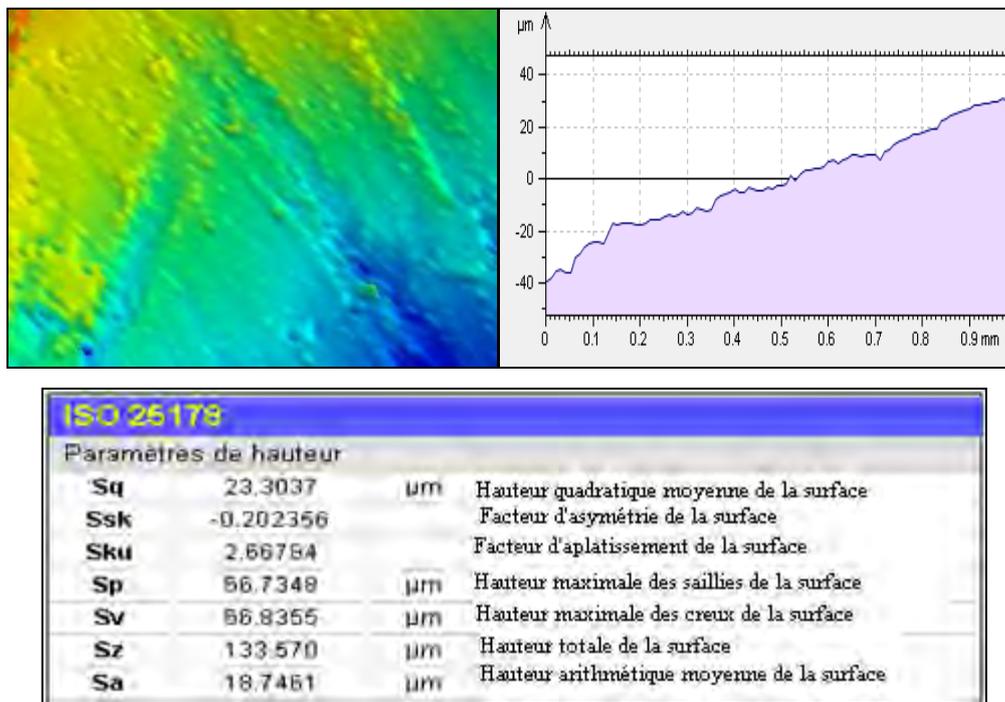


Figure V.34. Morphologie, profil de la surface de glissement et tableau des paramètres obtenus par profilomètre d'un pion en acier ($P = 30 \text{ N}$, $V = 0,5 \text{ m/s}$ et $I = 0 \text{ A}$).

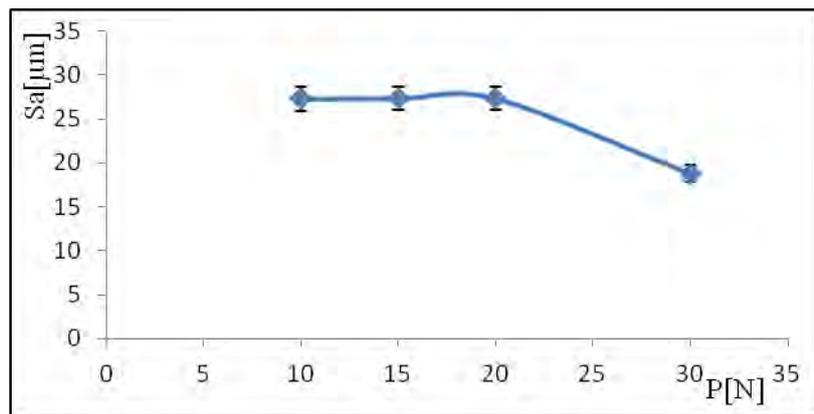


Figure V.35. Variation de la rugosité du pion en acier en fonction de la charge normale ($V = 0,5\text{m/s}$, $t = 30 \text{ mn}$ et $I = 0 \text{ A}$).

Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

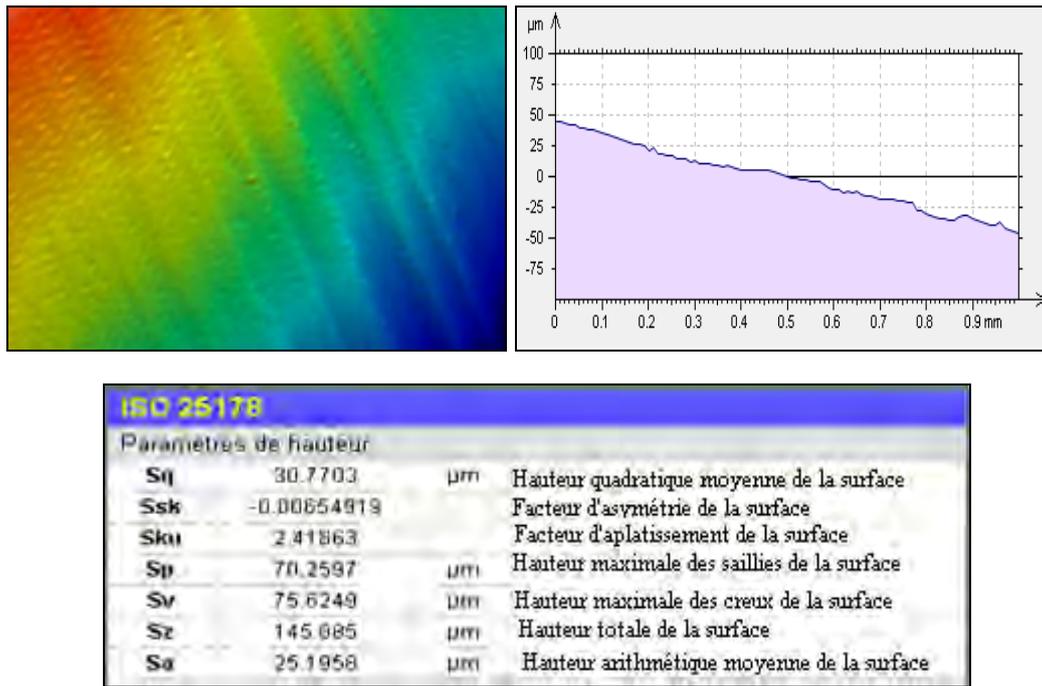


Figure V.36. Morphologie, profil de la surface de glissement et tableau des paramètres obtenus par profilomètre du pion en laiton ($P = 25 \text{ N}$, $V = 0,5 \text{ m/s}$ et $I = 0 \text{ A}$).

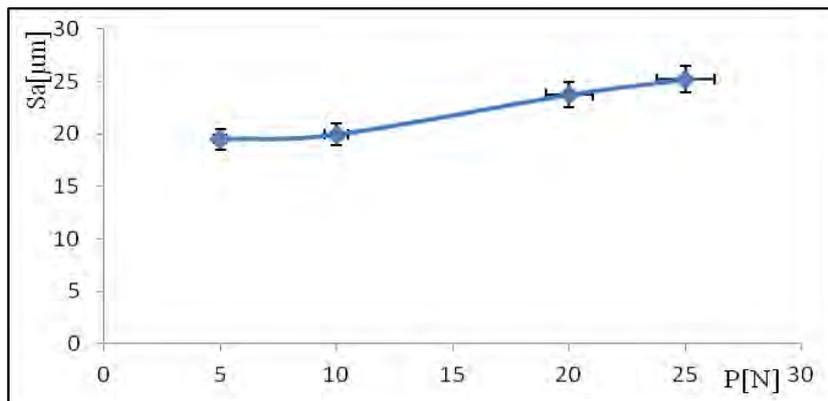


Figure V.37. Variation de la rugosité S_a du pion en laiton en fonction de la charge normale

($V = 0,5 \text{ m/s}$, $t = 30 \text{ mn}$ et $I = 0 \text{ A}$).

