

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M.Ing.

PAR
KHEMICI BADRI

EFFET DES COUPLES MÉTALLIQUES ET DU COURANT
ÉLECTRIQUE SUR LA DÉGRADATION EN MÉSO-FRETTING

MONTRÉAL, LE 08 NOVEMBRE 2006

(c) droits réservés de Khemici Badri

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Jacques Masounave, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Robert Hausler, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Victor Songmené, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Daniel Gagnon, examinateur externe
IREQ, HYDRO QUÉBEC

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC
LE 08 NOVEMBRE 2006
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

EFFET DES COUPLES MÉTALLIQUES ET DU COURANT ÉLECTRIQUE SUR LA DÉGRADATION EN MÉSO-FRETTING

Khemici Badri

SOMMAIRE

De nos jours, la technologie de surface ne cesse d'avancer à la recherche de nouvelles performances tribologiques des systèmes oscillants en contact. Les contraintes augmentant et les exigences environnementales se multipliant, le rôle de la surface devient de plus en plus déterminant.

Ce travail de recherche porte sur l'étude du comportement à la dégradation des couples de matériaux métalliques sous micro frottement. Cet objectif passe par l'identification et la compréhension des mécanismes responsables de la dégradation. L'étude a été développée sur les trois stades de frottement : le fretting, le méso-fretting et le frottement à basse amplitude jusqu'à 400 μ m. Les couples testés incluent les combinaisons des matériaux suivants : acier à hautes performances en usure de la nuance AISI 52100, l'acier inoxydable austénitique 316L, l'alliage d'aluminium de corroyage 6061T6 et le cuivre pur. Les essais ont été effectués à 20000 cycles sous une charge de contact constante de 72gf et une fréquence de 1Hz. La géométrie de contact utilisée est un système bille-plaque. L'effet du courant électrique a aussi été étudié. Les outils de caractérisation de surface comme le microduromètre Vickers, le microscope optique (MO) et le microscope électronique à balayage (MEB) ont été utilisés pour caractériser les traces d'usure.

À la lumière des résultats d'usure obtenus, il ressort que le facteur compatibilité chimique, le rapport relatif des duretés et le phénomène de la consolidation régissent la tenue à la dégradation. L'amplitude du mouvement a , en particulier, une grande influence sur l'évolution de l'usure quelque soit la nature du couple.

Il a aussi été conclu que la variation du taux d'usure en fonction de l'amplitude de vibration pour chaque couple possède une allure qui est très sensiblement la même. Un formalisme mathématique décrivant ce phénomène physique a été élaboré.

L'effet du courant est important quand l'amplitude du mouvement est grande. Cependant, l'usure relative est grande sous courant en fretting. On attribue cet effet au rapport de la densité du courant électrique à l'amplitude de glissement. Ce rapport s'est avéré être très élevé en fretting à comparer aux deux autres stades. Aussi, pour une amplitude de mouvement constante en frottement à basse amplitude, une forte corrélation linéaire est établie entre le taux de dégradation et l'intensité du courant électrique.

On a également constaté que pour les couples caractérisés par de faibles taux d'usure à cette amplitude, le courant électrique n'exerce pas une influence marquée. Une relation généralisée, tenant compte des effets du mouvement, du courant électrique et du couple a été proposée.

EFFECT OF THE METALIC COUPLES AND ELECTRIC CURRENT ON THE DERADATION IN MESO-FRETTING

Khemici Badri

ABSTRACT

Nowadays, the technology of surface does not cease advancing in the search of new tribological performances for the systems of contact. The environmental constraints are increasing and requirements multiplying, the functionality of surfaces becomes more and more determining.

The emphasis of this work is to study the degradation behaviour of metallic materials couples under fretting conditions. This objective is accomplished by identification and comprehension of the factors responsible for the degradation. The study was developed for the three stages of wear at low amplitude: the fretting, the meso-fretting and friction low amplitude up to 400 μ m. The pairs of materials tested included: AISI 52100 high wear performances steel, 316L austenitic stainless steel, 6061T6 wrought aluminium alloy and pure copper. The tests were carried out up to 20000 cycles under a contact load of 72gf and a frequency of 1Hz. The geometry of contact used is ball-plate system. The effect of electrical current on fretting of these materials was also investigated. Materials surface characterization such as microdurometer Vickers, optical microscope (OM) and Scanning Electron Microscopy (SEM) were used to evaluate the degradation level of the materials.

It arises from this work that chemical compatibility, relative ratio of hardnesses and the work hardening explain the degradation behaviour. The amplitude of the movement has a great influence on the evolution of wear of all materials tested. The variation of the wear as function of the amplitude of vibration for each couple of materials followed the same trend. A mathematical model describing this physical phenomenon was elaborated.

It was also found that the effect of the current becomes important for large amplitude of slip. However, relative wear is large under current in fretting. One allots this effect to the ratio of the electrical current density to the amplitude of slip. This ratio proved to be very high in fretting in comparison with the two other stages. Also, for constant amplitude of movement in friction at low amplitude, there is a strong linear correlation between the degradation rate and the intensity of the electrical current. It was also noted that for the couples characterized with weak wear rates at this amplitude, the electrical current does not exert a marked influence. A generalized relation taking account the effects of the movement, the electrical current and the materials couple was proposed.

REMERCIEMENTS

La réussite de l'individu ne peut s'achever sans la contribution des autres. J'aimerais tout d'abord exprimer ma sincère gratitude et mon appréciation à mon directeur de recherche, le professeur Jacques Masounave, pour son aide précieuse, ses conseils et son support qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de mes études à l'ÉTS et notamment durant la réalisation du projet. Je voudrais également le remercier pour m'avoir offert l'opportunité de travailler dans ce domaine de recherche intéressant sur le fretting et de m'avoir aidé à surmonter les obstacles pour mener à bien ce travail.

J'aimerais exprimer aussi mes remerciements au Dr Daniel Gagnon de l'IREQ, Hydro Québec de sa volonté et du temps qu'il a consacré pour l'échange des idées ainsi que de son aide dans l'exécution des expériences et des mesures. Un remerciement tout particulier aux professeurs Victor Songmené et Robert Hausler d'avoir accepté d'être les membres de jury de la soutenance du présent mémoire. Je tiens également à remercier les professeurs de l'ÉTS qui ont contribué à ma formation.

J'en serai gré à tous mes collègues au niveau du laboratoire de matériaux pour les conversations et suggestions perspicaces qui ont aidé à l'accomplissement de cette recherche : G. Jean-Guy , K. Riad, N. Roger, B. Baha, S. Alexandre, M. Valérie, Mathieu. Je voudrais aussi remercier tous mes collègues de la promotion du climat estudiantin et chaleureux que l'on a entretenu durant nos études à l'ÉTS.

Un vif remerciement à mes amis pour leur amitié et soutien et à ceux que j'ai depuis longtemps : K. Djeflal, T. Abid, T. Aifa, F. Souar, K. Anane, M. Bouali, A. Messaoudi, T. Zebar, M. Mehatef, T. Reragui, S. Hamrit, A. Hamrit, N. Salhi, N. Djeddi, D. Bouzidi, A. Bouaiss, A. Hassanine, A. Raiague, M. Jellal, S. Rahmani, M. Chekhchoukh, R. Hanat, R. Khettabi, T. Benisse, H. Galai, A. Bensnouci, R. Khaloudji, S. Nabil sans oublier les noms de personnes que je n'ai pas pu citer et qui savent pertinemment qu'ils méritent toute mon estime.

Je voudrais exprimer ma profonde gratitude et ma satisfaction sincère à mes parents, Larbi et Lallahoum, pour tout leur sacrifice et encouragement dans toutes mes démarches et réussites. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance dévouée de m'avoir ainsi donné leur plus grand appui pour me permettre d'être le meilleur que je puisse être. Un remerciement spécial va également à mes frères Louahbi, Elyamine, Abdelmalek, Toufik et ma sœur Zahira pour leur soutien et attachement tout au long de mon cheminement dans la vie.

Je voudrais dédier ce mémoire à tous les membres de ma famille ainsi qu'à la mémoire de mes grands parents. Si Dieu le veut, j'aimerais aussi le dédier à celle qui sera un jour la compagne de ma vie. À la toute fin, je remercie grandement Dieu de sa grâce.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	iii
ABSTRACT	v
REMERCIEMENTS.....	vi
TABLE DES MATIÈRES.....	viii
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES	xvii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 TECHNOLOGIE DE SURFACE.....	3
1.1 Dégradation de surface	3
1.2 Usure et mécanismes	4
1.3 Technologie de surface	5
1.4 Critères de sélection d'un matériau à résistance optimale à l'usure	6
1.5 Interaction matériaux et environnement	8
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	9
2.1 Interaction	9
2.2 Causes de micro mouvements oscillatoires	9
2.3 Surfaces de contact	10
2.4 Troisième corps et débris d'usure	11
2.5 Considérations de déformation de surfaces	13
2.6 Contact hertzien	14
2.7 Régimes de fretting.....	16
2.8 Mécanismes de destruction en fretting	18
2.9 Fretting fatigue.....	19
2.10 Théories de l'usure.....	20
2.10.1 Déformation plastique et particules d'usure	20
2.10.2 Particules d'usure.....	22
2.10.3 Transfert de matière	22
2.10.4 Modèles d'usure.....	23
2.11 Dégradation de contact électrique sous fretting.....	24
2.11.1 Introduction.....	24
2.11.2 Effet de la température.....	25
2.11.3 Effet du courant électrique.....	26
2.11.4 Résistance électrique.....	27

2.11.5	Effet de la charge	28
2.11.6	Polarité	28
2.11.7	Les intermétalliques	29
2.11.8	Triboémission	31
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE ET PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE.....		33
3.1	Appareil de fretting	33
3.2	Choix des matériaux	34
3.3	Propriétés des matériaux	35
3.4	Procédure expérimentale.....	36
3.4.1	Fretting sans courant électrique	37
3.4.2	Fretting avec courant électrique.....	37
3.5	Techniques de caractérisation de la dégradation	38
3.5.1	Mesure du coefficient de friction.....	38
3.5.2	Quantification de la dégradation : volume de métal perdu.....	39
3.5.3	Calcul du taux d'usure	44
CHAPITRE 4 RÉSULTATS		45
4.1	Dégradation sans courant électrique	45
4.1.1	Taux de dégradation.....	45
4.1.2	Relation entre la pente $\left(\frac{\Delta\dot{W}}{\Delta X}\right)$ en méso-fretting et le niveau d'usure en frottement à basse amplitude.....	52
4.1.3	Coefficient de friction : amplitude du mouvement.....	53
4.1.4	Coefficient de frottement : nombre de cycles.....	55
4.2	Fretting et courant électrique	59
4.2.1	Taux de dégradation.....	59
4.2.2	Dégradation en fretting	63
4.2.3	Caractérisation mécaniques des surfaces.....	65
4.2.3.1	Mesures de micro dureté.....	65
4.2.3.2	Écrouissage des matériaux.....	66
4.2.3.3	Effet du courant	67
4.2.4	Coefficient de friction.....	70
4.2.5	Résistance à la dégradation des couples	73
CHAPITRE 5 DISCUSSION.....		75
5.1	Fretting sans courant électrique	75
5.1.1	Représentation généralisée du comportement à l'usure	75
5.1.2	Description macroscopique.....	76
5.1.3	Établissement d'un modèle mathématique	78
5.1.3.1	Changement de variables	79
5.1.3.2	Représentation des données : taux d'usure expérimentale et taux d'usure du modèle mathématique	80
5.1.4	Facteurs influents.....	85

5.1.4.1	Contacts à faible usure : classe I.....	85
5.1.4.2	Contacts à usure intermédiaire: classe II	89
5.1.4.3	Contacts à haute usure : classe III.....	91
5.1.5	Étude morphologique des traces de fretting	92
5.1.5.1	Cas de AISI 52100-316L : matériau dur- matériau mou	92
5.1.5.2	Cas de 6061T6-316L : matériaux de dureté proche.....	94
5.1.6	Schématisation de l'usure en méso-fretting.....	96
5.1.7	Discussion.....	99
5.2	Contacts sous courant électrique.....	101
5.2.1	Rapport du taux d'usure et de la dureté relative	101
5.2.3	Évolution de l'usure sous courant électrique.....	104
5.2.4	Effet combiné du courant et de l'amplitude.....	108
	CONCLUSION.....	110
	RECOMMANDATIONS	112
	BIBLIOGRAPHIE.....	115

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Composition chimique nominale de AISI 52100 et 316L 35
Tableau II	Composition chimique nominale de 6061 T6 36
Tableau III	Propriétés mécaniques des matériaux 36
Tableau IV	Expériences réalisées sans courant électrique 37
Tableau V	Expériences réalisées avec courant électrique 38
Tableau VI	Micro dureté Vickers des matériaux des plaques 66
Tableau VII	Formulation mathématique de l'usure des couples 80
Tableau VIII	Limite de solubilité chimique du cuivre dans la composition du 316L ... 88

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Schématisation de la dégradation de matériaux en fonction de la perte de performance d'un système technologique 4
Figure 2	Relations entre mécanismes d'usure et causes physiques..... 5
Figure 3	Critères de sélection d'un matériau résistant à l'usure..... 7
Figure 4	Interaction d'aspérités de contact..... 10
Figure 5	Courbe de traction vs glissement dans un contact non lubrifié..... 13
Figure 6	Configuration du modèle de contact hertzien 14
Figure 7	Approche de Mindlin : conditions de glissement dans un contact sphère sur plan sous force tangentielle..... 15
Figure 8	Conditions de glissement pour une géométrie, charge et matériau de contact donnés 17
Figure 9	Graphique du rapport typique entre la vie en fatigue et le taux d'usure en fonction de l'amplitude du glissement 20
Figure 10	Représentation schématique de l'usure par délamination 21
Figure 11	Changement d'interfaces par friction..... 25
Figure 12	Schéma général de triboémission..... 32
Figure 13	Diagramme et photo de l'appareil de fretting 33
Figure 14	Schéma d'une station de mesure de l'appareil de fretting 34
Figure 15	Différence entre les conditions de fretting et de glissement alterné 40
Figure 16	Trace d'usure de la plaque 316L : bille AISI 52100- 400µm 40
Figure 17	Présentation des paramètres d'usure 41
Figure 18	Profil géométrique d'une trace d'usure..... 42
Figure 19	Enfoncement d'une bille dure dans une plaque molle 42
Figure 20	Schéma illustratif d'une bille avec un bout de trace usé..... 43
Figure 21	Taux d'usure de la plaque 316L vs amplitude avec différentes billes..... 45
Figure 22	Taux d'usure de la plaque 6061T6 vs amplitude avec différentes billes.. 46
Figure 23	Taux d'usure de la plaque Cu vs amplitude avec différentes billes..... 46
Figure 24	Usure de la plaque 316L en fretting 47

Figure 25	Usure de la plaque 6061T6 en fretting.....	47
Figure 26	Usure de la plaque Cu en fretting.....	48
Figure 27	Taux d'usure vs amplitude pour différentes plaques-bille AISI 52100....	48
Figure 28	Taux d'usure vs amplitude pour différentes plaques-bille 6061T6	49
Figure 29	Taux d'usure vs amplitude pour différentes plaques- bille Cu.....	49
Figure 30	Usure des plaques en fretting avec la bille AISI 52100	50
Figure 31	Usure des plaques en fretting avec la bille 6061T6	50
Figure 32	Usure des plaques en fretting avec la bille Cu	51
Figure 33	Variation de $\left(\frac{\Delta\dot{W}}{\Delta X}\right)$ en méso-fretting en fonction du taux d'usure.....	52
Figure 34	Coefficient de frottement μ vs amplitude pour différentes billes- plaque 316L.....	53
Figure 35	Coefficient de frottement μ vs amplitude pour différentes billes- plaque 6061T6.....	54
Figure 36	Coefficient de frottement vs amplitude pour différentes billes- plaque Cu	54
Figure 37	Évolution du CDF des couples en fonction de l'amplitude	55
Figure 38	Évolution du coefficient de frottement du AISI 52100-316L.....	56
Figure 39	Évolution du coefficient de friction du AISI 52100-6061T6.....	56
Figure 40	Évolution du coefficient de friction du Cu-6061T6.....	57
Figure 41	Évolution du coefficient de friction du Cu-Cu.....	57
Figure 42	Schéma illustratif de l'évolution du CDF vs nombre de cycle	58
Figure 43	Évolution du taux d'usure vs intensité de courant et amplitude d'oscillation: couple Cu-6061T6.....	59
Figure 44	Évolution du taux d'usure vs intensité de courant et amplitude d'oscillation : couple AISI 52100-6061T6	60
Figure 45	Évolution du taux d'usure vs intensité de courant et amplitude d'oscillation : couple Cu-Cu	60
Figure 46	Évolution du taux d'usure vs intensité de courant et amplitude d'oscillation : couple 6061T6-Cu.....	61
Figure 47	Évolution du taux d'usure vs intensité de courant et amplitude d'oscillation: couple AISI 52100-316L	61