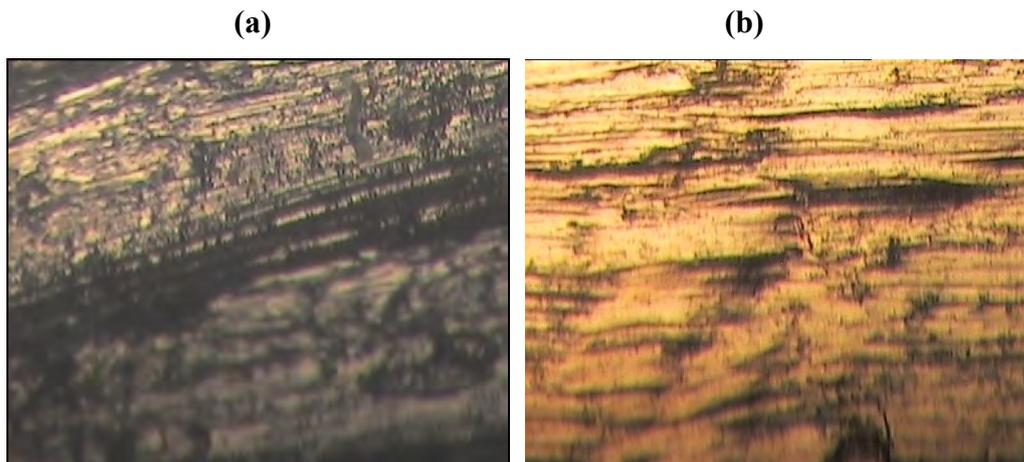


Figure V.38. Images microscopiques des pions(x20) pour $V = 0,5$ m/s, $I = 0$ A, (a) pion en acier ($P = 30$ N) et (b) pion en laiton ($P = 40$ N).

V.4.2. Effet de la vitesse sur le frottement et l'usure

La vitesse de glissement modifie la durée d'exposition des surfaces au milieu environnant, mais elle a une incidence sur l'amplitude de l'élévation locale de température dans le contact.

A faible vitesse (0,1 m/s), la durée d'exposition est grande et les jonctions ont suffisamment de temps pour s'accroître et l'élévation de température est faible. Le coefficient de frottement se situe autour d'une valeur modérée de l'ordre de $\mu = 0,56$ pour le couple acier-acier et $\mu = 0,3$ pour le couple laiton-acier (Fig. V.5).

Dans l'intervalle de 0,1 m/s à 0,2 m/s, le coefficient de frottement μ (Figs V.5 et 6) et l'usure W des pions (Figs V.11 et 12) sont élevés au début, à cause des jonctions métalliques qui ont le temps nécessaire pour augmenter leurs sections par fluage et la surface réelle de contact s'élargit dans le sens du mouvement (Fig. III.11) [8]. La décroissance du coefficient de frottement et l'usure est due, d'une part à la diminution du temps de croissance des jonctions et d'autre part, à la formation d'une couche d'oxyde sur la face frottante du pion (Figs. V.39 – 41). Cette couche diminue le frottement et protège la surface contre tout endommagement (Figs. V.39 – V.44) [9].

Dans la deuxième zone, la vitesse V est supérieure à 0,2 m/s, l'élévation de la température à l'interface active l'oxydation, ce qui accroît la vitesse de croissance de la couche d'oxyde [10]. Le film d'oxyde se désagrège, le coefficient de frottement se stabilise et l'usure augmente (Figs. V. 42 - 44). Dans ces conditions, la face usée du pion présente des zones colorées, matérialisant la région affectée thermiquement (Figs. V. 57 - 60). Le transfert

Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

du métal sur le disque augmente, la piste de frottement présente des déformations avec des sillons labourés dans le sens du mouvement (Figs. V. 45), caractéristique d'une usure abrasive, surtout pour le couple acier-acier (Figs. V.45.a, b, c et d).

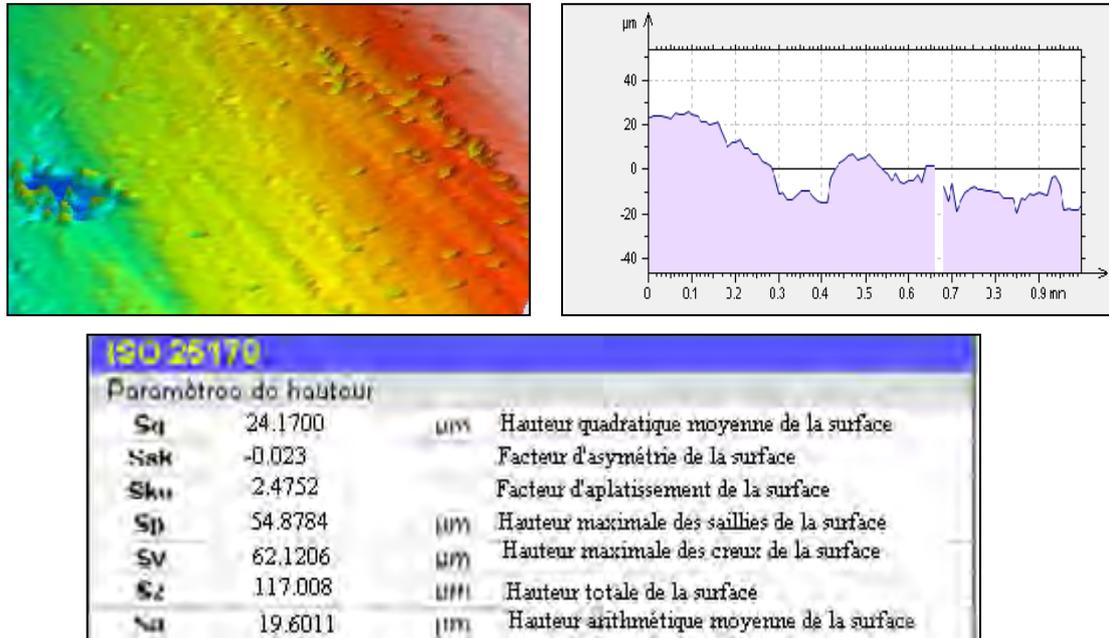


Figure V.39. Morphologie, profil de la surface de glissement et tableau des paramètres obtenus par profilomètre d'un pion en acier ($P = 20 \text{ N}$, $V = 0,1 \text{ m/s}$ et $I = 0 \text{ A}$).

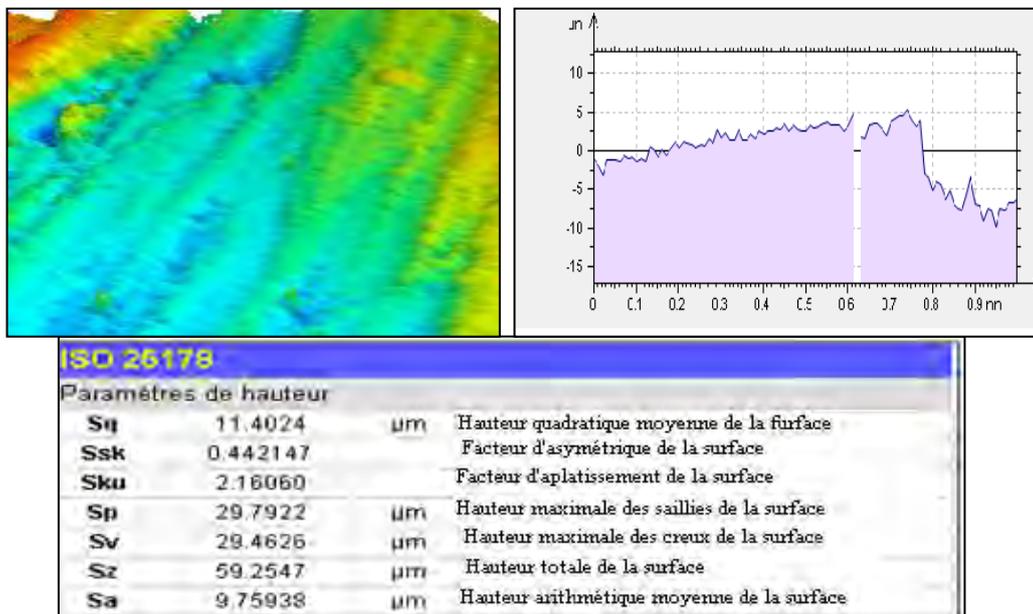


Figure V.40. Morphologie, profil de la surface de glissement et tableau des paramètres obtenus par profilomètre d'un pion en acier ($P = 20 \text{ N}$, $V = 0,4 \text{ m/s}$ et $I = 0 \text{ A}$).

Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

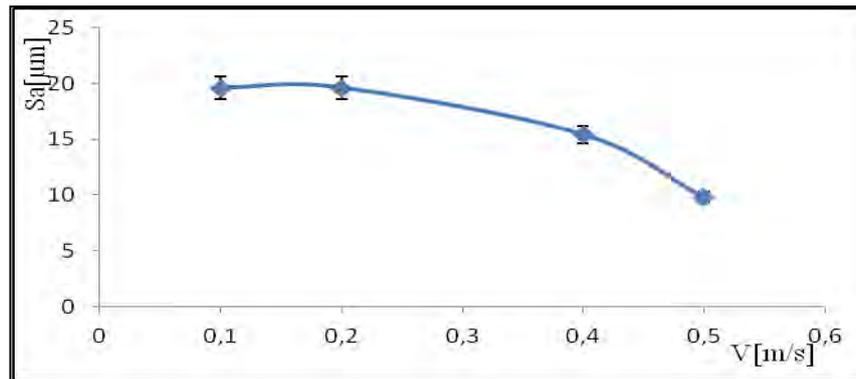


Figure V.41. Variation de la rugosité du pion en acier en fonction de la vitesse de glissement ($P = 20 \text{ N}$, $t = 30 \text{ mn}$ et $I = 0 \text{ A}$)

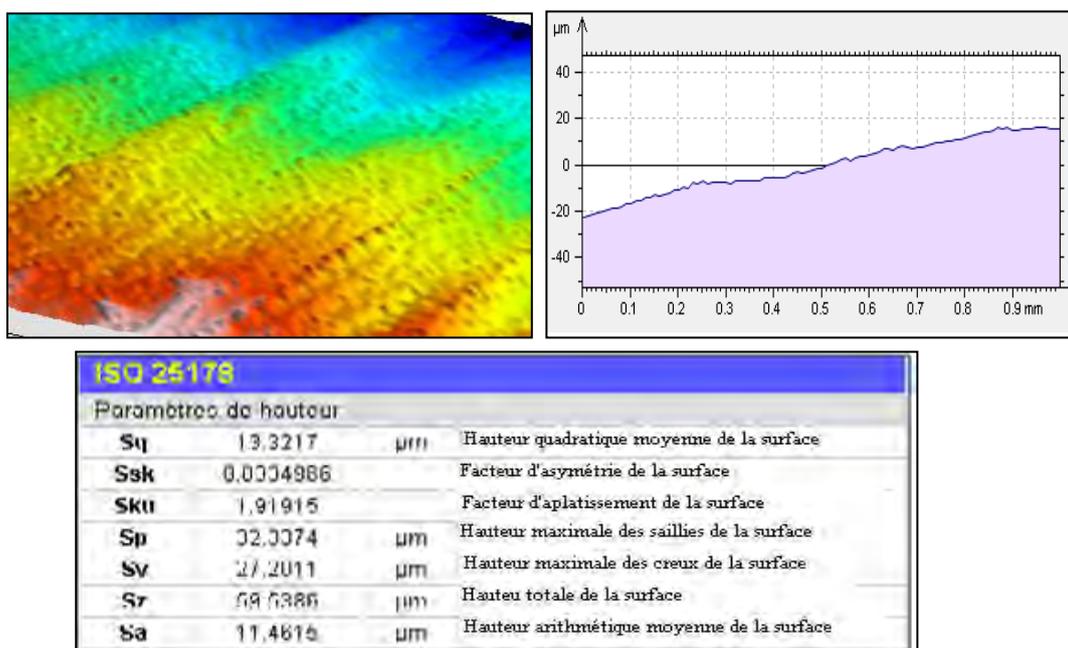
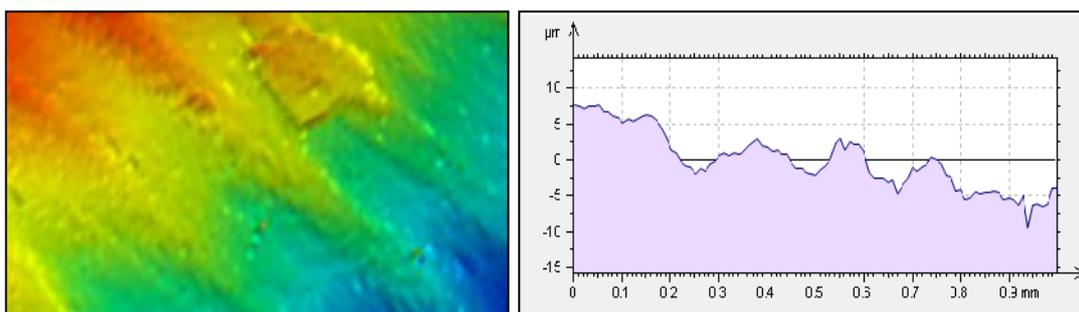


Figure V.42. Morphologie, profil de la surface de glissement et tableau des paramètres obtenus par profilomètre du pion en laiton ($P = 20 \text{ N}$, $V = 0,3 \text{ m/s}$ et $I = 0 \text{ A}$).



Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

ISO 25178			
Paramètres de hauteur			
Sq	13.9975	µm	Hauteur quadratique moyenne de la surface
Ssk	-0.0385307		Facteur d'asymétrie de la surface
Sku	1.95629		Facteur d'aplatissement de la surface
Sp	31.0373	µm	Hauteur maximale des saillies de la surface
Sv	32.9783	µm	Hauteur maximale des creux de la surface
Sz	64.0156	µm	Hauteur totale de la surface
Sa	12.0174	µm	Hauteur arithmétique moyenne de la surface

Figure V.43. Morphologie, profil de la surface de glissement et tableau des paramètres obtenus par profilomètre du pion en laiton (P = 20 N, V = 0,5 m/s et I = 0 A).

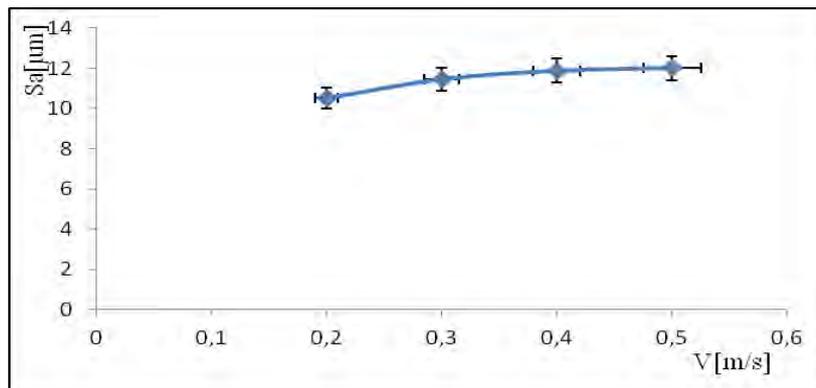
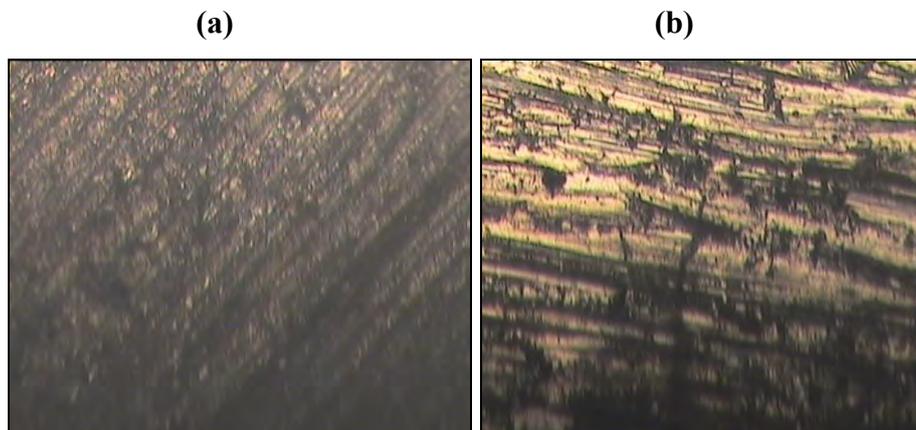


Figure V.44. Variation de la rugosité du pion en laiton en fonction de la vitesse (P = 20 N, t = 30 mn et I = 0 A).



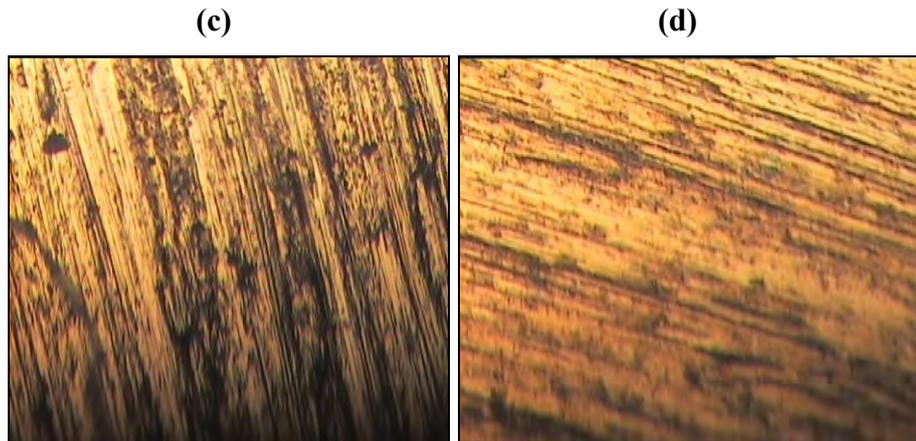


Figure V.45. Images microscopiques (x 20) des pions $P = 20 \text{ N}$, $I = 0 \text{ A}$, (a) pion en acier ($V = 0,3 \text{ m/s}$), (b) pion en acier ($V = 0,5 \text{ m/s}$), (c) pion en laiton ($V = 0,3 \text{ m/s}$) et (d) pion en laiton ($V = 0,5 \text{ m/s}$).

V.4.3. Effet du paramètre temps sur le frottement et l'usure

La durée de rodage dépend des paramètres d'essais. Durant cette période, les contacts entre les éléments des couples sont de nature métallique les transferts mutuels à l'interface sont aussi métalliques [11]. Il y a très peu de débris dans le contact et le coefficient de frottement est faible $\mu = 0,35$ (couple acier-acier) et $\mu = 0,19$ (couple laiton-acier). Avec le temps les débris se forment, particulièrement ceux du laiton écroui sont arrachés et jouent un rôle abrasif (couple laiton-acier). Le même phénomène est aussi observé pour le couple acier-acier, mais les particules sont celles du fer. Le coefficient de frottement augmente (légèrement quand $I = 10\text{A}$) (Figs. V.1 et V. 2), à cause des interactions entre les différentes aspérités des surfaces antagonistes. Au fur et à mesure que le contact dynamique se poursuit, l'adaptation des surfaces survient et le mécanisme de formation et de rupture des jonctions se stabilise par équilibre des conditions de fonctionnement à l'interface (fin du rodage) [12]. Par contre, dans la deuxième zone, le coefficient de frottement est plus stable. Cette stabilité résulte de l'accommodation de l'interface de frottement. Les aspérités sont cisailées et on assiste à une production significative de fines particules provenant des deux surfaces [13]. La production des particules et l'augmentation de la température induisent une stabilité du coefficient de frottement. Ce comportement est dû aux changements de structure et de composition des surfaces superficielles. Le phénomène d'oxydation et le processus mutuel de transfert des particules jouent un rôle important dans le frottement et l'usure des couples [14].

Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

V.4.4. Effet du courant électrique sur le frottement et l'usure

La circulation du courant électrique dans le contact frottant modifie favorablement ou défavorablement les phénomènes induits à l'interface. La circulation d'électrons à l'interface entraîne des modifications des caractéristiques surfaciques. La littérature décrit l'interface comme un ensemble de a-spots, dont la taille est indépendante de la charge appliquée [24]. Des études ont montré aussi, que l'application d'un courant électrique tend simultanément à augmenter le nombre d'a-spots et à diminuer leur taille, rendant ainsi les surfaces plus rugueuses [2, 24, 25] (Figs. V.46 – V.51). L'usure dans ce cas, peut être divisée en deux composantes : l'usure électrique et l'usure mécanique. La première correspond à l'usure induite par les modifications structurales et physiques de la surface dues au passage du courant I . Les usures mécaniques et électriques ainsi que la combinaison des deux sont dépendantes de différents paramètres, comme la pression de contact, l'intensité du courant, les nuances des matériaux...etc. On observe que l'usure électrique est importante sous une charge appliquée faible et diminue lorsqu'on augmente celle-ci (Fig. V.9) ; tandis que l'usure mécanique augmente linéairement (Fig. V.8).

Le passage du courant électrique d'une intensité de 10 A ne contribue pas, d'une manière générale, à une signification positive surtout sur le frottement. En revanche, on constate un effet important sur l'usure quand l'intensité dépasse 6A, pour le couple glissant acier-acier. La diminution de l'usure est environ 2 fois moins que celle sans ou à faible courant ($I \leq 6$ A) (Figs.V. 52). Ceci s'explique par le fait que l'échauffement provoqué par effet joule ramollit le laiton qui est l'un des matériaux à caractère mou [15], sans oublier la fusion de zinc (température de fusion $\sim 419^\circ\text{C}$) et de plomb (température de fusion $\sim 327,4^\circ\text{C}$). Dans ces conditions, le coefficient de frottement augmente progressivement (quand I augmente) pour atteindre des valeurs plus importantes (quand $I = 6$ A). L'augmentation de la résistance électrique de contact R_c traduit l'existence des films d'oxyde et d'autres substances à l'interface (Fig. V.14). La formation de cette couche et son épaisseur ξ sont fonction de l'intensité du champ électrique E et de la charge normale P (Tabs. V.1 et V.2).

La couche d'oxyde rend la surface moins rugueuse que celle obtenue sans courant électrique [16]. Par ailleurs, l'usure au début du frottement en présence du champ électrique est de type abrasive durant les premiers cycles de rotation du disque, puis le film d'oxyde s'accroît jusqu'à recouvrement total. Ce film adhère à l'interface de contact et modifie sa rhéologie par la réduction de la force de frottement dans le contact, il facilite le glissement et diminue l'endommagement et l'usure dus aux déformations plastiques [17]. Des grains

Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

d'oxyde sont produits en petite quantité. Ils restent attachés à la piste de contact par la force électrique, et forment ainsi un lubrifiant solide qui réduit l'usure (Fig. V. 57).

Selon Holm [2], le passage d'un courant et son augmentation se traduisent par une augmentation de la rugosité des surfaces en contact des couples métalliques antagonistes, entraînant un accroissement de l'abrasion (Figs. V.48 - V.51).