Figure 48	Évolution du taux d'usure en fretting vs intensité de courant.....	63
Figure 49	Évolution du taux d'usure en fretting vs intensité de courant.....	63
Figure 50	Évolution du taux d'usure en fretting vs intensité de courant.....	64
Figure 51	Évolution du taux d'usure en fretting vs intensité de courant.....	64
Figure 52	Évolution du taux d'usure en fretting vs intensité de courant.....	65
Figure 53	Micro dureté Vickers avant et après frottement.....	66
Figure 54	Microdureté Vickers des traces d'usure de la plaque 316L vs intensité de courant-bille AISI 52100 (400µm).....	68
Figure 55	Microdureté Vickers des traces d'usure de la plaque Cu vs intensité de courant -bille Cu (400µm).....	68
Figure 56	Microdureté HV200 des traces d'usure des plaques Cu et 6061T6 vs intensité de courant (400µm).....	69
Figure 57	Coefficient de friction vs amplitude pour différentes intensités de courant électrique: couple Cu- 6061T6.....	70
Figure 58	Coefficient de friction vs amplitude pour différentes intensités de courant électrique : couple AISI 52100-6061T6.....	70
Figure 59	Coefficient de friction vs amplitude pour différentes intensités de courant électrique : couple Cu-Cu.....	71
Figure 60	Coefficient de friction vs amplitude pour différentes intensités de courant électrique: couple 6061T6-Cu.....	71
Figure 61	Coefficient de friction vs amplitude pour différentes intensités de courant électrique: couple AISI 52100- 316L.....	72
Figure 62	Évolution du taux de dégradation en fretting des couples pour essais sans et avec courant de 400mA - 50µm.....	73
Figure 63	Évolution du taux de dégradation en méso-fretting des couples pour essais sans et avec courant de 400mA - 150µm.....	73
Figure 64	Évolution du taux de dégradation en frottement à basse amplitude : essais sans et avec courant de 400mA - 400µm.....	74
Figure 65	Taux d'usure des couples rapporté à l'amplitude de glissement.....	76
Figure 66	Tendance à l'usure des couples.....	76
Figure 67	Cycles d'endommagement des contacts vs amplitude du mouvement....	78
Figure 68	Tracé de la fonction $Y = \tanh(x)$	79
Figure 69	Taux d'usure vs amplitude : AISI 52100-316L.....	81

Figure 70	Taux d'usure vs amplitude : 6061T6-316L	81
Figure 71	Taux d'usure vs amplitude : Cu-316L	82
Figure 72	Taux d'usure vs amplitude : AISI 52100-6061T6	82
Figure 73	Taux d'usure vs amplitude : 6061T6-6061T6	83
Figure 74	Taux d'usure vs amplitude : Cu-6061T6	83
Figure 75	Taux d'usure vs amplitude : AISI 52100-Cu	84
Figure 76	Taux d'usure vs amplitude : 6061T6-Cu	84
Figure 77	Taux d'usure vs amplitude : Cu-Cu	85
Figure 78	Débris d'oxydes évacués à la périphérie du contact	86
Figure 79	Répartition des zones de débris d'usure	87
Figure 80	Débris oxydés de la bille en cuivre sur la plaque 316L (400µm)	89
Figure 81	Micrographie optique (x100) des traces d'usure du couple Cu-6061T6, testé à 150µm	90
Figure 82	Particules de métal oxydes compactées au front du contact : couple AISI 52100-316L (x150)	93
Figure 83	Piste de la trace et production de micro alliage mécanique : couple AISI 52100-316L	93
Figure 84	Îlots de micro alliage produit sur la trace d'usure : couple AISI 52100-316L (zone II)	94
Figure 85	Transfert et adhésion de particules d'aluminium sur l'acier 316L	95
Figure 86	Agglomération de particules d'oxyde d'aluminium (zone IV)	95
Figure 87	Mécanismes d'usure dans le contact 6061T6-316L	96
Figure 88	Zones de dégradation et propriétés et Propriétés mécaniques des couples	97
Figure 89	Taux d'usure du système vs amplitude	100
Figure 90	Volume d'usure vs nombre de cycles : AISI 1025-Fe - 200µm	100
Figure 91	Rapport d'usure relatif vs HR en fretting - amplitude de 50µm	101
Figure 92	Rapport d'usure relatif vs HR en méso-fretting - amplitude 150µm	101
Figure 93	Rapport d'usure relatif vs HR en frottement- amplitude de 400µm	102
Figure 94	Évolution de l'usure relative moyenne en fonction de l'amplitude	102

Figure 95	Variation de l'usure relative en fonction de la dureté relative et de l'amplitude du mouvement	103
Figure 96	Taux d'usure des couples vs intensité de courant - stade du frottement à basse amplitude (400 μ m).....	104
Figure 97	Effet du courant électrique en fonction de l'usure initiale.....	106
Figure 98	Effet du courant et de l'amplitude sur l'usure.....	108
Figure 99	Évolution de l'usure des corps en fonction de la dureté relative	113

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

ABRÉVIATIONS

DIN	Institut Allemand de Normalisation
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économique
PVD	Dépôt Physique en phase Vapeur
CVD	Dépôt Chimique en phase Vapeur
ASM	Société Américaine des Métaux
DC	Courant continu
MO	Microscope Optique
MEB	Microscope Électronique à Balayage
RGP	Régime de glissement partiel
RGM	Régime de glissement mixte
RGT	Régime de glissement Total
AISI	Institut Américain de la Sidérurgie
CDF	Coefficient de frottement

SYMBOLES

CDF	Coefficient de frottement
ΔL	Déplacement relatif
α	Coefficient de dilatation thermique linéaire
$\Delta\theta$	Variation de la température
L_0	Longueur initiale
A_r	Aire réelle
A_a	Aire apparente
H_R	Dureté relative
P	Charge
R_a	Rugosité
H	Dureté
a	Rayon de contact
G	Module de cisaillement – Coulomb-
h	Profondeur de la zone de frottement affectée par la déformation
P_0	Pression maximale de Hertz
R	Rayon de la bille
E^*	Module d'élasticité combiné des deux corps en contact
ν	Coefficient de Poisson

σ_r	Contrainte de traction maximale
δ_t	Amplitude de transition
μ	Coefficient de frottement
V	Volume d'usure
L	Distance parcourue
I	Intensité du courant électrique
R_e	Résistance électrique
ρ	Résistivité thermique
D	Coefficient de diffusion
D_0	Constante de diffusion
Q	Énergie d'activation thermique
T	Température
t	Temps d'activation
RH	Humidité relative
F_t	Force tangentielle
F_n	Force normale
e	Rapport de glissement
h	Profondeur de la trace d'usure
l	Largeur de la trace
H_B	Dureté de la plaque
H_P	Dureté de la bille
H_R	Dureté relative
V_P	Volume d'usure de la plaque
V_B	Volume d'usure de la bille
\dot{W}	Taux d'usure
X	Distance totale parcourue
\dot{W}_R	Rapport d'usure relatif
\dot{W}_i	Taux d'usure sous courant électrique
$\dot{W}_{(i=0)}$	Taux d'usure sans courant électrique
J	Densité du courant électrique
\dot{W}_P	Taux d'usure de la plaque
\dot{W}_B	Taux d'usure de la bille

INTRODUCTION

L'importance des problèmes de dégradation des contacts dans la technologie moderne requiert d'intégrer une meilleure compréhension de la fonction des différentes propriétés des matériaux du couple afin d'obtenir de meilleures performances tribologiques. Parmi les modes de dégradation qui sont d'actualité, on retrouve le fretting. Ce dernier affecte les systèmes de contacts soumis à des mouvements relatifs oscillatoires de faible amplitude. Plusieurs exemples pratiques peuvent être cités : les contacts électriques, les roulements, etc.

Le fretting est souvent considéré comme un problème qui pénalise fortement l'ensemble des secteurs industriels. Par fretting, on entend un mode de défaillance des matériaux de deux surfaces en contact subissant un léger mouvement oscillatoire, tangentiel, souvent cyclique et de faible amplitude. La destruction par fretting de certains contacts électriques conduit à une augmentation de la résistance électrique et à un échauffement susceptible d'aboutir à des brûlures (des échauffements) et par conséquent à des dégâts matériels et parfois humains graves. Ce projet est justifié par la recherche de meilleurs couples en micro frottement afin de minimiser les pertes énergétiques et les accidents.

Les lois qui gouvernent le méso-fretting sont encore mal connues. Le nombre de colloques de recherche et de thèses de doctorat souligne l'intérêt et aussi une connaissance incomplète du sujet. Les couples de matériaux doivent être recyclables ce qui représente une donnée moderne inévitable. Cela exclut certains matériaux souvent utilisés, comme le plomb, l'étain, etc. Le but du travail consiste à dégager l'effet des matériaux et du courant électrique sur le comportement en méso-fretting et à identifier les mécanismes de dégradation pour des matériaux d'usage courant. Nous avons choisi des matériaux susceptibles d'être utilisés dans des contacts électriques peu dispendieux. Une des premières règles dans le choix des matériaux pour le frottement est le rapport des duretés relatives HR. Certains matériaux ont été choisis pour vérifier la pertinence de ce critère et d'autres pour des besoins de compréhension des phénomènes.

Le présent mémoire est structuré en 5 chapitres :

Des notions introductives à la technologie de surface et aux propriétés de choix d'un matériau dans un contexte tribologique sont présentées dans le premier chapitre. Ce volet se veut une introduction au deuxième chapitre qui traite une recherche bibliographique sur la dégradation des microcontacts métalliques. À la lumière des résultats des travaux de recherche documentés, une synthèse sur la cinétique d'endommagement des surfaces en fretting et en macro frottement est abordée dans cette partie. On traite en particulier les régimes de fretting, le cycle de vie des particules d'usure, les couches de transfert, la déformation de surfaces, etc. Cette revue de littérature inclut en partie une synthèse élaborée sur les phénomènes qui découlent de la présence du courant électrique dans les contacts métalliques : élévation de température, oxydation, dégradation de la résistance électrique.

Le troisième chapitre aborde l'approche expérimentale adoptée dans l'étude. Cette dernière porte sur le descriptif de la machine d'essais, les critères de choix des matériaux ainsi que les paramètres opératoires. La méthode d'acquisition des grandeurs de frottement et de quantification de l'usure est également présentée et élaborée dans cette section.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats. Ces derniers sont classés en deux séries se rapportant distinctement aux essais réalisés sans et avec courant électrique. Des commentaires rejoignent l'ordre dans lequel sont présentés ces résultats.

Le dernier chapitre est développé pour l'analyse de l'ensemble des résultats. Lesquels sont raffinés avec des interprétations d'ordre microstructural, mathématique et phénoménologique. Notre contribution originale à la recherche avec l'élaboration d'un modèle mathématique décrivant l'évolution de la dégradation dans les trois stades de frottement est bien développée dans cette partie. Enfin, le mémoire est achevé par une conclusion et des recommandations.

CHAPITRE 1

TECHNOLOGIE DE SURFACE

1.1 Dégradation de surface

La dégradation de surface dans les systèmes où des métaux sont en contact entraîne d'importants coûts de maintenance qui pénalisent l'essor économique de l'industrie. Cette dégradation a des répercussions importantes sur la vie économique des pays. Ainsi, il a été estimé que le préjudice en question a coûté environ 2 000 000 000 £ à l'économie britannique en 1988 (Arnell, Davies, Halling, & Whomes, 1991). De nos jours, la tribologie devient un sujet d'investigation scientifique important à cause de ses enjeux technologiques et économiques (Williams, 1999).

La dégradation de surface se manifeste par tout changement d'ordre microstructural et/ou topographique de la couche de surface et peut être définie en terme de perte de performance et ou de fonctionnalité des composants d'un système de contact. En vue d'une bonne longévité des systèmes fonctionnels, le choix adéquat des matériaux, la qualité de maintenance et l'assurance qualité sont devenus les facteurs dont l'importance est de plus en plus accrue.

La figure 1 schématise grossièrement la dégradation progressive des performances d'un matériau exposé à un environnement d'exploitation donné (Batchelor, Loh Nee, & Chandrasekaran, 2002). La sévérité d'attaque de ce dernier influence étroitement son taux de dégradation. L'étude du dommage des surfaces doit avoir pour objet la prédiction de la dégradation ainsi que le moment à partir duquel elle atteint son niveau critique s'il existe (Batchelor et al., 2002).

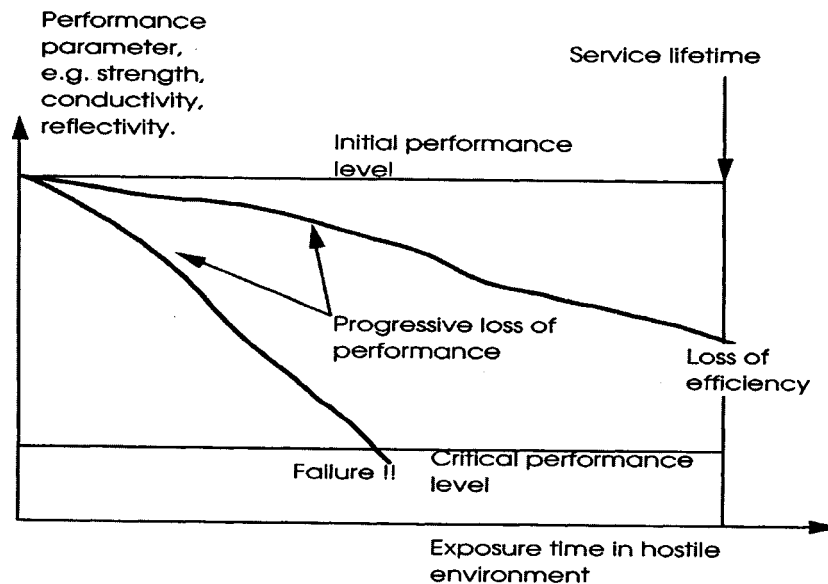


Figure 1 Schématisation de la dégradation de matériaux en fonction de la perte de performance d'un système technologique (Batchelor et al., 2002)

1.2 Usure et mécanismes

Il existe toute une variété de types d'usure dont chacune présente des traits spécifiques. L'adhésion, l'abrasion, l'érosion, la corrosion, l'oxydation, la fatigue sous-cutanée ou délamination, la diffusion, le fretting et la cavitation sont les modes d'usure les plus fréquemment rencontrés dans les applications tribologiques.

L'usure des surfaces est un facteur très critique qui influence la vie en service des produits et entraîne des conséquences économiques importantes à l'échelle nationale. Dans la norme DIN 50320, l'usure est définie comme "la perte progressive du matériau de la surface d'un corps solide due à une action mécanique qui est exercée en présence d'un mouvement relatif d'un autre corps solide, liquide ou gazeux". L'OCDE définit l'usure comme "la perte graduelle de la matière résultant du mouvement relatif des corps en contact" (OCDE, 1968).

La dégradation est souvent due à l'action conjuguée d'un ou de plusieurs types d'usure. La relation entre les diverses formes d'usure et leurs causes physico-chimiques, mécaniques et thermiques est illustrée sur le schéma ci-après, figure 2.

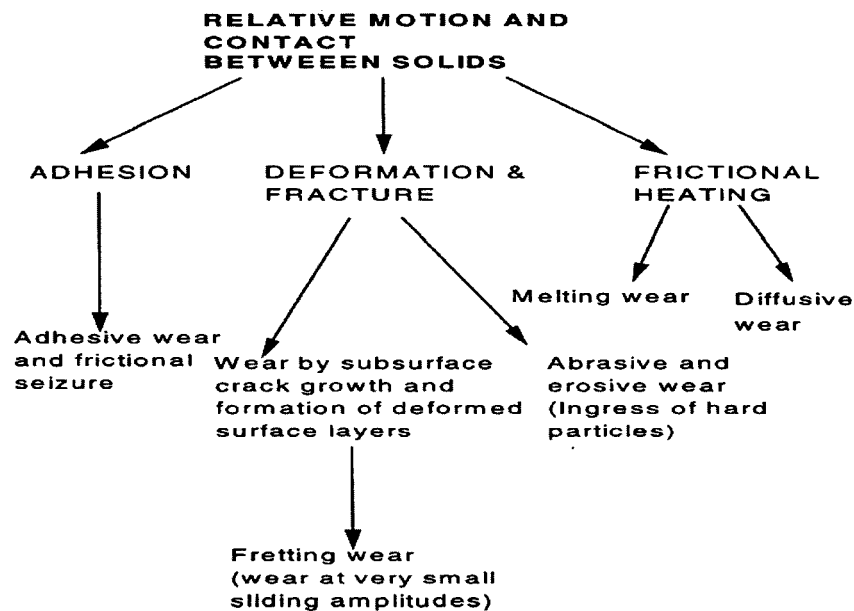


Figure 2 Relations entre mécanismes d'usure et causes physiques (Batchelor et al., 2002)

1.3 Technologie de surface

Du point de vue thermodynamique, la surface est la partie la plus instable d'un système. Elle est généralement l'endroit le plus vulnérable au dommage. Lors de l'usinage, une certaine texture cristallographique se crée à la surface dont la réactivité chimique croît avec la densité atomique de ses plans cristallins. Très avide d'oxygène, la surface métallique se transforme souvent en oxyde. En interaction constante avec son environnement ambiant, une surface n'est jamais propre. Il en résulte une microcouche qui se recouvre de contaminants tels que de la vapeur d'eau, de l'huile condensée, des particules de fumée et de fines poussières, etc.

La technologie de surface est une science récente qui se réfère au contrôle d'avaries originaires de la surface des composants où les mécanismes de destruction peuvent être d'ordre physique, chimique, physico-chimique, thermiques, biologique, etc.

On assiste durant ces dernières décades à un développement rapide de cette discipline afin de réduire la friction et d'améliorer les propriétés de surface telles que la résistance à l'usure et à la corrosion. Pour cela plusieurs techniques de revêtement de surfaces ont été développées et mises en œuvre. On cite, entre autres, le dépôt par faisceaux laser, la projection plasma, le PVD (Physical Vapor Deposition), le CVD (Chemical Vapor Deposition) et l'implantation ionique.

1.4 Critères de sélection d'un matériau à résistance optimale à l'usure

Une approche multicritère systématique n'est pas connue pour le choix judicieux des matériaux évoluant dans un environnement où plusieurs aspects d'ordre technologique et économiques coexistent.

La figure 3 illustre la complexité d'un système tribologique. Une prédiction exacte du comportement d'un système en fretting ou en frottement est donc malaisée, parfois impossible. En effet, le design doit prendre en compte l'environnement (atmosphère, température, humidité), l'état de contraintes, la méthode de lubrification, les matériaux et/ou traitements de surface. Au fur et à mesure de l'évolution du système tribologique, ces paramètres tendent à contribuer à son altération.

Materials selection for wear resistance

Sensible to adopt a *systems approach*.
The materials aspects are *part* of the whole design problem.