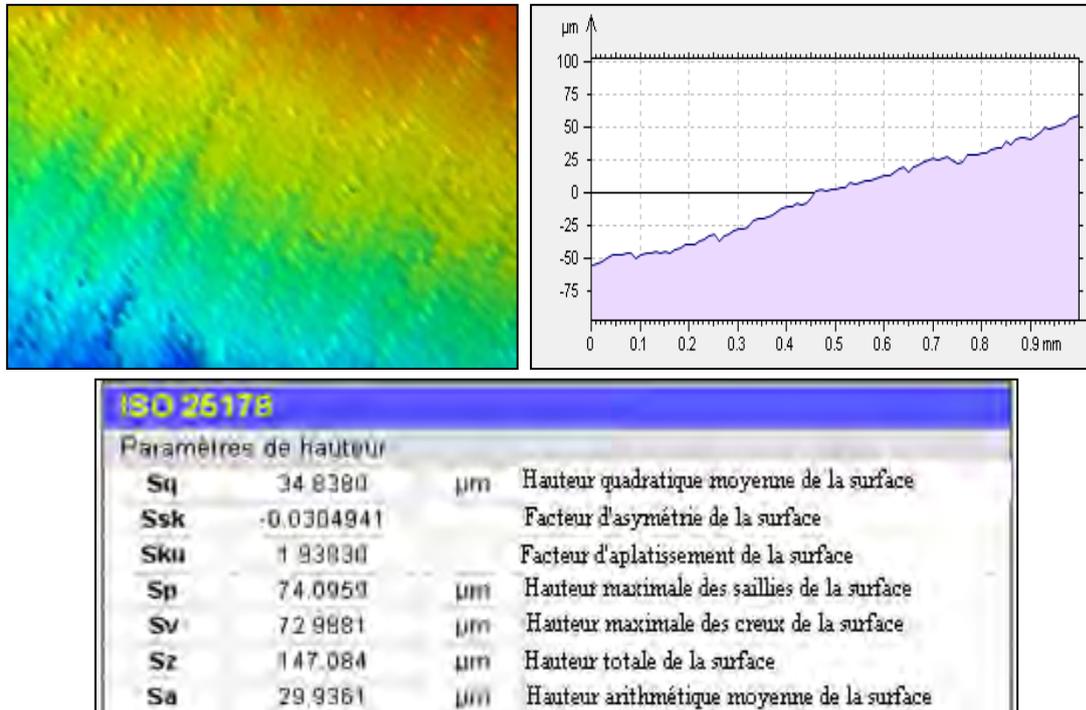
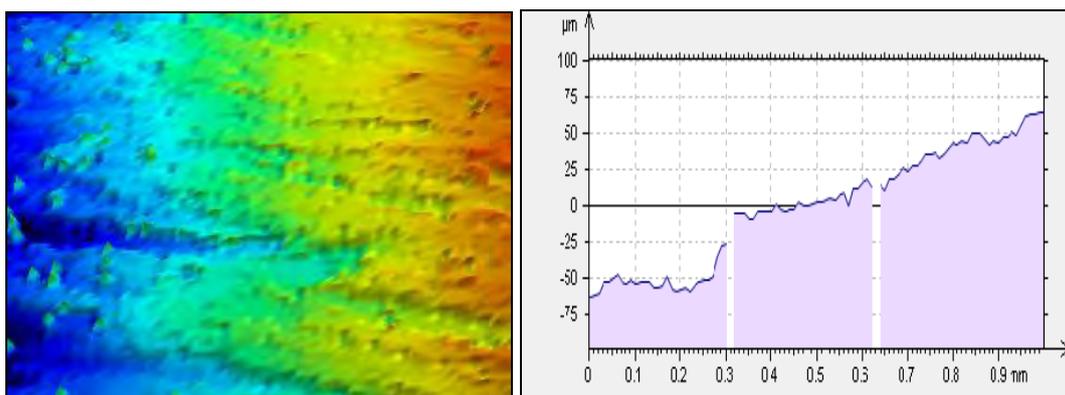


Figure V.46. Morphologie, profil de la surface de glissement et tableau des paramètres obtenus par profilomètre d'un pion en acier ($P = 20 \text{ N}$, $V = 0,5 \text{ m/s}$ et $I = 4 \text{ A}$).



Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

ISO 25178			
Paramètres de hauteur			
Sq	41.4041	µm	Hauteur quadratique moyenne de la surface
Ssk	-0.00480348		Facteur d'asymétrie de la surface
Sku	1.90862		Facteur d'aplatissement de la surface
Sp	88.9370	µm	Hauteur maximale des saillies de la surface
Sv	78.7525	µm	Hauteur maximale des creux de la surface
Sz	167.190	µm	Hauteur totale de la surface
Sa	35.5006	µm	Hauteur arithmétique moyenne de la surface

Figure V.47. Morphologie, profil de la surface de glissement et tableau des paramètres obtenus par profilomètre d'un pion en acier (P = 20 N, V = 0,5 m/s et I = 8 A).

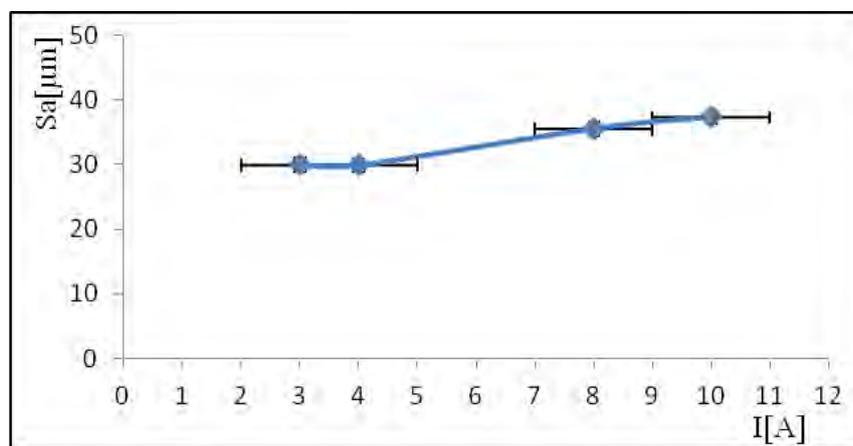
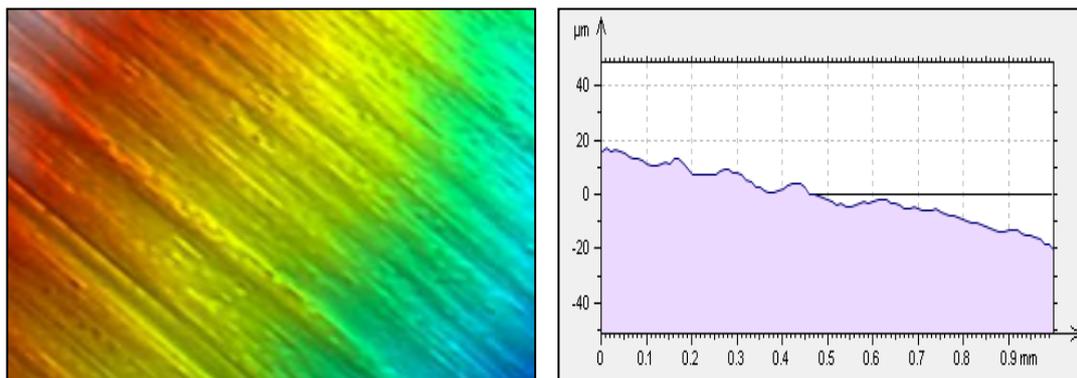


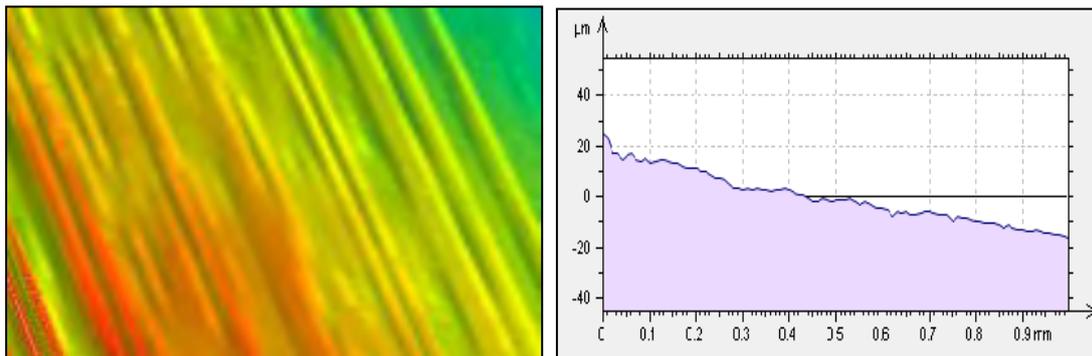
Figure V.48. Variation de la rugosité du pion en fonction du courant électrique (P = 20 N, V = 0,5 m/s et t = 30 mn).



Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

ISO 25178			
Paramètres de hauteur			
Sq	24.5876	µm	Hauteur quadratique moyenne de la surface
Ssk	-0.0111094		Facteur d'asymétrie de la surface
Sku	2.08860		Facteur d'aplatissement de la surface
Sp	55.7024	µm	Hauteur maximale des saillies de la surface
Sv	55.7024	µm	Hauteur maximale des creux de la surface
Sz	111.405	µm	Hauteur totale de la surface
Sa	20.8292	µm	Hauteur arithmétique moyenne de la surface

Figure V.49. Morphologie, profil de la surface de glissement et tableau des paramètres obtenus par profilomètre du pion en laiton (P = 20 N, V = 0,5 m/s et I = 4 A)



ISO 25178			
Paramètres de hauteur			
Sq	28.9552	µm	Hauteur quadratique moyenne de la surface
Ssk	-0.122581		Facteur d'asymétrie de la surface
Sku	2.71477		Facteur d'aplatissement de la surface
Sp	66.1006	µm	Hauteur maximale des saillies de la surface
Sv	68.1631	µm	Hauteur maximale des creux de la surface
Sz	134.294	µm	Hauteur totale de la surface
Sa	24.2535	µm	Hauteur arithmétique moyenne de la surface

Figure V.50. Morphologie, profil de la surface de glissement et tableau des paramètres obtenus par profilomètre du pion en laiton (P = 20 N, V = 0,5 m/s et I = 10 A).

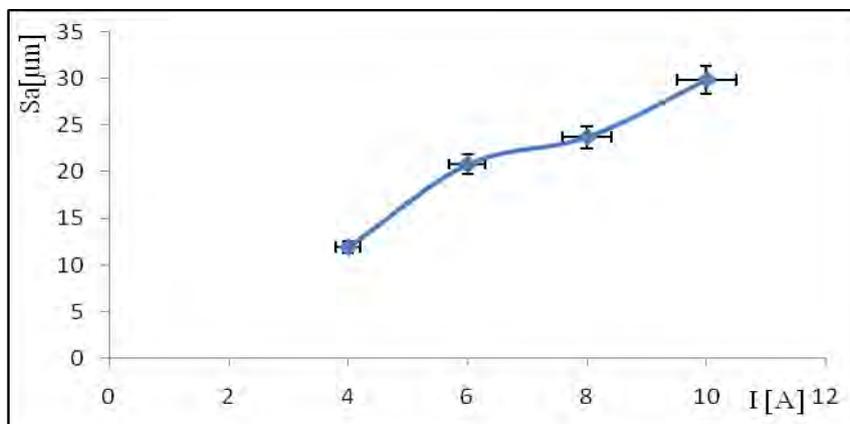


Figure V.51. Variation de la rugosité du pion en laiton en fonction du courant électrique (P = 20 N, V = 0,5 m/s et t = 30 mn).

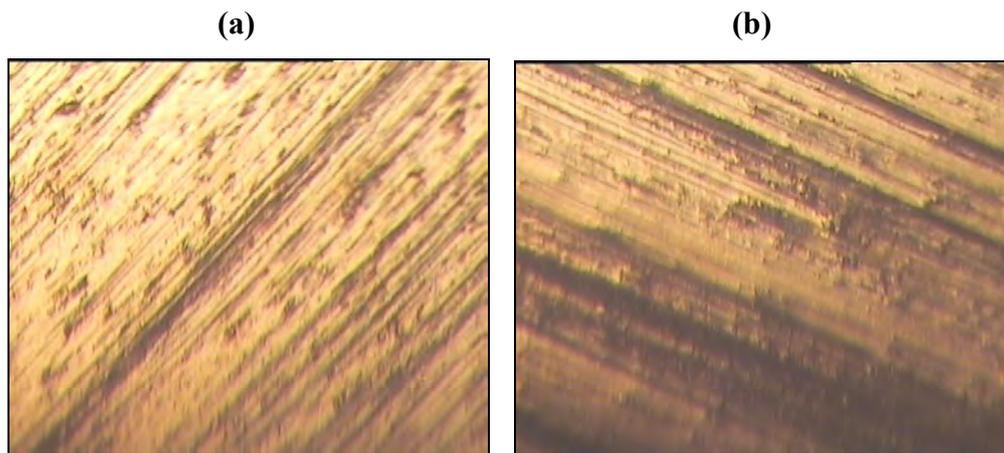


Figure V.52. Images microscopiques d'un pion en laiton pour une charge normale $P = 20$ N et une vitesse de glissement $V = 0,5$ m/s, (a) $I = 4$ A, (b) $I = 10$ A

V.4.5. Effet de la chaleur dégagée sur le frottement et l'usure

La quantité de chaleur dégagée lors d'un contact glissant est exprimée par : $Q_p = Q_m + Q_e = \mu.P.V + R_c.I^2$. On constate qu'à l'effet joule s'ajoute l'influence de la charge dynamique $P.V$ [18]. L'élévation de température des surfaces augmente la vitesse des différentes réactions et en particulier la vitesse de formation de la couche d'oxyde [19]. Cette couche croît avec le temps jusqu'à sa rupture par la contrainte de cisaillement à l'interface, lorsqu'il atteint son épaisseur critique [20]. Le degré d'oxydation est contrôlé par la concentration de l'oxygène et la température atteinte à l'interface. Des observations microscopiques (Figs. V.53 et V.54) montrent des arrachements dus à l'adhésion et des rayures plus ou moins profondes attestant l'effet des particules actives sur les surfaces usées. Le transfert métallique intervient aussi dès le début de frottement [27]: transfert de laiton sur l'acier et l'acier A60 sur l'acier 42CrMo4.

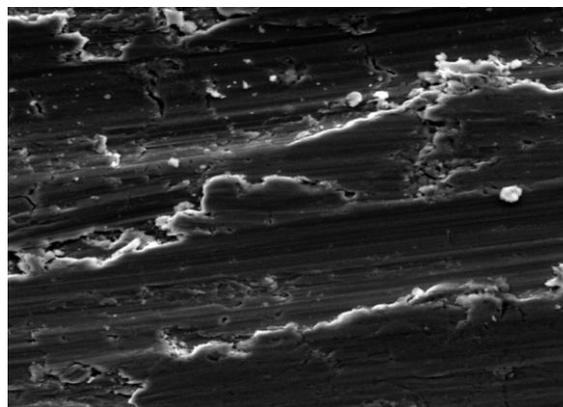


Figure V.53. Micrographie obtenue par microscope électronique à balayage (M.E.B) de la surface usée de l'acier ($P = 20$ N, $V = 0,4$ m/s et $I = 0$ A)

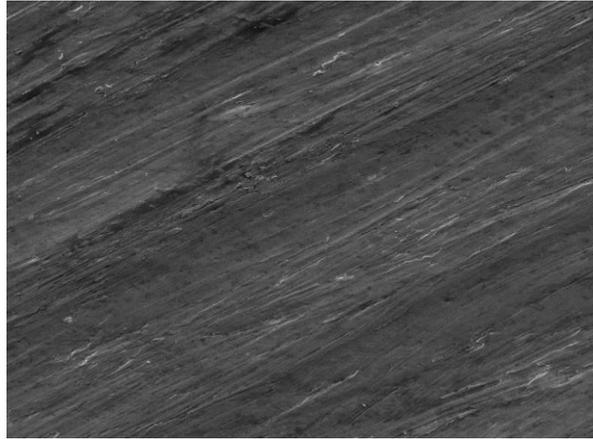


Figure V.54. Micrographie obtenue par microscope électronique à balayage (M.E.B) de la surface usée de laiton ($P = 20 \text{ N}$, $V = 0,5 \text{ m/s}$ et $I = 0 \text{ A}$)

V.4.6. Effet de l'arc électrique sur le comportement en frottement et usure des couples glissants acier-acier et laiton-acier

Pour observer les phénomènes d'arcs électriques à l'interface des contacts glissants, on fait traverser l'interface par un courant électrique de 10 A. Dans ces conditions, des endommagements et des cratères ont été observés sur la surface usée du pion. Ceux-ci dépendent essentiellement de la distance pion-disque (décollement du pion) de la densité du courant électrique (diminuent lorsque la densité augmente), de la charge d'appui, de l'épaisseur de la couche d'oxyde... ce qui induirait soit l'usure de l'anode lors de faibles distances, soit de la cathode lors de distances plus grandes [26]. La prédiction des endommagements générés par des arcs électriques reste très complexe. Elle dépend d'un grand nombre de paramètres tels que les matériaux, l'environnement, le courant et la tension aux bornes du contact...etc. On constate que la présence des arcs augmente considérablement l'usure mais cette augmentation décroît avec la charge appliquée.

- pour le couple acier-acier, après environ 15 minutes de fonctionnement, on a observé l'apparition des étincelles au niveau de contact. Dans ces conditions, la résistance électrique de contact présente une forte fluctuation, et varie de 85 à 80 m Ω (Fig. V. 23).
- pour le couple laiton-acier, les étincelles sont apparues après environ 25 minutes et la résistance électrique de contact est faible par rapport à celle du couple acier-acier, et fluctue entre 21 et 25 m Ω (Fig. V. 22).

V.4.6. Effet des particules d'usure sur le frottement et l'usure

On a pu constater l'existence de deux types de grains :

Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

- Les grains passifs : après leur arrachement des sites de formation, ils sont rapidement évacués de la piste de frottement et ne jouent pas de rôle important. Ils sont souvent composés de grosses particules.

- Les grains actifs : de taille plus petite, ils participent au processus d'usure abrasive. Ils se présentent sous forme de poudre constituée d'un mélange de métal et des oxydes, en plus d'autres constituants interfaciaux. Ils restent à l'interface, diminuent l'effet anti-grippant des couches oxydées et accélèrent l'enlèvement des pellicules d'oxydes superficielles, tendant ainsi à augmenter l'usure pendant le régime de glissement [21].

Par ailleurs, l'aire de la surface réelle de contact des éléments de surface diminue, lorsque l'épaisseur des couches d'oxyde croît, et les contacts qui s'établissent sont plus fragiles, surtout lorsqu'ils s'effectuent à travers des grains (Fig. V.55). La rupture se fait au niveau de l'interface grain-métal [22].

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

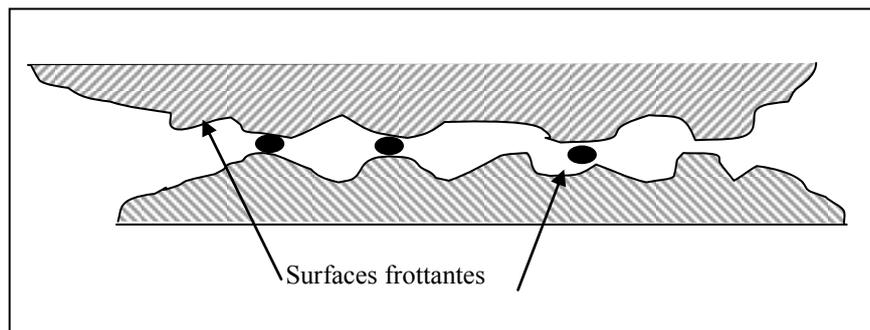


Figure V.55. Les jonctions métalliques s'effectuent par l'intermédiaire des grains de la poudre d'usure

V.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre on a présenté les principaux résultats expérimentaux et théoriques relatifs aux processus de frottement et d'usure des couples glissants laiton-acier et acier-acier avec et sans passage de courant électrique. Il ressort de ce chapitre ce qui suit :

- en absence du courant électrique, pour une charge normale inférieure à 10 N le coefficient de frottement diminue progressivement jusqu'à une valeur de 0,5 du couple acier-acier et de 0,35 du couple laiton-acier. Pour une charge supérieure à 10 N, μ se stabilise à 0,48 pour le couple acier-acier et garde une valeur constante autour de 0,25 pour le deuxième couple, puisque, les surfaces de contact croient au fur et à mesure que la charge P normale augmente, sous l'action combinée de la pression normale et la contrainte tangentielle d'une part. D'autre part, les aires de contact ne se touchent que par les aspérités les plus élevées et ces aspérités s'enchevêtrent pour former la surface réelle du contact.
- l'usure augmente proportionnellement avec la charge appliquée pour les deux couples glissants en absence du courant électrique et elle est plus importante pour le couple acier-acier.
- le passage du courant électrique à travers le contact diminue l'usure et le coefficient de frottement à $\mu = 0,41$ pour acier-acier et à $\mu = 0,21$ pour laiton-acier. Ceci s'explique par le fait que l'échauffement provoqué par effet joule contribue au processus d'oxydation et au changement des caractéristiques du matériau le plus tendre.
- le coefficient de frottement croît légèrement puis se stabilise à 0,50 pour le couple acier-acier et présente une dépendance linéaire avec la vitesse de glissement pour le couple laiton-acier. Par contre, l'usure croît proportionnellement à la vitesse de glissement et est plus remarquable pour un courant de 10 A pour le couple acier-acier. L'usure du couple laiton-acier est faible en présence du courant électrique.
- pour une intensité du courant de 10 A, μ du couple laiton-acier présente toujours une allure linéaire avec la vitesse il est de valeur 0,25, par contre μ du couple acier-acier présente une élévation jusqu'à 0,98 pour une vitesse $V = 0,4$ m/s, ensuite, une diminution jusqu'à 0,80. La décroissance du coefficient de frottement et de l'usure est due, d'une part à la diminution du temps de croissance des jonctions et d'autre part, à la formation d'une couche d'oxyde sur la face frottante du pion.
- la résistance électrique de contact présente une allure décroissante pour les deux couples, ce qui signifie une augmentation de la surface réelle de contact et une diminution de la section occupé par l'oxyde qui se produit moins en profondeur dans le solide (facilement détachable).

Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

- la température de contact au niveau de l'interface permet d'avoir un ramollissement des jonctions de contact qui facilite le glissement des deux surfaces antagonistes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **A. Bouchoucha**. Etude du comportement en frottement et usure du couple cuivre-acier, thèse de doctorat INPL, Nancy, France (1997).
- [2] **R. Holm**. Electrical contacts, Theory and applications. Springer-Verlag, Berlin, (1967).
- [3] **A. Bouchoucha and al.** Influence of electric fields on the tribological behavior of electrodynamical copper/steel contacts, *Wear* 203-204, 434-441, (1997).
- [4] **A. Bouchoucha and al.** Influence of the electrical sliding speed on friction and wear processes in an electrical contact copper–stainless steel, *Applied Surface Science*, 223, 330-342, (2004).
- [5] **J. F. Archard**. The temperature off rubbing surfaces *Wear* 2, 438-455, (1958/1959).
- [6] **E. Hounkponou and al.** Tribological behavior of graphite/graphite and graphite/copper couples in sliding electrical contact: Influence on the contact electric field on the surface passivation. *Applied Surface Science*, 70/71, 176-179, (1993).
- [7] **H. Zahouani and al.** Effect of roughness scale on contact stiffness between solids, *Wear* 04.067, (2008).
- [8] **A. Bouchoucha and al.** Metal transfer and oxidation of copper-steel surfaces in electrical sliding contact, *Surface and Coatings Technology* 76-77, 521-527, (1995).
- [9] **S. Jacobson and S. Hogmark**. Surface modifications in tribological contacts, *Wear* 04.035S, (2008).
- [10] **N. Laraqi and al.** Temperature and division of heat in a pin-on-disc frictional device-Exact analytical solution, *Wear*, 08.016, (2008).
- [11] **W. Y. Park and al.** The influence of current load on fretting of electrical contacts, *Tribology International*, 09.004L, (2008).
- [12] **D.H. He et al.** A sliding wear tester for overhead wires and current collectors in light rail systems *Wear* 239, 10–20, (2000).
- [13] **M. G. Diehl**. *Wear of electrical contacts*. Vol. 1 (1957/1958)
- [14] **G. Bucca, A. Collina**. A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph–catenary system. *Wear* 266, 46–59, (2009).
- [15] **D.H. Hwang et al.** Influence of wear particle interaction in the sliding interface on friction of metals. *Wear* 225–229, 427– 439, (1999).
- [16] **H. Zaïdi, M. Amirat, C. Vallée et J. Frêne**. Magnéto-tribologie des contacts glissants ferromagnétiques, 18ème Congrès Français de Mécanique Grenoble, 27-31 août (2007).