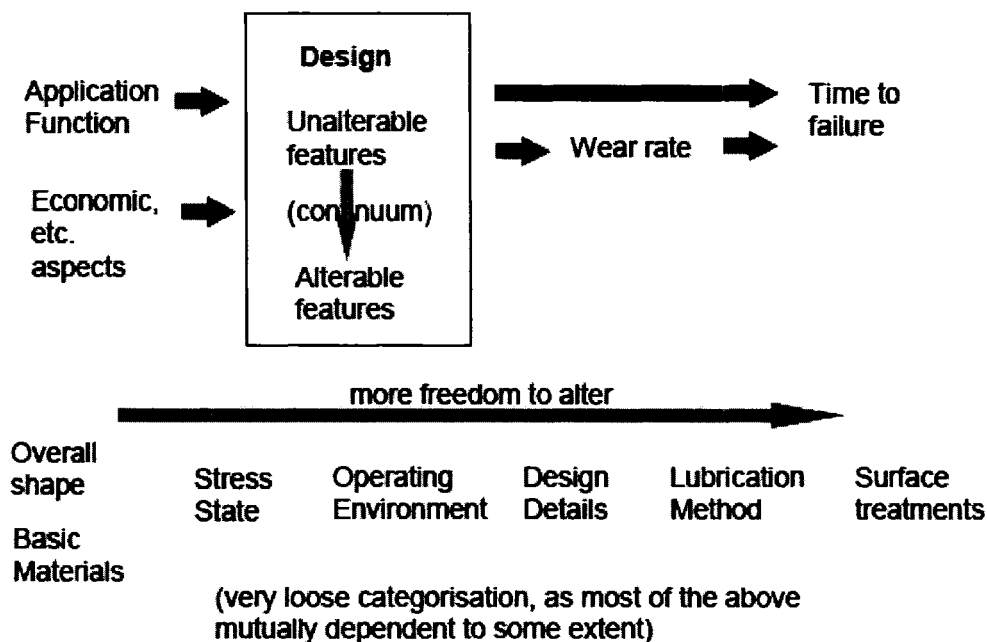


Figure 3 Critères de sélection d'un matériau résistant à l'usure
(S. Roberts, 2006)

Les questions relatives aux matériaux ne constituent donc qu'une partie de la question à résoudre pour améliorer la résistance au fretting. Une bonne compréhension des facteurs interdépendants régissant la vie d'un contact est nécessaire. Elle peut englober la maîtrise de plusieurs concepts interliés à savoir:

- Les matériaux et leurs propriétés (limite élastique, rigidité, rugosité de surface, etc.) ainsi que les traitements de surfaces, s'il y a lieu;
- Les conditions de charge et la géométrie de contact qui sont fonction de l'état de contraintes imposées, l'environnement d'évolution du système, les détails de design ainsi que la méthode de lubrification.

1.5 Interaction matériaux et environnement

Les matériaux sont à la base de la technologie. Ils ont été développés principalement pour des applications structurales, tribologiques, électroniques, thermiques et autres. Les aspects de disponibilité future de la matière première ou de la recyclabilité reçoivent souvent peu de considération. Par exemple, certains contacts souvent efficaces du point de vue électrique sont peu recyclables tels que les alliages qui forment des intermétalliques (Pb-Sn, Cu-Sn). De nos jours, il est admis que des considérations de durabilité et de recyclabilité doivent être incluses au niveau design et du développement des matériaux. Les soucis de la fiabilité et de la prédiction de la durée de vie des produits sont devenus grandissants au point de devenir une exigence additionnelle par le client d'aujourd'hui et, dans de nombreux cas, par les normes et les lois portant sur la protection du consommateur et de l'environnement. La réduction de la pollution que génère une technologie est une question de grande actualité qui suscite l'intérêt de la recherche pratique et fondamentale. Ceci peut être atteint, en grande partie, par un choix bien réfléchi des matériaux. On cite souvent l'utilisation de fluides de refroidissement biodégradables et de matériaux recyclables.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Interaction

Les débris d'usure générés par le micro glissement sont initiés le plus souvent à partir des aspérités de contact (Nam P. Suh & Sin, 1981). Ils sont très fins avec une taille d'ordre inférieure à 0.01-0.1 μm . Les débris métalliques de cette taille s'oxydent instantanément avant de s'incruster dans les vallées de surfaces. Dépendamment de la nature du contact, ces débris peuvent agir comme des particules abrasives qui accentuent l'usure des matériaux ou avoir un comportement de lubrifiant solide (ASM International. Handbook Committee., 1990).

2.2 Causes de micro mouvements oscillatoires

Un micro mouvement de cisaillement interfacial et de forme oscillatoire (jusqu'à une amplitude de 200 μm) qui s'établit entre les surfaces en contact peut avoir comme source:

- une vibration mécanique suite à l'existence d'une différence de rigidité entre les matériaux en présence avec une fréquence qui peut atteindre plusieurs cycles par seconde ;
- une vibration d'origine thermique engendrée par une différence d'expansion thermique. Le déplacement des corps est calculé par la formule classique suivante :

$$\Delta L_1 = \alpha_1 \Delta \theta L_{0_1} \quad (2.1)$$

et

$$\Delta L_2 = \alpha_2 \Delta \theta L_{0_2} \quad (2.2)$$

d'où le déplacement relatif des deux corps (ΔL) est :

$$\Delta L = \Delta L_1 - \Delta L_2 = \Delta\theta(\alpha_1 L_{0_1} - \alpha_2 L_{0_2}) \quad (2.3)$$

où α_1 et α_2 représentent les coefficients de dilatation thermique linéaire des corps de contact, $\Delta\theta$ la variation de la température et L_0 la longueur initiale. Cet exemple souligne que de faibles variations de température peuvent entraîner un déplacement relatif de plusieurs dizaines de microns. Les métaux mous tels que Pb, cd, Sn, Zn, Al sont les plus sujets à cette déformation d'origine thermique. Or, une élévation de température de 50°C engendre une dilatation linéaire de l'ordre de 75 μ m dans une plaque d'aluminium

2.3 Surfaces de contact

Le micro mouvement de deux surfaces métalliques l'une sur l'autre amène à des micro soudures au niveau des aspérités en contact qui vont entraver leurs oscillations relatives (Holm, 1944). La force de frottement est donc celle qui devient nécessaire à la déformation ou à la rupture par cisaillement des jonctions formées (Moran, Sweetland, & Suh, 2004). Ce faisant, ces dernières vont servir de particules d'usure élémentaires à l'interface de contact comme le montre la figure 4.

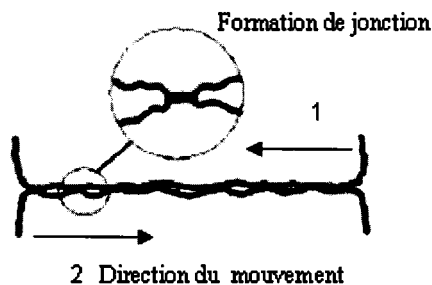


Figure 4 Interaction d'aspérités de contact

En 1950, (Bowden & Tabor, 2001), apportèrent une définition à la notion de surface en stipulant que les surfaces de contact ne sont jamais parfaites géométriquement et que la charge appliquée est répartie seulement sur un petit nombre de crêtes soumises à des déformations plastiques importantes. La surface réelle est donc indirectement fonction de la charge appliquée et qu'elle n'équivaut pas à la surface apparente du contact (Rabinowicz, 1964). Le calcul exact de la surface réelle de contact est difficile à faire. Il dépend entre autre de la dureté relative des deux corps et de leurs rugosités, etc. Pour exprimer cette notion de surface, on peut utiliser l'expression suivante :

$$A_r = f(A_a(H_R, P, R_a)) \quad (2.4)$$

avec A_r l'aire réelle, A_a l'aire apparente, H_R la dureté relative, P la charge et R_a la rugosité et f une fonction souvent empirique.

En appliquant la théorie de la déformation plastique pour le cas de contact d'un corps hémisphérique avec une surface plane sous une charge P , il est possible de calculer le rayon de la zone de contact (Bouchoucha, Chekroud, & Paulmier, 2004) :

$$a = \left(\frac{P}{\pi.H} \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

avec H la dureté du corps le plus mou du système.

2.4 Troisième corps et débris d'usure

Le modèle de contact à 3 corps a été introduit pour la première fois par Maurice Godet en 1970. Celui-ci a proposé de décrire le contact d'un système tribologique comme composé de deux solides de comportement généralement élastoplastique et d'un film intercalaire dont la rhéologie est souvent mal connue. Cette couche de 3^{ième} corps prend souvent naissance à partir des débris fins d'usure qui facilitent une meilleure adaptation des surfaces de frottement du système tribologique.

La nature des débris d'usure ainsi que leur évolution morphologique dans le contact peuvent accélérer l'usure. Auquel cas, l'action abrasive constituera le mécanisme dominant dans la destruction sous fretting des surfaces. De même, la facilité que possèdent les particules du troisième corps de s'échapper des régions de contact exerce une forte action sur le taux d'usure (Varenberg, Halperin, & Etsion, 2002). Ils indiquent que l'adhésion prédomine lorsque les particules d'oxydes agissent comme un lubrifiant solide et l'abrasion est dominante quand les oxydes produits agissent comme micro outil. Ils notent que des micro-irrégularités de surface améliorent la conductibilité électrique du contact.

À l'opposé, il a été montré que la protection contre l'adhésion que peuvent éventuellement offrir ces particules fines peut diminuer la vitesse de dégradation dans le contact. Certains oxydes métalliques se comportent comme un lubrifiant solide ce qui réduit l'usure (Varenberg et al., 2002). On cite souvent le cas du fer. L'oxyde ferrique et son hydroxyde sont considérés comme des lubrifiants solides, l'oxyde ferreux est abrasif.

En étudiant la capacité de la couche du troisième corps à supporter cinématiquement la charge, (Wharton, Waterhouse, Hirakawa, & Nishioka, 1973) ont démontré que le taux d'usure est régi par l'évolution instantanée du rapport entre de la production des particules et l'éjection de l'aire de contact de ce film intercalaire formé à l'interface.

En fait, l'usure est souvent expliquée par la survie d'une couche de fines particules d'oxydes étalée sur les deux partenaires. Lorsque cette couche de 3^{ième} corps est stable, le coefficient de friction est constant. L'étude de cette couche de surface est donc un axe important pour comprendre le fretting.

2.5 Considérations de déformation de surfaces

La zone affectée par la déformation plastique en fretting s'étend en dessous de la surface du matériau (Near surface region). Comme le montre la figure 5, la pente initiale de la courbe, force de traction- amplitude du mouvement alternatif, décrit la réponse élastique de cette région de subsurface dont le module de cisaillement est décrit par la relation suivante (Tevaarwerk, 1985) :

$$G = \frac{\pi.m.h.p_0}{(4.a)} \quad (2.6)$$

où m représente la pente initiale de la courbe, h la profondeur de la zone affectée par la déformation, p_0 la pression maximale de Hertz et a le rayon de contact.

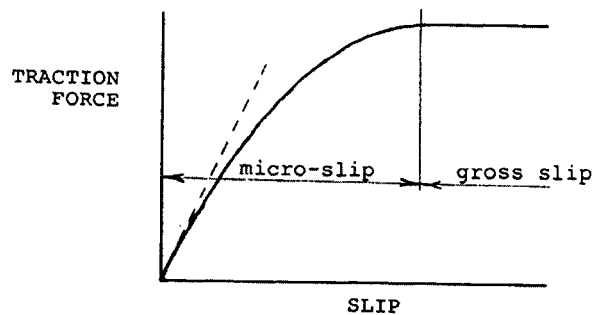


Figure 5 Courbe de traction vs glissement dans un contact non lubrifié

Pour certaines conditions de contact où l'interface est dégradée chimiquement, le troisième corps peut former un film solide ou liquide ou des îlots d'oxydes compactés. C'est la rigidité de cette couche du troisième corps qui régit la réponse initiale (la pente) du matériau à la déformation. Les propriétés en cisaillement de ce film sont fonction des conditions interfaciales locales : pression, température, taux de cisaillement et surtout la constitution du film. Ces paramètres contrôlent la réponse en frottement du contact par l'accommodation initiale des surfaces l'une à l'autre. Le cas idéal est d'avoir un troisième corps qui présente une résistance nulle au cisaillement mais bonne en compression : un lubrifiant solide.

2.6 Contact hertzien

Le cas le plus simple de configuration du modèle de contact hertzien consiste dans le contact bille sur plaque (figure 6). Ce modèle implique que le contact soit soumis à un chargement tangentiel, monotone et qu'il suive la loi de Coulomb. Il s'agit d'un contact purement élastique sous faible charge où les contraintes ne dépassent pas la limite d'écoulement. D'après la loi de Hertz, le rayon du cercle équivalent à la zone de contact est fonction de la rigidité combinée des deux corps du contact.

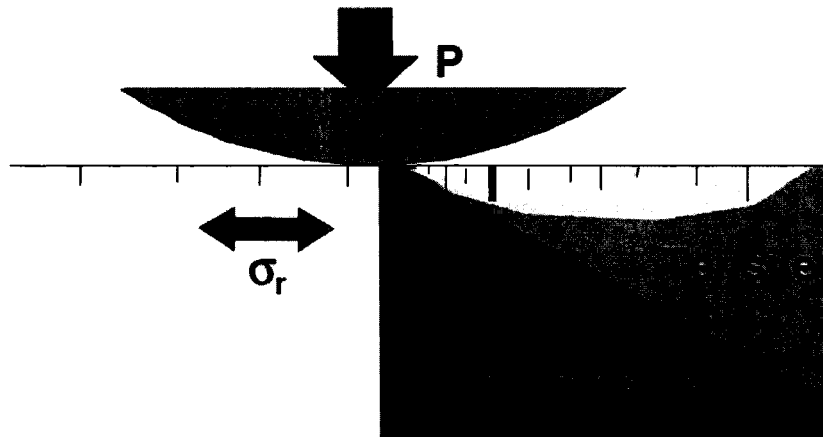


Figure 6 Configuration du modèle de contact hertzien
(S. G. Roberts, 2000)

Dans le contact hertzien, la pression de contact est proportionnel à $\sqrt{P/R}$ et la taille de contact à $(P.R)^{1/3}$ où P et R sont respectivement la force de contact par unité de longueur et le rayon de bille. La théorie d'Hertz (1881) ne considère que les déformations élastiques des matériaux sous l'unique effet d'une charge normale et elle repose sur plusieurs hypothèses, entre autres:

- les corps en contact sont semi infinis ;
- les deux corps sont parfaitement élastiques, homogènes et isotropes.

Quand une sphère dure de rayon R et de constantes élastiques E_1 et ν_1 est pressée avec une charge normale P contre un substrat plat de constantes élastiques E_2 et ν_2 , le rayon de contact est calculé par la formule suivante :

$$a = \left(\frac{3P.R}{4E^*} \right)^{1/3} \quad (2.7)$$

Avec E^* , le module élastique combiné des deux corps en contact où l'on a :

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (2.8)$$

La pression de contact maximale, p_0 , au centre de l'appui est formulée par la relation suivante :

$$P_0 = \frac{3P}{2\pi.a^2} = \frac{3}{2\pi} \cdot (P)^{1/3} \cdot \left(\frac{4E^*}{3R} \right)^{2/3} \quad (2.9)$$

Comme le montre la figure 7 (ASM International. Handbook Committee., 1990), sous l'application d'une force tangentielle q au contact, il se produit un glissement sur la région extérieure de la zone de contact délimitée par les rayons a et b .

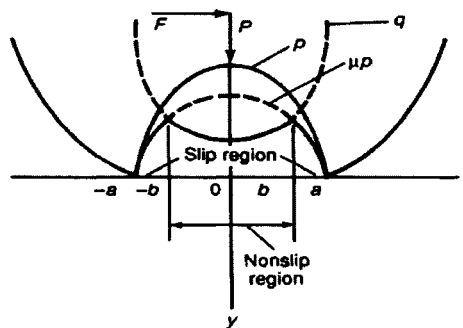


Figure 7

Approche de Mindlin : conditions de glissement dans un contact sphère sur plan sous force tangentielle

À la limite de la surface de l'appui, $x = a$ (figure 7), la contrainte radiale est de traction et la contrainte circonférentielle de compression de même valeur absolue. La contrainte de traction (tension) est responsable de la propagation des fissures en surface et est surtout dangereuse en présence de matériaux fragiles. L'effort radial diminue rapidement avec la profondeur et devient par la suite compressif à l'approche du centre de l'appui. Cette contrainte radiale est calculée par la formule suivante :

$$\sigma_r = \frac{1 - 2\nu_i}{2} \frac{P}{\pi.r^2} \quad (2.10)$$

où r est la distance à partir du centre de contact.

2.7 Régimes de fretting

En fretting, les deux matériaux en contact peuvent être soit en régime d'adhésion, d'adhésion- glissement ou de glissement. Un état d'adhésion est caractérisé par le fait qu'aucun mouvement relatif n'a lieu entre les surfaces de contact.

En fonction d'une amplitude de glissement critique dite de transition, il a été démontré que l'échelle du fretting peut être subdivisée en deux stades de glissement : partiel et total (Hannel, Fouvry, Kapsa, & Vincent, 2001). Les très faibles amplitudes de contact maintiennent la condition du régime de glissement partiel (RGP) et les plus grandes amplitudes celle du régime glissement total (RGT). Le régime de glissement mixte (RGM) se produit pour des amplitudes intermédiaires.

Sur la figure 8 (Hannel et al., 2001), on distingue la différence des traces de fretting. En glissement partiel, la trace du fretting se caractérise par une zone d'adhérence interne entourée d'un anneau de glissement tandis que celle en régime de glissement total, elle se produit sur toute l'aire du contact. À la transition, les deux stades de glissement coexistent et correspondent à la fois à un état d'adhérence et de glissement.

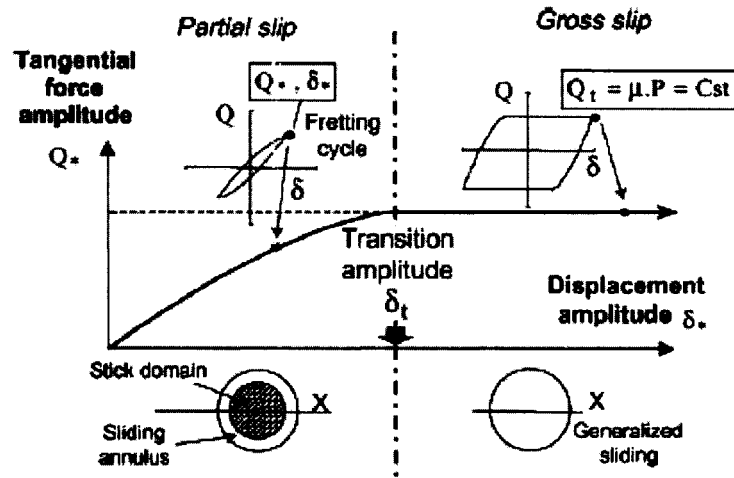


Figure 8 Conditions de glissement pour une géométrie, charge et matériau de contact donnés (Hannel et al., 2001)

Le glissement total survient à partir d'une amplitude de glissement critique qui varie avec la force normale. Dans plusieurs études, il a été établi qu'elle est fonction du matériau mais qu'elle se situe dans la gamme de 50~100 μm (Iwabuchi, 1978), 100 μm (Cho, Kim, & Kim, 1998) et varie de 80~100 μm lorsque la force varie de 30 à 50 N (Hyung, Heung, Yoon., & Song., 2001). (Ohmae & Tsukizoe, 1974) rapportent que le phénomène de l'usure en fretting se rapproche de l'usure par frottement alterné à partir de 300 μm . Ils ont établi que le stade stable de l'usure est surtout régi par les deux mécanismes simultanés d'oxydation et d'abrasion.

L'amplitude de la transition glissement partiel-glissement total est calculée par l'expression donnée par Mindlin (Fouvry, Kapsa, & Vincent, 1996):

$$\delta_t = K_1 \cdot \mu \cdot P^{2/3} \cdot \left(\frac{4E^*}{3R} \right) \quad (2.11)$$

Avec comme valeur de K_1 :

$$K_1 = \frac{3}{16} \left(\frac{2-\nu_1}{G_1} + \frac{2-\nu_2}{G_2} \right)^{1/2} \quad (2.12)$$

Dans le régime de glissement total, l'usure par arrachement de matière devient le mécanisme principal de la dégradation de surface tandis que dans le régime mixte ce sont l'adhésion et l'arrachement de la matière qui se produisent en même temps (Hannel et al., 2001).

L'instabilité du coefficient de frottement initial agit sur l'usure pendant la première étape du frottement (rodage) où deux phénomènes se trouvent en compétition à savoir :

- formation de fins débris d'oxydes qui commencent à servir à la formation du 3^{ème} corps de protection;
- persistance du contact métal-métal.

2.8 Mécanismes de destruction en fretting

L'usure par fretting d'un contact métal-métal est caractérisée par la production de très fines particules métalliques de l'ordre du micron ou moins qui s'oxydent instantanément. Le caractère céramique de ces débris conditionne essentiellement le comportement en fretting. Il a été démontré que le mécanisme d'oxydation des particules prédomine pour les faibles amplitudes de glissement et que la tribo-oxydation rend l'usure sévère aux amplitudes plus élevées (Ohmae & Tsukizoe, 1974). Un mécanisme important de la dégradation par oxydation consiste dans le détachement périodique de l'oxyde formé quand il atteint une épaisseur critique. La tribo-oxydation, quant à elle, elle est le mode de destruction par oxydation et frottement. Le mouvement relatif mène à la formation de débris. Les particules métalliques sont détachées des zones très fortement déformées de la surface. Ces particules possèdent des propriétés et des structures qui peuvent être très différentes de celles du substrat (Blanchard, Colombie, Pellerin, Fayeulle, & Vincent, 1991). L'interface entre les surfaces de glissement est sensible à tout changement d'ordre physique ou chimique. La réduction de la friction est souvent due à la diminution de la tendance à l'adhésion métal- métal.

2.9 Fretting fatigue

Quand l'un ou les deux corps du contact est soumis à des charges cycliques, il peut se produire l'initiation et la propagation des fissures de fatigue et le système commence à se dégrader par fretting-fatigue (Ding, Leen, & McColl, 2004). Ainsi, l'évolution du contact, notamment au stade du glissement partiel, a un grand impact sur le développement des contraintes en subsurface écrouie qui représente le site privilégié pour l'apparition de microfissures de fatigue et leur propagation (Fouvry, Elleuch, & Simeon, 2002).

D'après (Hoepfner, Adibnazari, & Moesser, 1994), la vie en fretting-fatigue est divisée en trois stades :

1. Nucléation des microfissures;
2. Propagation des fissures initiées;
3. Rupture et formation d'écailles "micro-coupeaux".

Le stade 2 est le plus à craindre lorsque le contact tend vers la condition de fretting en régime mixte (RGM) où la probabilité de créer une fissure de fatigue est maximale et la durée de vie en fretting-fatigue subit une chute brusque comme le montre la figure 9 (Vingsbo & Soderberg, 1988). Dans cette étude, les auteurs expliquent le lien entre la vie en fatigue et le taux d'usure en fonction de l'amplitude de glissement (figure 9) et démontrent que le risque conjugué de l'usure et de la fatigue dans le régime de glissement partiel est accru avec l'augmentation de l'amplitude. Ils mettent aussi mis en évidence les différents stades du fretting en fonction de l'amplitude et de la charge. En plus, ils montrent que l'effet de la fréquence est faible et ne se fait sentir que pour des fréquences au-delà de 800 hertz.

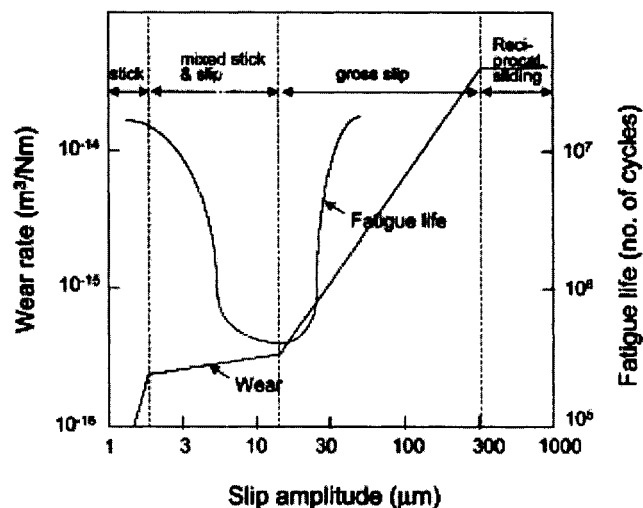


Figure 9 Graphique du rapport typique entre la vie en fatigue et le taux d'usure en fonction de l'amplitude du glissement (Vingsbo & Soderberg, 1988)

D'une autre part, bien que le taux d'usure continue d'augmenter avec l'amplitude, le dommage en fatigue diminue sensiblement dans le régime de glissement total. (Waterhouse, 1992) valide cette constatation en expliquant que le mouvement d'usure devient important à ce stade pour pouvoir éroder en continu les fissures en formation. Pour nos expériences de fretting, on se situe dans le domaine de glissement mixte qui correspond à l'état d'adhésion-glissement (stick-slip).

2.10 Théories de l'usure

2.10.1 Déformation plastique et particules d'usure

Diverses études montrent que les métaux ductiles subissent de grandes déformations plastiques avec un degré d'écroutissage élevé en surface ou tout près de la surface (Vingsbo & Soderberg, 1988), (Waterhouse, 1992). La microscopie de ces zones minces et hautement plastifiées révèle que cette déformation plastique accentue davantage l'usure par détachement de particules ou de copeaux notamment à partir des micro vides qui servent de sites d'amorces et de propagation de microfissures (KENNEDY, 1982).

(Ohmae, 1987) explique que ces microfissures prolifèrent et se propagent à cause des contraintes cycliques dues au passage répété du corps frottant. Ces contraintes favorisent la propagation de fissures sous-cutanées avant de déboucher à la surface. Quant aux fissures de subsurface localisées sous la zone hertzienne, elles avancent parallèlement à l'interface de contact durant le glissement. Deux phénomènes peuvent expliquer la formation de petits copeaux : la rupture de la couche de transfert ou la rupture dans une subsurface des métaux en présence.

La théorie de la délamination basée sur les dislocations stipule que la formation de la couche de transfert est reliée aussi bien à l'énergie de cohésion des corps solides du contact qu'à l'énergie d'adhésion à l'interface. Ce phénomène est d'une grande importance dans le détachement des particules et des copeaux en usure (Ohmae, 1987). La délamination est due aux fissures qui se rejoignent sous l'action du cisaillement pour former des plaquettes qui seront arrachées de la surface en forme de petits copeaux (N.P. Suh, 1973). La figure 10 illustre schématiquement ce mécanisme pour un contact usuel bille-plaque où les fissures sont nucléées à partir des micro-vides en subsurface avant de se propager et émerger à la surface de contact.

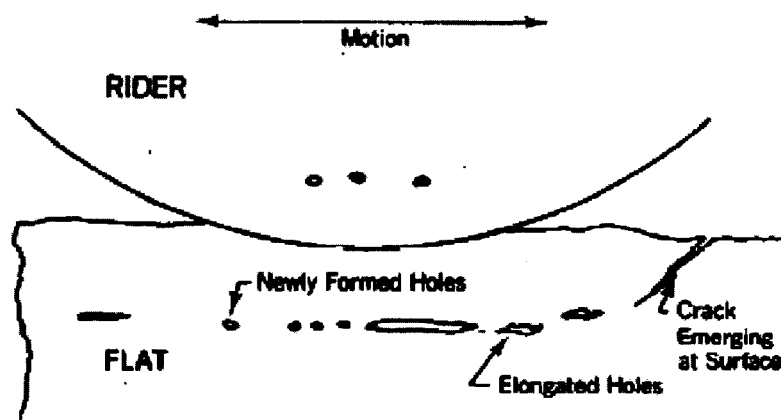


Figure 10 Représentation schématique de l'usure par délamination (N.P. Suh, 1973)

2.10.2 Particules d'usure

Dans un environnement de contact à sec ou lubrifié, la plupart des particules d'usure produites ont une morphologie lamellaire (Jahanmir, 1986). Leur formation est grandement influencée par les paramètres d'essai tels que la charge, la vitesse, la température et l'environnement. Les principales étapes de production de ces débris peuvent être classées dans l'ordre suivant : déformation des aspérités, labourage, délamination et adhésion. Ceci se produit avec l'augmentation soit de la charge normale (Jahanmir, 1985) soit du coefficient de frottement (Iwai & Endo, 1982).

(N.P. Suh, 1977) souligne que les débris se forment principalement suivant les mécanismes d'adhésion, d'abrasion, de fatigue et de corrosion mais que l'usure implique plus d'un mécanisme tribologique. (Endo, Goto, & Nakamura, 1973) rapportent que la perte de matière en fretting survient dans l'ordre cité ci après :

- le métal s'enlève par fissuration à partir des aspérités de contact;
- les particules détachées et oxydées croissent et forment une fine poudre céramique qui favorise l'usure jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint;
- l'oxyde formé est évacué de la surface de contact et une fois redevenu à nu, le métal de la surface est ensuite réoxydé et détaché.

2.10.3 Transfert de matière

Le transfert de matière modifie la nature des surfaces de frottement et se manifeste davantage dans les conditions non lubrifiantes. La cinétique de frottement et le comportement à l'usure s'en trouvent affectés. De nos jours, il n'existe pas encore de théorie fiable pour prédire le sens et la quantité de matière transférée dans un système donné. L'hypothèse généralement admise selon laquelle le matériau "doux", de dureté plus faible, se transfère sur son partenaire dur n'est pas toujours respectée.

La littérature met en évidence que le transfert se produit quand la résistance au cisaillement de la liaison adhésive entre deux aspérités de contact devient plus grande que celle de la particule avec son substrat. Pour des considérations d'adhésion, la direction préférée du transfert se fait de la micro zone faiblement cohésive à celle à forte énergie cohésive.

En général, la direction du transfert peut être classée en trois modes à savoir :

- transfert dans un sens unique : du corps 1 vers le corps 2 ou inversement;
- transfert mutuel : du corps 1 au corps 2 et du corps 2 au corps 1;
- transfert double : du corps 1 au corps 2 et retransfert du même matériau transféré (1) à son corps initial.

2.10.4 Modèles d'usure

Le volume d'usure est obtenu par la loi d'Archard (1953) qui s'exprime par la relation suivante :

$$V = \frac{K.P.L}{H} \quad (2.13)$$

avec les paramètres suivants :

- V : le volume d'usure du matériau mou;
- K : constante ou coefficient d'usure.
- P : la charge;
- L : la distance parcourue;
- H : la dureté du matériau le plus mou;

À noter que K est un facteur adimensionnel qui caractérise les modes d'usure. Cette approche est relativement classique et permet d'obtenir l'ordre de classement des couples étudiés.

2.11 Dégradation de contact électrique sous fretting

2.11.1 Introduction

Les connecteurs, relais, commutateurs sont les exemples qui soulignent l'importance du dommage. Les matériaux en contact sont choisis pour leur haute conductibilité électrique et leur faible résistance de contact. La limitation de la tension dans le contact est mise en évidence par le comportement électrique des débris d'usure peu conducteurs accumulés et compactés à l'interface de contact (Hannel et al., 2001), (Morton Antler, 1999). De ce fait, les matériaux en présence doivent avoir une bonne résistance à la formation de films isolants tels que les oxydes et les couches d'huiles adsorbées en surface. Ainsi, le cuivre et ses alliages sont les plus utilisés comme substrat de contact alors que les métaux nobles et semi nobles que sont l'or, l'argent, le palladium et ses alliages sont réservés pour des revêtements en couches minces afin de rendre les surfaces relativement chimiquement inertes et de stabiliser l'usure.

Les conséquences de l'avarie en fretting peuvent être désastreuses. Ne citons, à titre d'exemple, que le résultat du fretting dans un câble de puissance. En janvier 2002, la rupture d'un câble aérien de distribution électrique de 460 KV a privé d'électricité 67 millions d'habitants des États méridionaux du Brésil (Azevedo & Cescon, 2002). L'étude des faciès de fracture a établi qu'une délamination superficielle par fretting, sous un régime de glissement total, associée à la présence de fines particules d'alumine Al_2O_3 était le mécanisme initiateur de l'incident. Une haute densité de courant dans un contact dynamique stimule le processus d'oxydation. Les surfaces glissantes des fils de cuivre, par exemple, s'endommagent par abrasion, tribo-oxydation et ainsi provoquent un phénomène de création d'arcs électriques (Senouci, Zaidi, Frene, Bouchoucha, & Paulmier, 1999). Toutefois, les mécanismes de dégradation en fretting sont nombreux et il est peu probable qu'un seul mécanisme intervienne. (Braunovic, 1986) rapporte qu'il y a plusieurs phénomènes qui interfèrent notamment l'abrasion, l'adhésion et la délamination ainsi que l'arcage et l'électro érosion.

2.11.2 Effet de la température

Plusieurs travaux ont mis en évidence l'effet de l'évolution de la température de contact et de la force de friction pendant le glissement initial d'un système tribologique. L'élévation de la température augmente le taux de diffusion en fonction du couple de matériaux en présence et des paramètres opératoires tels que la contrainte et la vitesse du mouvement. Il en découle diverses formes de perte d'énergie qui mènent à de multiples mécanismes de dégradation ce qui entraîne la modification de l'interface du contact comme l'illustre la figure 11.

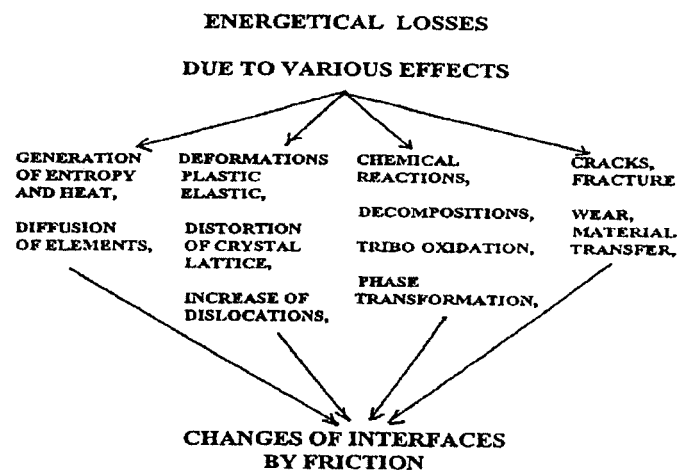


Figure 11 Changement d'interfaces par friction
(Holinski, 2001)

D'après cette figure, on peut énoncer que le frottement à sec des corps solides mène à une modification des couches de surface. Cette modification peut être d'ordre :

- microstructural : changement de texture cristallographique, multiplication de la densité des dislocations et éventuellement déformation de la maille cristalline;
- chimique : diffusion, changement de la composition de surface par dépôt de la couche de transfert
- mécanique : fissuration en sous surface, sous la zone de Hertz;
- physique : augmentation de l'entropie et transformation de phases

L'oxydation du métal est activée par la température du contact. Elle se produit par diffusion des ions d'oxygène vers l'intérieur et parfois par ceux du métal vers l'extérieur (Zaidi, Chin, & Frene, 2001). Les fils d'oxydes progressent en discontinu et, à mesure que leur surface et épaisseur s'étendent, une séparation partielle s'établit entre les surfaces métalliques et une chute du taux d'usure peut s'ensuivre dépendamment de l'abradabilité de la couche du 3^{ième} corps. On note que la formation de la couche de protection se fait à l'interface gaz-oxydes initiaux de surfaces réactives chimiquement.