Chapitre V : Influence de la vitesse, la charge normale et l'intensité du courant électrique sur le comportement tribologique des couples glissants acier-acier et laiton-acier

- [17] **M.O.A. Mokhtar et al.** A theoretical and experimental study on the dynamics of sliding bodies with dry conformal contacts. *Wear* 218, 172-178, (1998).
- [18] **P. A. Engel et al.** Hardness, friction and wear of multiplicated electrical contacts. *Wear*, 162-164, 538-553, (1993).
- [19] **J.B. Singh et al.** Dry sliding of Cu–15 wt%Ni–8 wt% Sn bronze: Wear behavior and microstructures. *Wear* 263, 830–841, (2007).
- [20] **R. Komanduri, Z. B. Hou.** Analysis of heat partition and temperature distribution in sliding systems. *Wear* 251, 925–938, (2001).
- [21] **E.M. Lyszczek et al.** Ohmic contacts to p-type In As Materials Science and Engineering B 134, 44–48, (2006).
- [22] **T. Hisakado, T. Tsukizoe.** Effects of distribution of surface slopes and flow pressures of contact asperities on contact between solid surfaces, *Wear* 30, pp 213-227, (1974).
- [23] **T. D. S. Botelho.** Contribution à l'étude du comportement elastoplastique de surfaces métalliques rugueuses revêtues d'un métal de faible dureté, Thèse Pour l'obtention du Grade de Docteur de l'université de Poitiers (Faculté de sciences fondamentales et appliquées), (2004).
- [24] **J. K. Lancaster and I. W. Stanley.** The effect of current on the friction of carbon brush materials, *British Journal of Applied Physics*. 15, 29. doi:10.1088/0508-3443/15/1/304, (1964).
- [25] **E. Csapo, H. Zaidi and Paulmier.** Friction behaviour of a graphite-graphite dynamic electric contact in the presence of argon, *Wear*, Volume 192, Issues 1–2, Pages 151–156 (1996).
- [26] **C. Boubechou, A. Bouchoucha, H. Zaidi and Y. Mouadji.** Thermal and tribological analysis of the dry sliding steel-steel couple traversed by an electrical current. *Science Direct, Elsevier; Physics Procedia* 55 pp. 165-172 (2014).
- [27] **C. Boubechou, A. Bouchoucha and H. Zaidi.** Influence of mechanical parameters on the friction and wear of sliding brass-steel Couple. *InterM2014. 2nd International Multidisciplinary Microscopy and Microanalysis Congress Oludeniz, TURKEY; October 16-19, (2014).*

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de thèse, a permis d'avancer dans la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu lors du contact glissant sec des couples antagonistes cuivre-acier, cuivre-graphite, laiton-acier et acier-acier avec et sans passage du courant électrique. A l'aide d'un tribomètre pion-disque et des techniques d'analyse et de caractérisation de nos échantillons (surfaces usées), ainsi que l'utilisation d'un modèle analytique phénoménologique d'usure (le modèle d'Archard), on a donné suite aux diverses expérimentations une étude profonde du comportement tribologique des différents couples.

Les essais de frottement des différents matériaux qu'on a menés, ont permis de faire une comparaison différentielle des comportements tribologiques, ceci grâce au choix justifié des matériaux. On a aussi étudié l'influence des paramètres mécaniques, géométriques, électriques et les propriétés de chaque couple sur le coefficient de frottement et l'usure ainsi que sur le phénomène de l'oxydation.

Pour le couple dynamique cuivre-acier, les paramètres : charge normale, vitesse de glissement, le temps et le courant électrique jouent un rôle essentiel sur le comportement tribologique surtout sur le processus d'oxydation et la croissance du film d'oxyde. Ces oxydes réduisent la surface réelle de contact, protège le pion contre l'usure et diminue le coefficient de frottement quelle que soit la géométrie de contact pion-disque ou câble-disque. En effet, la géométrie de contact n'a pas d'influence significative sur le frottement.

L'aire réelle de contact pour le couple cuivre-acier et de l'ordre de 50 à 90 μm et l'épaisseur critique du film d'oxydes est située entre 20 Å et 80 Å, par contre, le couple cuivre-graphite a et de l'ordre de 49 à 150 μm et ξ et entre 100 Å et 1000 Å pour des conditions de fonctionnement bien définies ($P = 10 \text{ N}$, $V = 1,2 \text{ m/s}$, $I = 40 \text{ A}$ et $t = 60 \text{ min}$). Le couple laiton-acier, le rayon réel de contact $70 \leq a \leq 80 \mu\text{m}$ et $124,32 \leq \xi \leq 162,38 \text{ Å}$ et le contact glissant acier-acier $30 \leq a \leq 60 \mu\text{m}$ et l'épaisseur $70,5 \leq \xi \leq 500 \text{ Å}$ pour les conditions ($P = 20 \text{ N}$, $I = 10 \text{ A}$, $V = 0,5\text{m/s}$ et $t = 30 \text{ min}$).

En absence du courant électrique, le comportement tribologique sec des couples acier-acier, laiton-acier, cuivre-acier et cuivre-graphite différents d'un couple à l'autre. Généralement, le courant n'a pas d'influence significative sur le coefficient de frottement quel que soit le contact mécanique. L'usure dans ce cas est notamment une usure adhésive douce

car la résistance de contact est élevée et la taille de particules d'usure est petites, plus la présence des oxydes.

Le passage du courant électrique à l'interface joue un rôle majeur sur le comportement en frottement et en usure des contacts antagonistes. D'une part, il modifie les caractéristiques surfaciques, structurelles, la nature, la composition et la rupture du film d'oxyde. D'autre part, il induit un champ électrique qui est proportionnel à l'intensité du courant et la résistance de contact et inversement proportionnel à la charge normale. La direction de ce dernier est influencée par la vitesse linéaire de glissement, pour des petites vitesses ce champ est perpendiculaire au contact. Quand l'intensité du champ électrique augmente l'épaisseur de film d'oxyde diminue et la contrainte de cisaillement décroît. L'usure dans ce cas, est divisée en deux composantes mécanique et électrique et l'augmentation du courant électrique se traduit par une augmentation de la rugosité des surfaces en contact entraînant un accroissement de l'abrasion, l'usure de type abrasif.

La décroissance de la résistance électrique de contact avec la charge appliquée présente la même allure pour les quatre couples étudiés. Le contact cuivre-graphite présente une usure douce, la surface usée est plus importante par déformation plastique et la résistance électrique diminue. Le contact cuivre-acier a pour effets d'augmenter l'oxydation, diminuer l'usure, réduire la surface usée et minimiser la résistance électrique de contact. Dans le cas du contact laiton-acier, la résistance électrique de contact mesurée est de l'ordre d'une trentaine de milli Ohms et de quarantaine de milli Ohms pour le contact glissant acier-acier et ces valeurs pourraient être due au fait que le courant ne passe qu'en certains endroits du contact en raison de la présence continue de l'oxyde natif isolant à l'interface de contact.

Le passage du courant à travers les points de contact peut avoir pour effet d'élever de façon significative la température locale des points de contacts. En effet, l'interface dissipe une quantité importante de chaleur par effet Joule et entraîne, par la suite, l'oxydation et donne naissance à des couches d'oxydes entraînent un comportement sévère en frottement et usure et provoque une modification structurelle de la surface. La température du couple acier-acier est plus importante que les autres couples; par contre, dans le cas des contacts sec cuivre-graphite, laiton-acier et cuivre-acier, la température semble peut dépendante de la charge. Le rayon réel de contact et l'épaisseur du film d'oxyde sont proportionnels à l'augmentation du courant électrique ainsi qu'à l'augmentation de la charge appliquée.

Perspectives

La compréhension globale des phénomènes de frottement et d'usure ayant lieu dans les contacts électriques glissants des couples des matériaux est très variée, elle nécessite beaucoup d'analyses pour pouvoir étudier l'effet des différents paramètres qui agissent sur le comportement tribologique. Il serait intéressant donc de considérer dans les projets à venir les points suivants :

- Etude du comportement en frottement et en usure des couples des métaux sous des intensités de courant élevées,
- Etude du comportement tribologique des contacts mécaniques sous des charges et des vitesses très élevées avec et sans courant électrique;
- Etudier expérimentalement l'effet de la rugosité sur le frottement et l'usure pour les contacts électriques glissants ;
- Développer un modèle numérique qui prévoit la distribution des contraintes mécaniques, thermique et électriques dans les contacts électriques glissants.
- Modéliser la diffusion de l'oxygène à travers la couche d'oxyde dans les contacts électromécaniques.