La présence des films de corrosion réduit en général la tendance à l'adhésion des surfaces lors du fretting (Rudolphi & Jacobson, 1997). Une conséquence délétère directe de ce phénomène en usure sera l'arrachement et la fracture des pellicules d'oxydes fragiles pour donner lieu à des produits de corrosion. C'est ce phénomène, appelé "fretting corrosion" [ASTM B 542-99] qui peut être responsable de l'augmentation de la résistance électrique de contact.

2.11.3 Effet du courant électrique

La présence du courant électrique fait croître la température de contact par effet Joule, favorise l'oxydation des surfaces d'usure et constitue une source de fluctuation du coefficient de frottement, $\mu = f(i)$, et de la résistance électrique, $R_e = f(i)$ (Bouchoucha et al., 2004), (Bhushan & Ge, 2003). Le phénomène est accentué par la présence de matériaux de faible conductibilité thermique dans le contact. (Gagnon & Braunovic, 2000) rapportent que l'augmentation et la fluctuation de la résistance sont attribuées à la formation de couches intermédiaires et épaisses d'oxydes et à des particules de débris dans le contact. Le passage de courant y est ainsi inhibé et la forme des lignes du champ électrique déviée.

En étudiant l'effet électrique à 10 et 40 mA dans les contacts AISI 1045/Cu et AISI 1045/AISI 1045, (Bhushan & Ge, 2003) montrent que le coefficient de frottement

diminue de 0.58 à 0.52 dans le premier couple AISI 1045/Cu tandis qu'il croît de 0.16 à 0.26 dans le second. Ceci définit le fait que choisir seulement un seul matériau de bonne conductibilité électrique dans le contact peut contribuer à modifier le coefficient de frottement.

D'après (Hannel et al., 2001), il existe une relation entre les conditions de fretting et les performances d'un contact électrique. Ils énoncent qu'une condition de glissement partiel permettant une interaction directe "métal-métal" suffit de maintenir une résistance électrique basse et stable indépendamment de la géométrie du contact dans un couple CuSn₄/CuSn₄. Mais au delà d'une amplitude de transition correspondant à l'entrée en régime de glissement total, il y a création de fins débris métalliques qui s'oxydent instantanément pour générer une troisième couche isolante. Dans cet exemple, l'usure est à l'origine d'une résistance de contact électrique instable. La performance électrique du contact devient assujettie à la cinétique de l'usure de cette couche de surface qui dépend fortement de l'amplitude du mouvement et des conditions ambiantes.

2.11.4 Résistance électrique

Le développement de films superficiels d'oxydes, l'accumulation des particules d'usure et l'instabilité mécanique du contact s'avèrent les facteurs principaux régissant la résistance du contact électrique. (Holm, 1967) a postulé que la résistance électrique de contact est la résultante de deux composantes à savoir la résistance constrictive et celle de films électriquement isolants.

$$R_{contact} = R_{Constriction} + R_{film} \quad (2.14)$$

Le premier terme est représentatif de la restriction de l'écoulement du courant électrique autour des aspérités du contact effectif. Quant au second, il prend de l'importance quand des couches isolantes commencent à recouvrir la surface. Cette composante, R_{film} , est calculée par la loi suivante :

$$R = (\rho_1 + \rho_2) / 4 \cdot a \quad (2.15)$$

où ρ est la conductivité du contact et a , le rayon de la jonction de constriction.

2.11.5 Effet de la charge

(M. Antler, 1985) rapportent que l'augmentation de la charge de contact et ou la réduction de l'amplitude du glissement rendent la résistance d'une connexion électrique basse et stable. Il a aussi montré que plus faible est la fréquence d'oscillation de contact, plus grand sera le nombre de cycles à consommer par le contact avant d'atteindre un degré de dégradation critique.

Pour des raisons de design et de propriétés de matériaux, la charge doit être optimisée. À l'échelle des précautions expérimentales, on se conforme généralement à une oscillation de charge de 50 à 300gf pour des contacts en métaux nobles et de 100gf à 2 kgf pour des contacts conçus avec de la brasure en étain (M. Antler, 1985). Ces échelles de charges sont optimisées en fonction des propriétés mécaniques de ces derniers matériaux. Il est à rappeler que pour des raisons d'écologie, d'allergie et de neurotoxicité, l'Union Européenne a légiféré l'élimination de la brasure tendre en plomb-étain au profit de la brasure sans plomb. La mise en application de la loi sera en vigueur à partir de 2006.

2.11.6 Polarité

L'intensité du courant électrique ainsi que sa polarité influencent le taux de formation de la couche oxydée sur la surface anodique du métal (Bouchoucha, Zaidi, Kadiri, & Paulmier, 1997). L'environnement du contact contrôle l'importance de l'influence du courant sur la destruction du contact (Bouchoucha et al., 1997), (Senouci et al., 1999). D'après ces études, il a été montré qu'en l'absence d'oxydation, la friction et l'usure ne sont plus dépendantes du courant électrique et que le contact métallique demeure stable.

Un contact de type Cu-AISI 316 (Inox18% Cr, 10%Ni) soumis à un courant électrique de 20Amperes a été étudié avec et sans protection d'argon et sous oxygène. L'examen des traces de frottement ne révèle bien évidemment aucune oxydation de surfaces sous protection d'argon. Cependant le contact sous oxygène montre que l'usure se manifeste par oxydation sur le cuivre quand il est anodique et qu'elle est de mode sévère et abrasif quand la polarité est inversée. Dans ce dernier cas, une oxydation activée de l'acier se produit avec formation rapide d'oxydes durs de Fe_2O_3 et de Cr_2O_3 à l'interface (Senouci et al., 1999).

2.11.7 Les intermétalliques

Le fonctionnement des systèmes de contacts électriques avec des couches de surfaces électro déposées en surface se heurte encore à divers problèmes de fiabilité et de performance (Gagnon & Braunovic, 2004). En effet, le développement de phases intermétalliques est un facteur déterminant dans l'instabilité de ces contacts et par conséquent dans l'ouverture des circuits électriques. À grande échelle, la tendance actuelle en Amérique du Nord est d'opérer avec des lignes électriques de distribution et de transmission à fort courant de sorte que les pertes dues à l'effet Joule peuvent entraîner des élévations de températures pouvant avoisiner 200°C. Cette perspective revêt une grande importance scientifique étant donné que de nombreuses études mettent en évidence qu'une couche en phase intermétallique de 2 μ m d'épaisseur est considérée comme critique dans le cas du cuivre étamé. La surchauffe des contacts résulte d'une action combinée de plusieurs mécanismes de dégradation à savoir: le fretting, l'oxydation, la corrosion, la relaxation de contraintes, la dilatation thermique différentielle et la formation des phases intermétalliques à l'interface cuivre-étain. Dans le diagramme de phase de l'alliage Cu-Sn, la diffusion mutuelle des atomes se produit pour des températures relativement basses (l'ambiante) ce qui permet la formation des intermétalliques (η - Cu_6Sn_5 et ϵ - Cu_3Sn) dont la croissance est caractérisé par l'énergie d'activation Q exprimée dans la relation suivante :

$$D = D_0 \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right) \quad (2.16)$$

avec D le coefficient de diffusion, D_0 une constante de diffusion, Q l'énergie d'activation, R la constante de Boltzmann et T la température en K° . Cette énergie d'activation de diffusion est fonction du courant électrique. L'épaisseur de la couche intermétallique peut atteindre $40\mu\text{m}$ à 200°C . Il s'en suit qu'un échauffement de contact va accroître cette épaisseur selon une allure décrite par la formule suivante:

$$e = \sqrt{(Dt)} \quad (2.17)$$

où e est l'épaisseur de la couche intermétallique ou de diffusion, D le coefficient de diffusion et t le temps d'activation.

Par ailleurs, la résistance électrique tend à se stabiliser quand l'épaisseur de ces phases intermédiaires approche celle du plaquage en étain. Le rôle délétère de ces intermétalliques sur la résistance mécanique réside dans la fragilité du joint de contact. Ils sont en général durs, fragiles et peuvent être à l'origine des fissures dans la zone de contact sous une certaine charge en fretting (Shao & Zhang, 1998).

En raison de la forte tendance de l'étain à former ces phases intermétalliques à de basses températures, leur utilisation n'est plus recommandée (Braunovic & Alexandrov, 1994). L'interface de diffusion substrat- revêtement devient fragile, très poreuse et susceptible d'être source de génération de fissures. La couche intermétallique peut ainsi se rompre sous l'effet des concentrations de contraintes produites pendant sa croissance périodique et des contraintes internes (Daniel & Mucklich, 2004). Cet exemple d'alliages de Cu-Sn souligne l'effet négatif et souvent dangereux de la présence d'intermétalliques : fragilité du contact, résistance électrique croissante, croissance des précipités d'intermétalliques. À priori, il est souhaitable d'éviter la formation de ces phases secondaires.

La résistance de contact augmente linéairement avec l'épaisseur des intermétalliques, l'effet du courant électrique est donc d'activer considérablement leur cinétique de formation. Celle-ci est beaucoup plus prononcée sous l'influence du courant électrique que sous l'effet d'un recuit de diffusion (Braunovic & Alexandrov, 1994).

2.11.8 Triboémission

L'émission des électrons, des ions, des photons et des particules neutres en tribologie est désignée sous le nom de triboémission (Nakayama, Suzuki, & Hashimoto, 1992) dont l'intensité croît avec la charge et la vitesse. Elle survient simultanément pendant l'éraflure des surfaces. Il a été rapporté que la triboémission, appelée l'effet Kramer (1949) se produit spontanément pendant l'abrasion ou la déformation de la couche d'oxyde de surface du métal (Nakayama, Fujiwara, & Hashimoto, 1984). On peut parler aussi de thermo émissivité dans le fretting au niveau des aspérités aigues de contacts sujets à de brusques élévations de températures (températures "flash")

Le phénomène d'effet Kramer se produit généralement à de hautes intensités électriques où la matière commence à s'ioniser. Il est aussi considéré comme un tribo-plasma qui est une découverte récente réalisée par (Nakayama & Nevshupa, 2002). La triboémission est composée essentiellement d'exo électrons et d'UV. Toujours d'après cette étude, l'ensemble des principaux phénomènes illustrés ci-après peuvent résulter de la triboémission, voir figure 12 :

- émission d'atomes et de molécules de gaz comprenant des radicaux;
- émission de radiations électromagnétiques;
- émission d'électrons et d'ions;
- émission de champ magnétique et électrique avec des charges électriques;
- émission de bruit de vibration et émission acoustique (AE) et de la chaleur;
- génération des tribocourants.

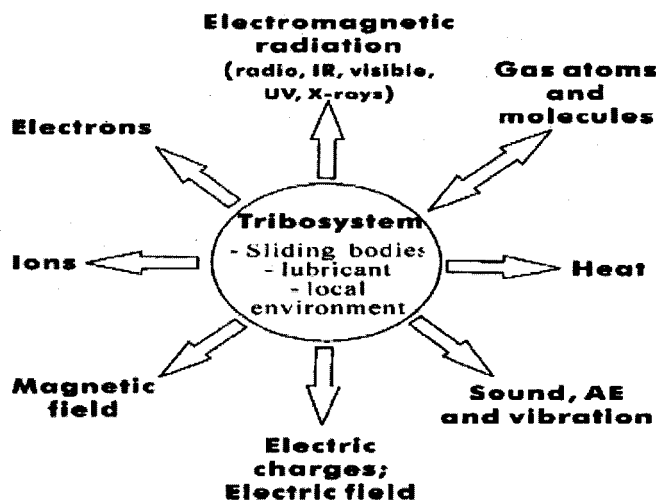


Figure 12 Schéma général de triboémission
(Nakayama & Nevshupa, 2002)

À la lumière de cette recherche documentée, on s'est amené à mettre en relief les facteurs influents intrinsèques et extrinsèques aux couples sur le micro-frottement et la macro-usure. Comme notre sujet est en partie relié à l'action du courant électrique sur le dommage des contacts, une vision sur l'endommagement de surfaces en connectique a également été approchée dans cette revue.

Il ressort que le comportement tribologique des matériaux au niveau de ce stade de transition entre fretting et macro frottement n'a pas encore fait d'autant de recherches pour mieux être élucidé. Dans sa thèse, Gagnon (2005) révèle la particularité tribologique des contacts entre fretting et méso-fretting. L'approche est d'actualité du fait qu'elle constitue une avancée dans la compréhension de la réponse tribologique du couple en méso-fretting. Une formulation empirique et/ou mathématique décrivant l'effet des matériaux et paramètres expérimentaux sur la dégradation dans ce stade est ainsi recherchée. Notre approche porte sur l'expérimentation de plusieurs couples de matériaux métalliques. Ce travail consiste également à établir s'il y a une similarité dans le comportement à l'usure des couples dans les trois stades de frottement notamment en méso-fretting.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE ET PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

L'objectif poursuivi dans cette étude consiste principalement à caractériser le stade du méso-fretting et de dégager l'effet du courant électrique sur la dégradation. La géométrie de contact adoptée dans l'étude est du type bille-plaque. Certains paramètres opératoires tels que la charge de contact et la fréquence du mouvement ont été maintenus constants pour l'ensemble des essais afin de faciliter l'exploitation des résultats.

3.1 Appareil de fretting

Les tests de fretting ont été réalisés sur un banc d'essai multi stations conçu à cet effet au laboratoire et constitué de 5 stations identiques opérant simultanément à la même fréquence d'oscillation comme le montre le schéma de la figure 13.

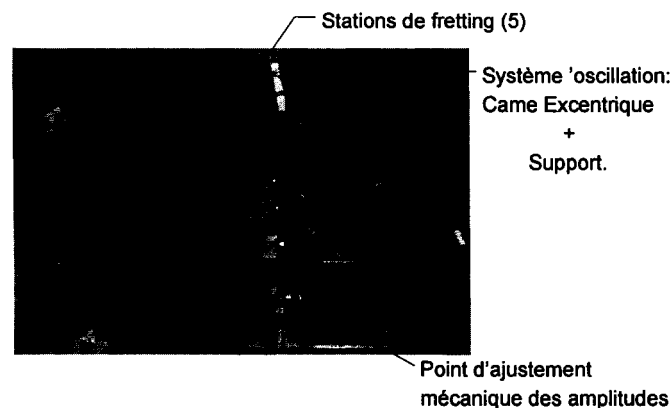


Figure 13 Diagramme et photo de l'appareil de fretting

Chacune des stations est composée d'un support de bille et d'un plateau mobile sur roulement à billes sur lequel est fixée la plaque. Le réglage de l'amplitude se fait de façon séparée pour chaque station par le biais d'un système mécanique vis-écrou.

Chaque station peut donc fonctionner à sa propre amplitude. Le micro mouvement de va-et-vient de l'ensemble des stations du montage est produit à partir d'une came excentrique rigidement montée à la sortie de l'arbre d'entraînement du moteur électrique. Cette dernière met en mouvement alternatif un système mécanique qui fait osciller à son tour les supports de plaques contre la bille.

La spécificité principale du montage réside dans la possibilité de faire varier indépendamment les conditions de contact d'une station à une autre : charge et amplitude. Il est aussi possible de mesurer simultanément le coefficient de frottement et l'amplitude du mouvement. Un schéma détaillé d'une station de montage est illustré dans la figure 14.

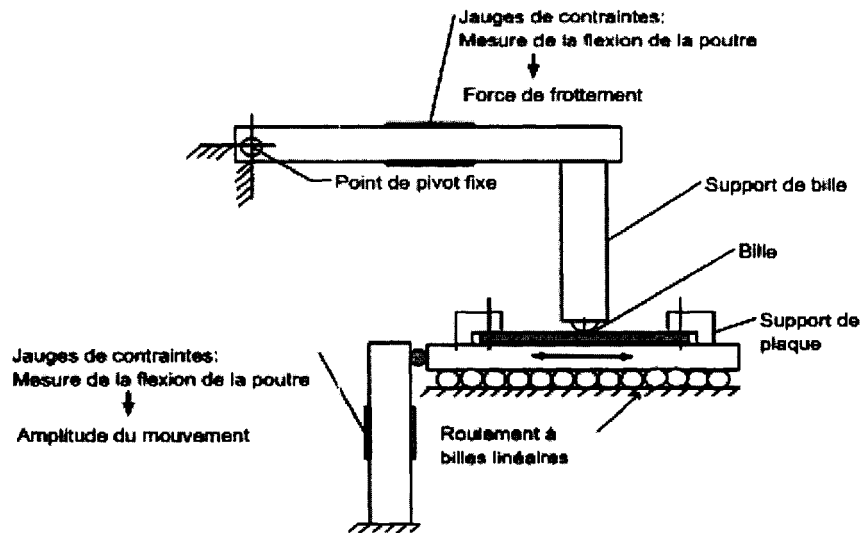


Figure 14 Schéma d'une station de mesure de l'appareil de fretting

3.2 Choix des matériaux

Il a été montré que l'usure se produit plus ou moins vite en fonction des matériaux mis en jeu. Comme il n'existe pas de classification adéquate pour déterminer le matériau à choisir, on se doit de prendre en compte plusieurs critères :

- d'un point de vue mécanique, il faut considérer les différentes propriétés des matériaux (limite élastique, rigidité, rugosité de surface, etc.) ainsi que les traitements de surface s'il y a lieu.
- d'un point de vue métallurgique, il faut que les matériaux utilisés soient recyclables mais aussi que leur mode d'élaboration soit simple.

Pour des considérations économiques, l'or, le platine, et d'autres métaux sont éliminés. Étant donné leur point de fusion élevé, ces derniers sont difficilement recyclables.

En fait, le choix des matériaux relève de l'idée de pouvoir intégrer des matériaux souvent utilisables et facilement reproductibles dans des applications de contact électrique. La configuration du contact bille-plaque est adoptée. À partir de ces critères, nous avons choisi les couples de matériaux suivants :

- AISI 52100, Al 6061-T6, Cu pour la bille;
- AISI 316L, Al 6161-T6, Cu pour la plaque.

La composition chimique et les propriétés mécaniques de l'ensemble desdits matériaux sont présentées sous le titre subséquent "propriétés des matériaux".

3.3 Propriétés des matériaux

Les compositions chimiques et propriétés mécaniques des matériaux étudiés sont données respectivement dans les tableaux I, II et III. Pour la dureté, les mesures ont été prises à l'échelle Vickers.

Tableau I

Composition chimique nominale de AISI 52100 et 316L

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Autres
AISI 52100	1.04	0.35	0.25	1.3-1.6	-	-
316L	0.03 max	2	1	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3Mo

Tableau II

Composition chimique nominale de 6061T6

Al	Mg	Si	Cu	Cr
Balance	1.0	0.6	0.30	0.20

Tableau III

Propriétés mécaniques des matériaux

	E(GPa)	A(%)	R _m (MPa)	R _{0.2} (MPa)	Dureté H
AISI 52100	210	0.11	2200	2200	825HV (62 HRC)
316L	193	40	450	170	165HV
6061T6	69	17	310	275	(125HV)
Cu	48	45	209		110HV

3.4 Procédure expérimentale

Pour l'ensemble de tests, les billes ont un diamètre de 10 mm et les plaques sont rectangulaires de dimensions 40x20x2mm. Le fini de surface de billes commerciales est caractérisé par une rugosité de l'ordre de 8µm.

Les plaques ont été polies mécaniquement jusqu'à la pâte d'alumine de 1 µm. Avant chaque essai, afin d'enlever toute trace de contaminants de surface et d'assurer un meilleur contact entre les surfaces, chaque échantillon a été nettoyé avec de l'éthanol pendant 5 min dans un appareil à ultrasons puis séché avec de l'air chaud.

L'ensemble des tests de fretting a été effectué dans des conditions non lubrifiées à l'atmosphère ambiante du laboratoire en été (T=21-23° et RH=50-60%). Aucun test n'a été effectué en hiver pour éviter d'avoir à analyser un paramètre supplémentaire : la vapeur d'eau. Afin de limiter la poussière de l'air, les essais ont été réalisés au sein d'une enceinte en plexiglas.

3.4.1 Fretting sans courant électrique

Dans cette partie d'essais, les conditions expérimentales ont été les suivantes :

- Charge normale : 94 gf ;
- Fréquence : 1 Hz;
- Nombre de cycles : 20 000 cycles;
- Amplitude du mouvement: 25, 50, 100, 150, 200, 250, 350, 400 μm ;
- Lubrification : essais à sec

Pour les essais sans courant électrique, on a procédé à 3 séries d'essais incluant chacune la combinaison entre une bille et 3 plaques de matériaux différents comme le montre le tableau IV.

Tableau IV

Expériences réalisées sans courant électrique

Expérience	Série 1 Bille AISI 52100	Essai 2 Bille 6061T6	Série 3 Bille Cu
Matériau de la plaque	316L 6061T6 Cu	316L 6061T6 Cu	316L 6061T6 Cu

3.4.2 Fretting avec courant électrique

L'ensemble des essais a été réalisé avec et sans courant électrique CC. Lors de l'exécution des essais, la plaque a toujours été reliée au pôle anode (+) et la bille à la cathode (-). Les essais ont été effectués sous les amplitudes de 50, 150, 250 et 400 μm .

L'intensité du courant électrique continu a été variée de 0 à 400 mA avec un incrément de 100mA. Le tableau V présente les combinaisons testées dans cette partie de l'étude.

Tableau V

Expériences réalisées avec courant électrique

Expérience	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Matériau bille	AISI 52100	AISI 52100	6061T6	Cu	Cu
Matériau plaque	316L	6061T6	Cu	6061T6	Cu

3.5 Techniques de caractérisation de la dégradation

A la fin de chaque test, les échantillons sont enlevés avec précautions et les traces de fretting examinés avec un microscope optique (MO) et un microscope électronique à balayage (MEB). L'analyse microscopique sert à examiner toute modification structurale en surface et la morphologie des débris d'usure générés par le frottement. On s'est servi d'un microscope électronique JEOL 3SCF et Hitachi S-3600N.

3.5.1 Mesure du coefficient de friction

Durant l'expérimentation, l'évolution de l'amplitude du mouvement, de la force tangentielle et du nombre de cycles est mesurée par des jauges de déformation préalablement étalonnées et montées en demi-ponts sur de minces poutres flexibles en aluminium. Les données d'acquisition sont enregistrées en temps réel par un système d'acquisition appelé Labview.

Pour chaque cycle de mouvement, la grandeur de la force tangentielle de frottement est constamment enregistrée en fonction de l'amplitude prééglée au niveau de chaque station. L'évolution de la force de friction et de l'amplitude est visualisables pendant le déroulement de l'essai. Le taux d'acquisition est de 12 lectures par seconde et les données sont sauvegardées à un intervalle de 10 secondes. La valeur du coefficient de frottement est établie selon la formule classique suivante :

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (2.18)$$

où F_t est la force tangentielle ou de frottement et F_n , la force normale appliquée au contact. Dans notre cas, la charge normale représente toujours le poids propre de la bille et de son support. Le calcul de la force de frottement F_t se fait à partir de la mesure de la flexion de la poudre sur laquelle sont collées les deux jauges de contraintes en configuration demi-ponts (figure 14). Le frottement produit dans le contact génère un léger fléchissement de la plaque avec une réaction au niveau des jauges collées et préalablement.

3.5.2 Quantification de la dégradation : volume de métal perdu

La résistance à l'usure de la surface du matériau peut être évaluée selon différentes méthodes. Selon la configuration du contact, le volume d'usure du tribosystème en glissement est communément évalué en considérant que la trace d'usure laissée sur la plaque est une calotte sphérique étendue dans le sens du mouvement et qu'elle est produite plutôt par usure que par déformation plastique.

La figure 15 illustre la différence entre la condition de glissement total en fretting et celle de glissement alterné en se basant sur le rapport de glissement, e , qu'est le quotient de la mi-distance parcourue de la bille en une alternance de mouvement par son rayon. Dans les deux cas de figures on peut adopter la même approche analytique pour le calcul du volume et du taux d'usure.

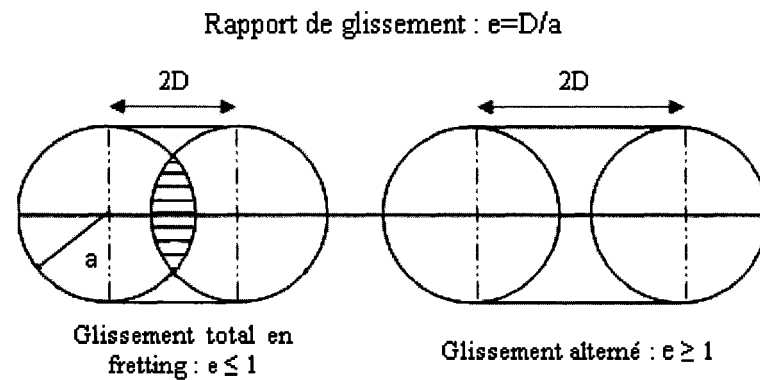


Figure 15 Différence entre les conditions de fretting et de glissement alterné

La méthode de calcul que nous avons adoptée est basée sur la mesure de la largeur de la trace d'usure sur la plaque. Cette largeur a été mesurée à l'aide d'un microscope optique relié à un PC muni d'un logiciel d'acquisition d'image permettant d'acquérir la grandeur des dimensions avec une précision de $\frac{1}{10}$ de micromètres. La figure 16 montre l'exemple d'une trace d'usure produite sur une plaque 316L en contact avec une bille très dure en acier AISI 52100.



Figure 16 Trace d'usure de la plaque 316L : bille AISI 52100- 400 μ m

Pour calculer le taux d'usure, plusieurs hypothèses de travail peuvent être faites : la bille est beaucoup plus dure que la plaque, la bille est beaucoup plus molle et enfin le cas intermédiaire où les duretés sont proches.

La quantification de la matière perdue de la surface du système bille-plaque est établie analytiquement à partir de la géométrie des traces d'usure produite en surface. Dans notre travail, le volume d'usure est défini comme étant le volume de matière arrachée de la surface de la plaque. Ce volume de perte est calculé en supposant qu'il n'y a pas d'usure de la bille ($H_p \ll H_b$).

La figure 17 illustre le profil et les données géométriques d'une trace d'usure laissée par le contact d'une bille sur un plan.

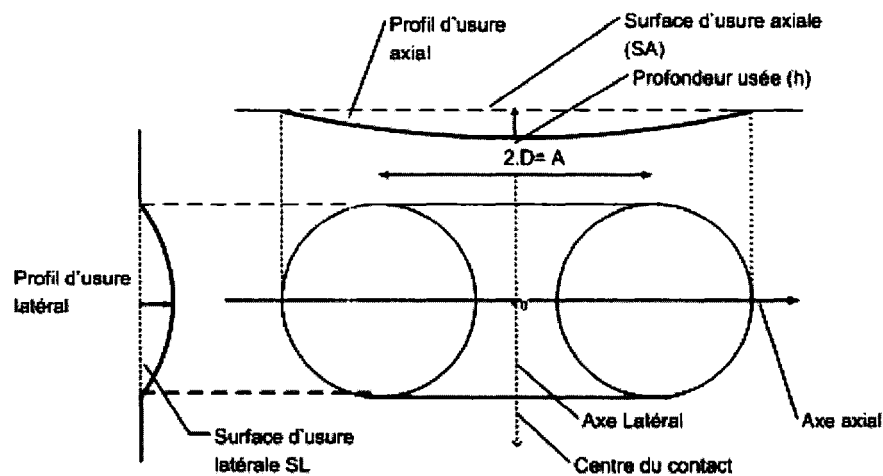


Figure 17 Présentation des paramètres d'usure

La section d'usure de la plaque est présentée comme une forme de calotte sphérique étendue dans le sens du mouvement dans le contact tel que schématisé ci-après (figure 18).

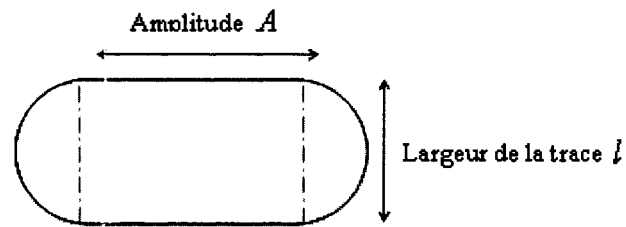


Figure 18 Profil géométrique d'une trace d'usure

Le volume de cette section usée est calculé analytiquement par la formule suivante:

$$V = \pi h^2 \left(R - \frac{h}{3} \right) + \left(R^2 \alpha - l \frac{R}{2} \cos(\alpha) \right) A \quad (2.19)$$

où :

- V est le volume d'usure (μm^3);
- h , profondeur de la trace (μm);
- R , rayon de la bille (μm);
- α , angle entre l'axe de la bille et le bord de la trace (*radian*);
- l , largeur de la trace (μm);
- A , amplitude du mouvement (μm).

Les paramètres h et α sont établis graphiquement à partir du rayon R et la largeur de la trace comme le montre le schéma suivant (figure 19).

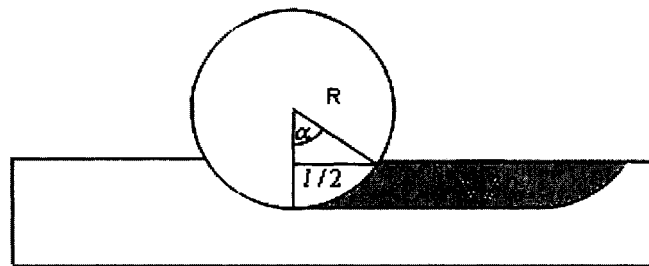


Figure 19 Enfoncement d'une bille dure dans une plaque molle

où :

$$h = R(1 - \cos \alpha) \quad (2.20)$$

et

$$\alpha = \arcsin(l/2R) \quad (2.21)$$

Si on se place dans le cas d'une bille molle et d'une plaque dure, c'est la bille qui s'use plutôt que la plaque. Dans ce cas où $H_p > H_b$, la trace sur la plaque mesure l'usure la bille. Comme le montre le schéma ci-après (figure 20), une section de la sphère du rayon R est enlevée du dessus.

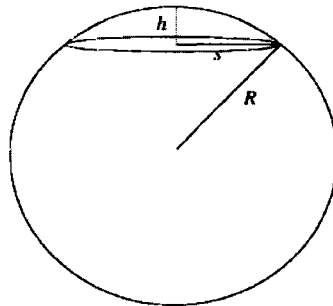


Figure 20 Schéma illustratif d'une bille avec un bout de trace usé

En utilisant une analyse géométrique simple, le volume de la section enlevée est calculé par la relation suivante :

$$V = \pi \left[h R^2 - \frac{R^3}{3} + \frac{(R-h)^3}{3} \right] \quad (2.22)$$

où h est donné par le théorème de Pythagore :

$$h = R - \sqrt{(R^2 - s^2)} \quad (2.23)$$

Le cas intermédiaire où $H_p \approx H_b$, sera discuté plus loin.

3.5.3 Calcul du taux d'usure

Le taux d'usure dans les systèmes de contact étudiés se rapporte à l'usure combinée des deux corps antagonistes. Il est établi à partir de la mesure de la trace d'usure produite sur la plaque. Cette grandeur est exprimée par le volume de la matière usée rapporté à la distance de glissement totale parcourue et à la charge appliquée au contact :

$$\dot{W} = \frac{V}{F_n X} \quad (2.24)$$

Où \dot{W} représente le taux d'usure $\left(\frac{\mu m^3 N}{\mu m} \right)$, F_n la force normale du contact (N) et X la distance totale parcourue (μm)

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

4.1 Dégradation sans courant électrique

Dans cette section, on cherche à corrélérer le taux de dégradation en fretting et en méso-fretting aux paramètres expérimentaux du contact principalement l'amplitude d'oscillation. Le but consiste à établir un classement du comportement à l'usure des couples en fonction des propriétés des matériaux.

4.1.1 Taux de dégradation

Les résultats peuvent être analysés en terme de volume perdu par longueur parcourue et charge appliquée ou en terme de coefficient de friction. La première série de résultats représente l'usure de la plaque en fonction de l'amplitude du mouvement. Les résultats du taux de dégradation relevé pour les 9 paires de matériaux testés sont représentés dans les figures 21, 22, 23.

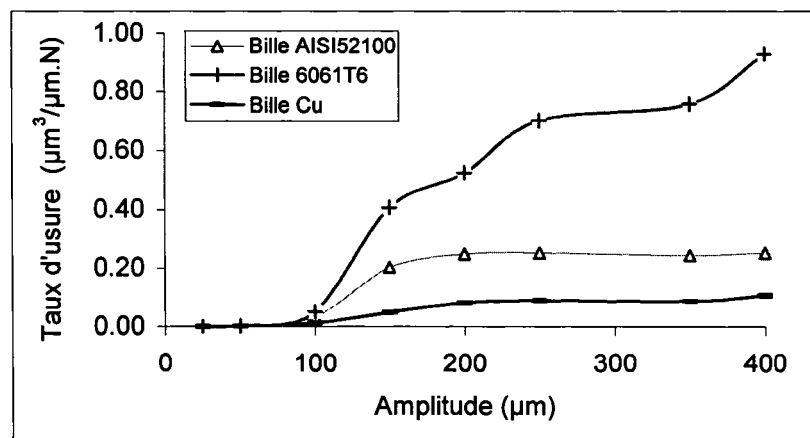


Figure 21 Taux d'usure de la plaque 316L vs amplitude avec différentes billes

Exemple pour la distinction du matériau de la bille de celui de la plaque : premier symbole (bille) – second symbole (plaque). Exemple; Cu-316L= contact d'une bille en cuivre avec une plaque en 316L.

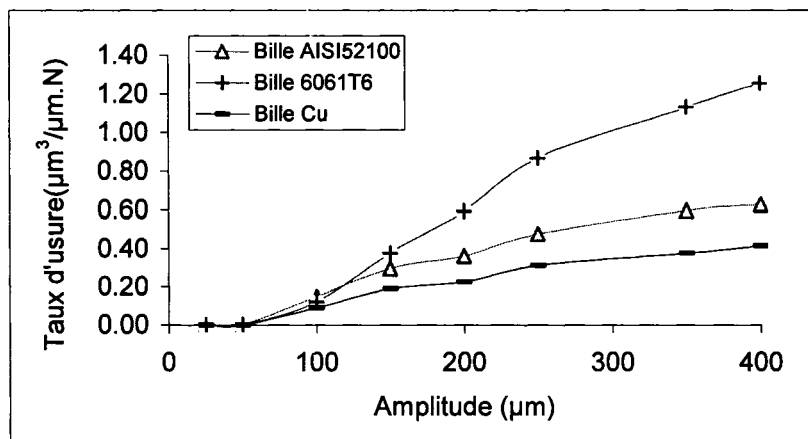


Figure 22 Taux d'usure de la plaque 6061T6 vs amplitude avec différentes billes

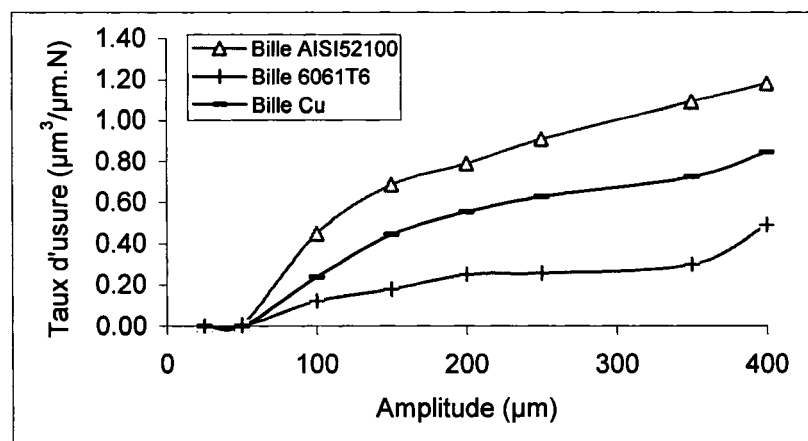


Figure 23 Taux d'usure de la plaque Cu vs amplitude avec différentes billes

La lecture des données montre plusieurs tendances évidentes :

- la plaque en acier inoxydable 316L en contact avec la bille en alliage d'aluminium durci structuralement représente le cas de la plaque à faible résistance (figure 21).
- l'usure de la plaque 6061T6 est significative quand ce matériau est mis en contact avec une bille de la même nuance (figure 22).
- l'usure de la plaque de cuivre est prononcée quand elle est en contact avec une bille en acier très dur tel que le AISI 52100 (figure 23).

On peut encore souligner les différents stades de l'usure. On doit noter que l'usure est très faible dans la gamme des micros déplacements à 25 et 50 μm d'amplitude. Dans ce cas, la dégradation est réduite à des taux très faibles avec un facteur allant de 10^2 à 10^3 voire 10^4 par rapport au stade du frottement à basse amplitude. On note aussi que les mesures prises sur les traces d'usure sont à la limite de la précision. Afin de mieux comprendre l'usure en fretting à cette échelle, on a jugé opportun de faire un agrandissement sur ces zones distinctes correspondant aux figures 24, 25, 26 qui représentent l'évolution de la micro dégradation pour chaque couple.

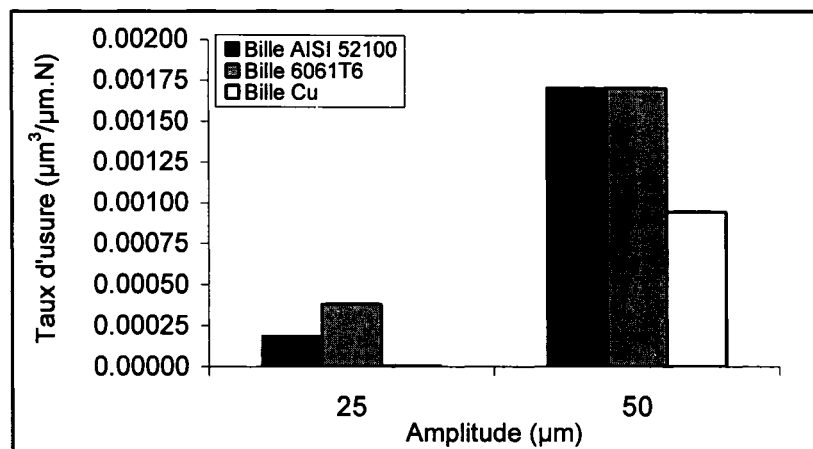


Figure 24 Usure de la plaque 316L en fretting

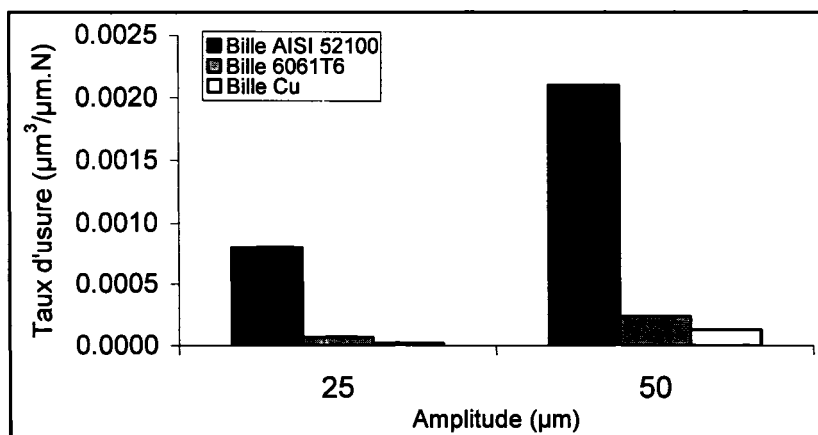


Figure 25 Usure de la plaque 6061T6 en fretting

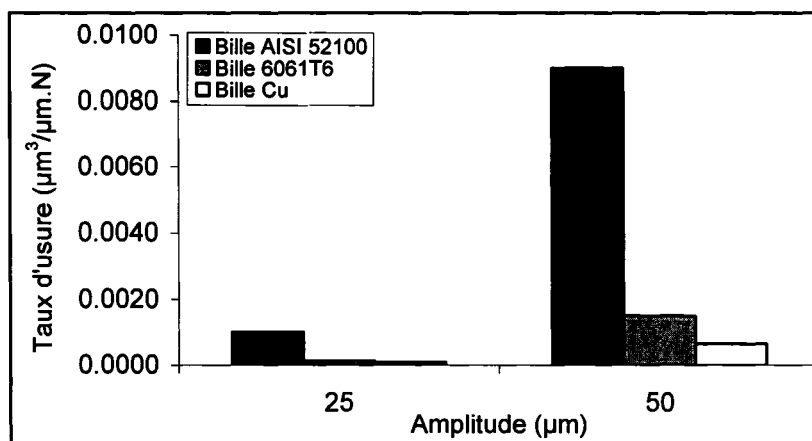


Figure 26 Usure de la plaque Cu en fretting

Les taux d'usure réalisés en fretting montrent que les plaques 316L et 6061T6 (figures 24, 25) présentent des niveaux de dégradation inférieures d'environ 5 fois par rapport au cas du cuivre (figure 26). On note aussi que, pour le même matériau de la plaque, la résistance à l'usure des couples conserve le même ordre de comparaison entre 25 et 50µm et que seul le taux d'usure augmente en fonction de l'amplitude.

Dans ce qui suit (figures 27, 28, 29), on montre une autre présentation des mêmes résultats que ceux des figures 21, 22, 23. Le but recherché de cette illustration est d'avoir une meilleure différenciation du comportement des 3 matériaux de la plaque.

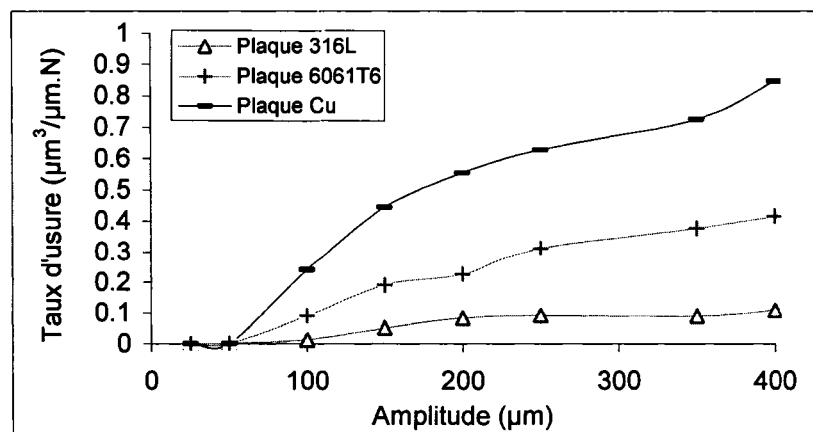


Figure 27 Taux d'usure vs amplitude pour différentes plaques-bille AISI 52100

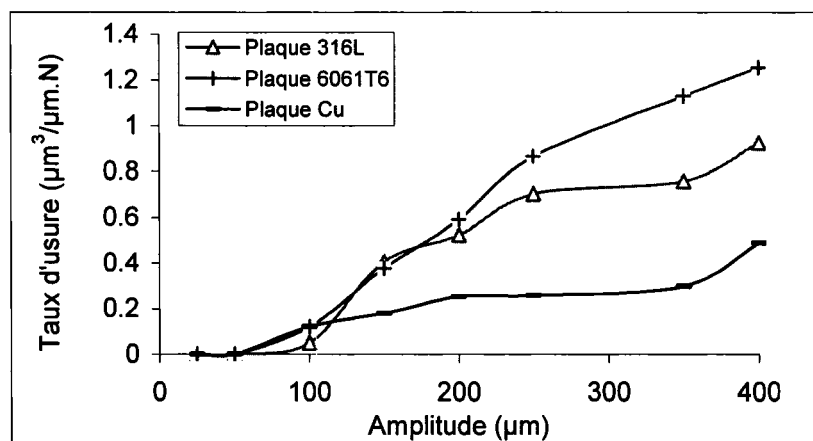


Figure 28 Taux d'usure vs amplitude pour différentes plaques-bille 6061T6

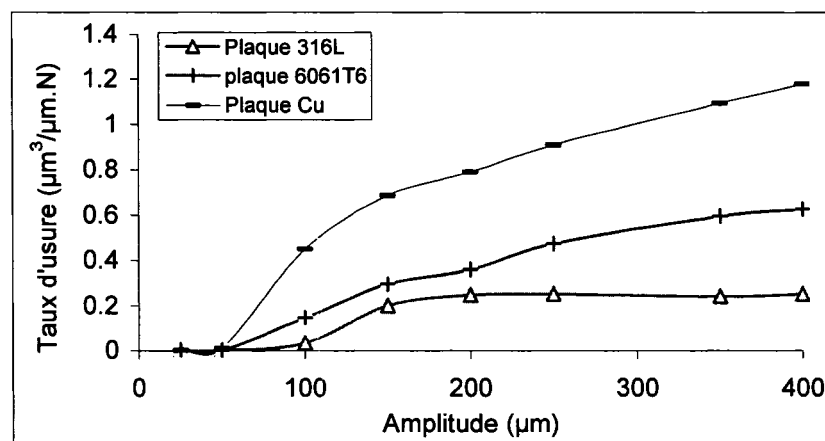


Figure 29 Taux d'usure vs amplitude pour différentes plaques- bille Cu

Ces résultats soulignent que les couples AISI 52100-316L (figure 27), 6061T6-Cu (figure 28) et Cu-316L (figure 29) présentent les meilleures combinaisons pour une bonne tenue l'usure respectivement dans les contacts considérés avec comme matériaux de billes AISI 52100, 6061T6 et le cuivre. Cette représentation met aussi en évidence un résultat intéressant : le taux d'usure de la plaque est régi par la loi d'Achard sauf lorsque plaques et billes sont identiques. Dans ce cas le taux d'usure de la plaque est très grand pour une amplitude de 400μm.

De la même façon que pour les figures précédentes 24, 25, 26, un agrandissement de la micro dégradation en fretting est nécessaire aux amplitudes de 25 et 50 μm est reproduit par les histogrammes ci-après, figures 30, 31, 32.

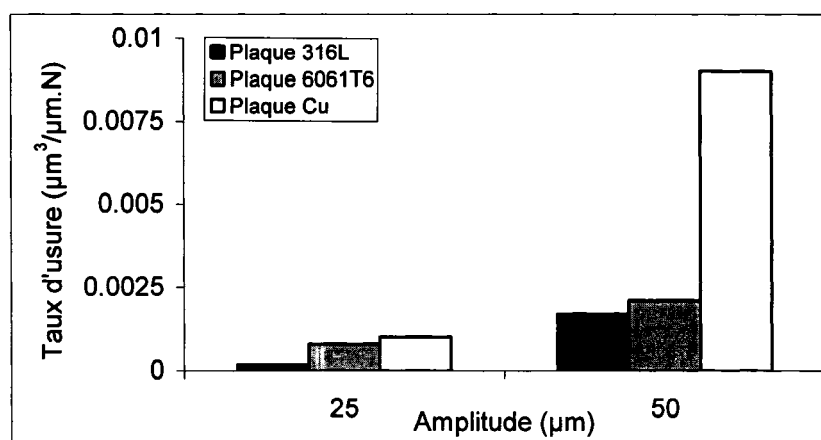


Figure 30 Usure des plaques en fretting avec la bille AISI 52100

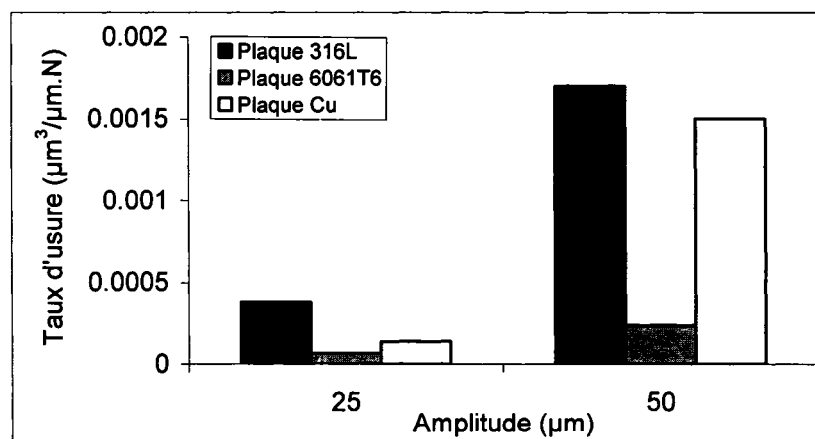


Figure 31 Usure des plaques en fretting avec la bille 6061T6

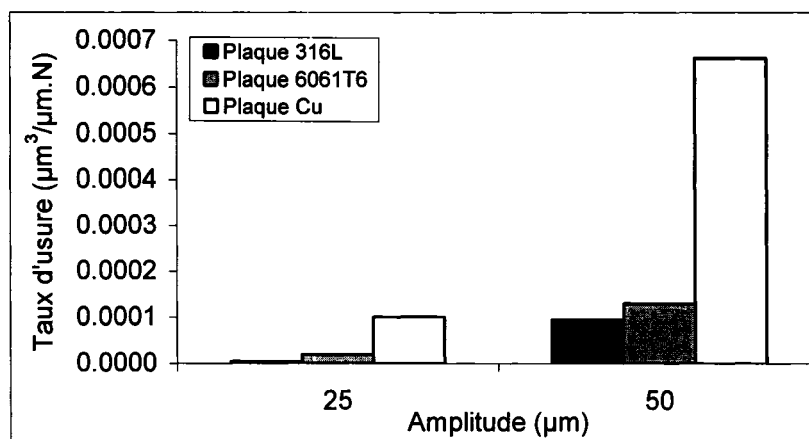


Figure 32 Usure des plaques en fretting avec la bille Cu

En contact avec la bille d'acier AISI 52100 (figure 30), la plaque en cuivre résiste moins bien à l'usure que les deux autres pour une amplitude de 25μm. En plus, l'augmentation de l'amplitude à 50μm fait accroître l'usure d'un facteur d'environ 7. On souligne que ce type contact ne fait pas intervenir des réactions chimiques et de compositions mais que le rapport des duretés est grand. Donc plus la bille est dure plus il y a production de particules d'usure surtout quand l'amplitude du mouvement augmente.

Avec la bille en 6061T6 (figure 31), on remarque que les plaques d'acier 316L et du cuivre s'usent plus que celles du 6061T6. Le taux d'usure pour ces deux cas est relativement similaire pour une amplitude de 50μm. La figure 32 montre que le contact Cu-Cu a une faible résistance en fretting. L'apparition d'un nouveau mécanisme de dégradation explique le comportement du contact cuivre-cuivre. La dégradation se fait ainsi à un rythme accéléré. La présence de long coupeaux, formés à partir de l'agglomération de fines particules d'usure.

4.1.2 Relation entre la pente $\left(\frac{\Delta\dot{W}}{\Delta x}\right)$ en méso-fretting et le niveau d'usure en frottement à basse amplitude

On peut aussi remarquer qu'il existe une bonne corrélation entre la pente en méso-fretting et le niveau d'usure en frottement. Les tendances établies sont données par les variations linéaires suivantes :

$$\left(\frac{\Delta\dot{W}}{\Delta x}\right)_{316L} = 0.003\dot{W}_{400\mu m} + 0.0007 \quad (4.1)$$

$$R^2 = 0.85$$

$$\left(\frac{\Delta\dot{W}}{\Delta x}\right)_{6061T6} = 0.0025\dot{W}_{400\mu m} + 0.0010 \quad (4.2)$$

$$R^2 = 0.95$$

$$\left(\frac{\Delta\dot{W}}{\Delta x}\right)_{Cu} = 0.0066\dot{W}_{400\mu m} + 0.0017 \quad (4.3)$$

$$R^2 = 0.99$$

$\dot{W}_{400\mu m}$ est le seuil d'usure maximal en frottement. Comme le représente la figure 33, chaque droite est relative au matériau de chaque plaque en contact avec les trois billes.

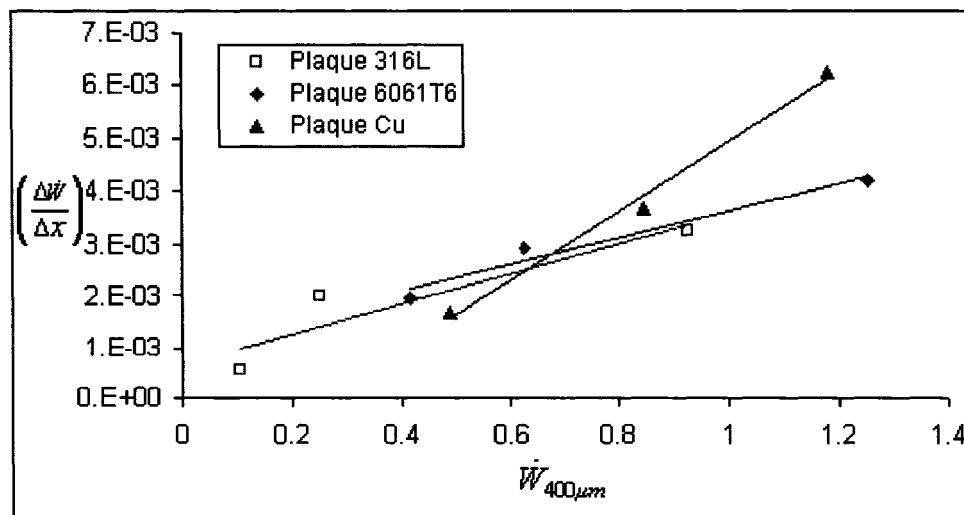


Figure 33 Variation de $\left(\frac{\Delta\dot{W}}{\Delta x}\right)$ en méso-fretting en fonction du taux d'usure

Plusieurs conclusions peuvent être obtenues à savoir :

- avec la plaque 316L, on enregistre des niveaux d'usure faibles par rapport à ceux mesurés sur les plaques d'aluminium et du cuivre et ce quelque soit le type du matériau de la bille.
- le contact "AISI 52100-Cu" présente un comportement différent des autres couples. L'abrasion est beaucoup plus présente dans ce couple.

4.1.3 Coefficient de friction : amplitude du mouvement

Les coefficients de frottement sont établis par la mesure du quotient $\frac{F_t}{F_n}$ (équation(4.4))

qui, dans l'ensemble des cas étudiés, tend à se maintenir autour d'une valeur stable après un certain nombre de cycles. Les figures 34, 35, 36 représentent la variation du coefficient de frottement en fonction de l'amplitude du mouvement. L'évolution du coefficient de frottement (μ) peut être séparée en 3 stades distincts : fretting (F), méso-fretting (MF) et frottement à basse amplitude (FBA) comme illustré conjointement à la figure 34.

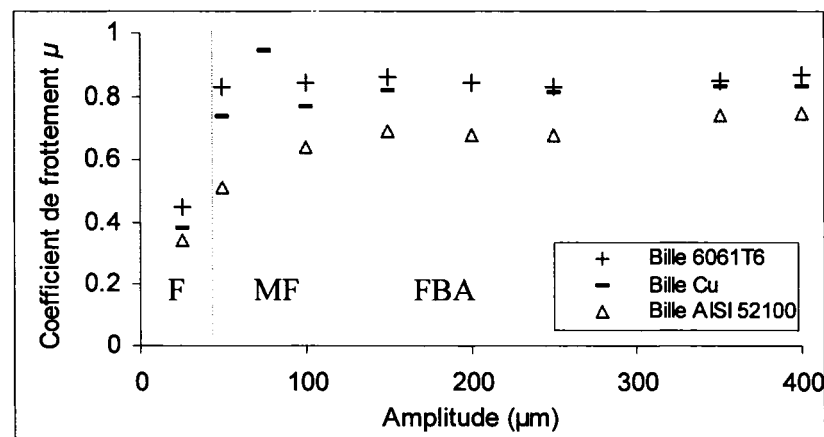


Figure 34 Coefficient de frottement μ vs amplitude pour différentes billes- plaque 316L

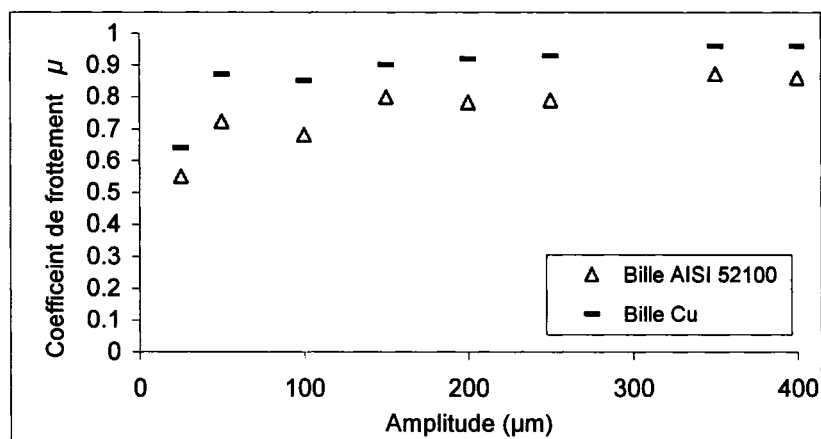


Figure 35 Coefficient de frottement μ vs amplitude pour différentes billes- plaque 6061T6

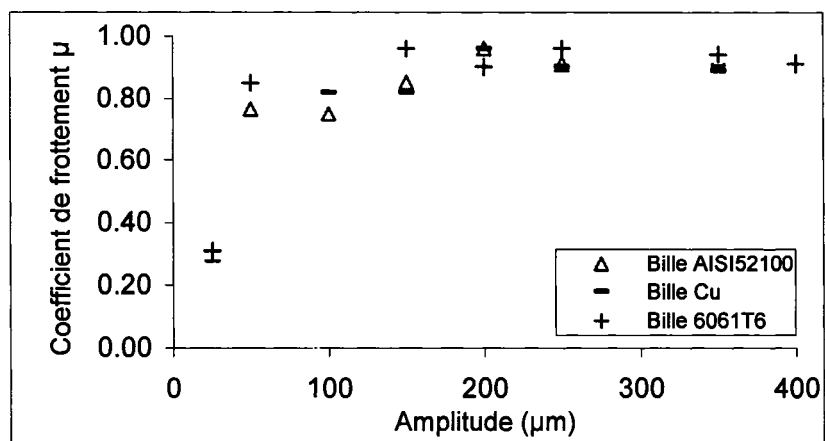


Figure 36 Coefficient de frottement vs amplitude pour différentes billes-plaque Cu

D'après l'allure des graphes, on constate que le coefficient de frottement tend à se stabiliser dès le stade du méso-fretting, soit à partir d'une amplitude d'environ $50\mu\text{m}$. Pour les faibles amplitudes de fretting de $25\mu\text{m}$, on note des valeurs de coefficient de frottement variant de 0.34 à 0.45 dans les couples dont la plaque est l'acier 316L (figure 34) et de 0.55 à 0.64 respectivement dans les couples AISI 52100-6061T6 et le Cu-6061T6 (figure 35). Pour des contacts qui incluent la plaque de cuivre (figure 36), on mesure un coefficient de frottement de 0.31.

Dans le stade du frottement à basse amplitude, le coefficient de frottement se stabilise à une valeur de l'ordre de 0.73 à 0.75 dans le cas du AISI 52100-316L et de 0.83 pour les couples Cu-316L et 6061T6-316L.

Le contact AISI 52100-6061T6 génère un peu moins de friction que le Cu-Al6061T6 (figure 35) dans toute la gamme des amplitudes. À cet effet, on note un coefficient de friction de l'ordre de 0.79 dans le premier cas "AISI 52100-6061T6" et qui atteint 0.92 dans le couple Cu-Al6061T6. L'analyse des débris d'usure permettra d'expliquer ces différences. En contact avec la plaque du cuivre (figure 36), le coefficient de frottement engendré est de 0.89 quand la bille est en acier ou en cuivre et il se stabilise à une valeur de 0.9 quand elle en 6061T6.

Il semble que le CDF est de 0.8-0.9 pour l'ensemble des couples. La variation de ce coefficient dans l'ensemble des cas peut se schématiser ainsi (figure 37):

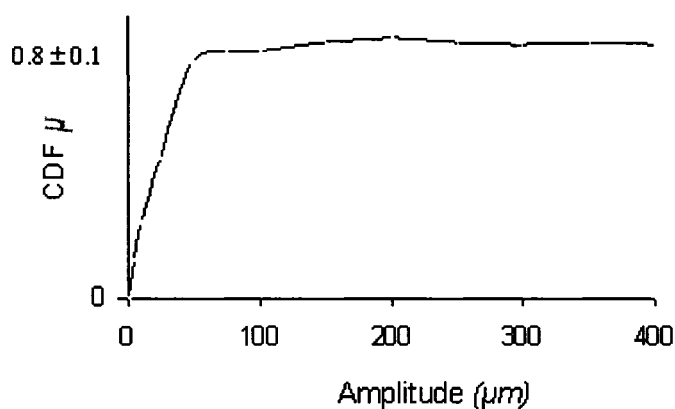


Figure 37 Évolution du CDF des couples en fonction de l'amplitude

4.1.4 Coefficient de frottement : nombre de cycles

À la différence de la variation du coefficient de frottement en fonction de l'amplitude comme on vient de l'établir, on peut représenter l'évolution en fonction du nombre de cycles de ce paramètre. Les figures 38, 39, 40, 41 illustrent respectivement le cas des couples suivants : AISI 52100-316L, AISI 52100-6061T6, Cu-6061T6, Cu-Cu.

L'évolution de la friction avec le nombre de cycles dans ces contacts présente un certain trait commun qui consiste dans le fait qu'il existe un certain temps d'incubation. Dépendamment des matériaux, cette période s'écoule dans les premiers milliers de cycles durant laquelle le coefficient de frottement atteint une valeur maximale.

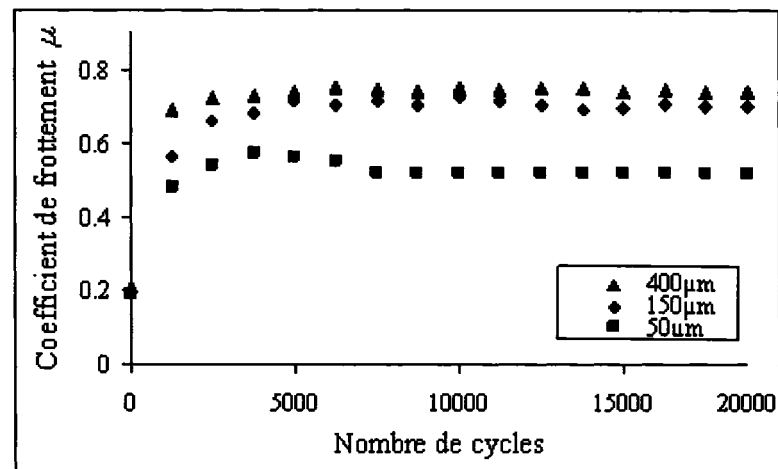


Figure 38 Évolution du coefficient de frottement du AISI 52100-316L

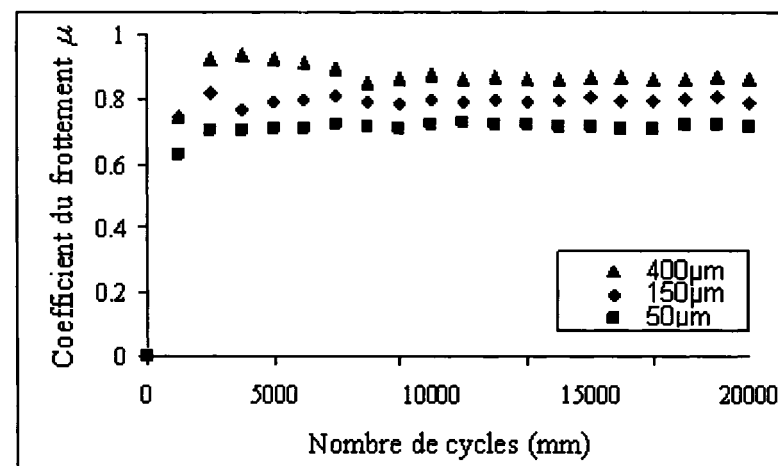


Figure 39 Évolution du coefficient de friction du AISI 52100-6061T6

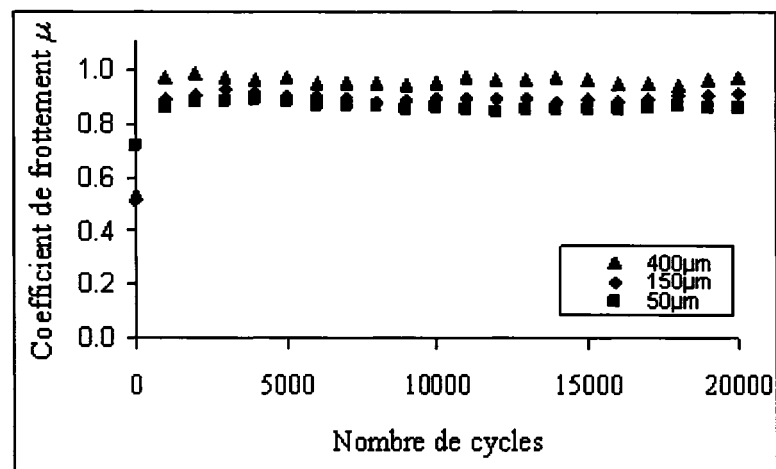


Figure 40 Évolution du coefficient de friction du Cu-6061T6

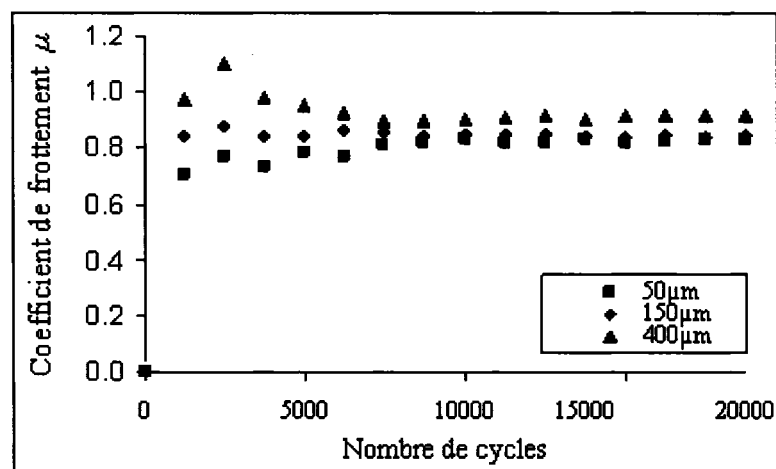


Figure 41 Évolution du coefficient de friction du Cu-Cu

Comme on le remarque sur les tracés de friction, le coefficient de frottement atteint un maximum et devient quasiment stable autour de cette valeur sous faibles et moyennes amplitudes de déplacement. Le coefficient de friction atteint très rapidement sa valeur stable. Il semble qu'un tout petit nombre de cycles soit nécessaire pour que la couche de débris s'établisse. L'évacuation des débris est faible et dans tous les cas la couche d'oxydes de faibles dimensions s'établit rapidement. Une exception à cette règle semble être le cas du Cu-Cu. En effet, le coefficient de friction par un maximum pour quelques milliers de cycles.

Un faible maximum est aussi observé pour les contacts AISI 52100-6061T6 et le Cu-Cu, figures 39 et 41. Ceci se produit après 2000 à 3000 cycles pour une amplitude de déplacement de 400 μ m. pour un nombre de cycles supérieur, le CDF diminue et se stabilise autour des valeurs inférieures. On enregistre des valeurs de 0.98 et 1.10 respectivement dans le AISI 52100-6061T6 et le Cu-Cu qui vont baisser et se maintenir aux valeurs moyennes de 0.79 et 0.87 Le même phénomène se produit dans le cas du Cu-6061T6 mais plus faiblement pour une amplitude de 150 et 400 μ m. Le comportement du CDF peut donc être aussi classé en trois régions caractéristiques de l'évolution de la friction avec le temps dans ces contacts. La première correspond au temps d'incubation (I), la deuxième à une période de modification des propriétés de frottement des surfaces (II) et la dernière à la condition stabilisée du frottement (III). Le schéma élaboré ci-après (figure 42) schématise sommairement ces trois phases d'évolution du CDF :

- le temps d'incubation correspond à l'adaptation des deux surfaces par élimination des oxydes de surface pour donner lieu à l'interaction métal-métal d'où une augmentation rapide du CDF;
- une période de transition caractérise le passage du frottement à l'état stabilisé avec formation du 3^{ème} corps dont la vie accommode l'usure des deux partenaires de contact.

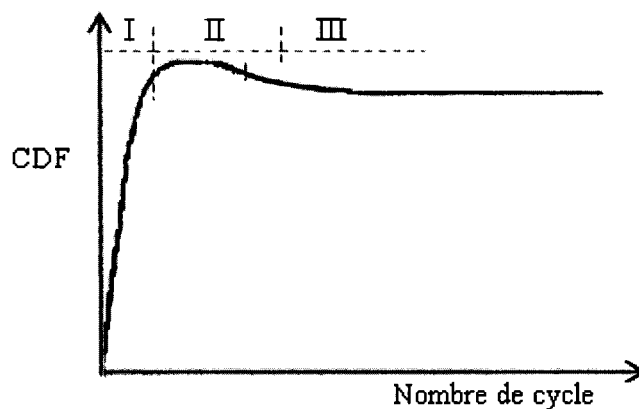


Figure 42 Schéma illustratif de l'évolution du CDF vs nombre de cycle

4.2 Fretting et courant électrique

4.2.1 Taux de dégradation

Dans cette partie, on étudie l'évolution de la dégradation dans 5 cas de contact métallique en introduisant l'effet du courant électrique.

Le taux d'usure est rapporté en fonction de l'amplitude d'oscillation et des valeurs du courant électrique appliqué. Pour chaque couple et amplitude donnés, un test de fretting sans courant a été effectué. Le taux d'usure obtenu pour les différents couples de matériaux est représenté par les graphiques ci-après, figures 43 à 47.

Les résultats montrent que l'action du courant électrique sur la dégradation commence à être prononcée dans le stade du frottement à basse amplitude. On souligne que l'intensité de cette action est aussi fonction du couple des matériaux. Les données d'usure relatives à chaque type de couple seront détaillées.

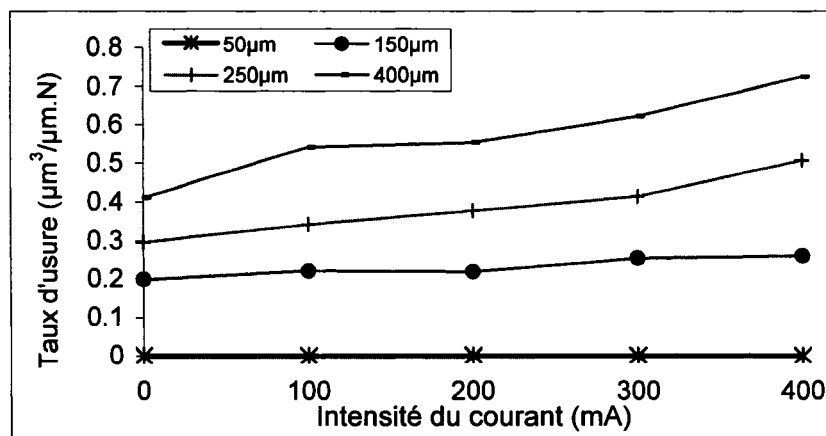


Figure 43 Évolution du taux d'usure vs intensité de courant et amplitude d'oscillation: couple Cu-6061T6

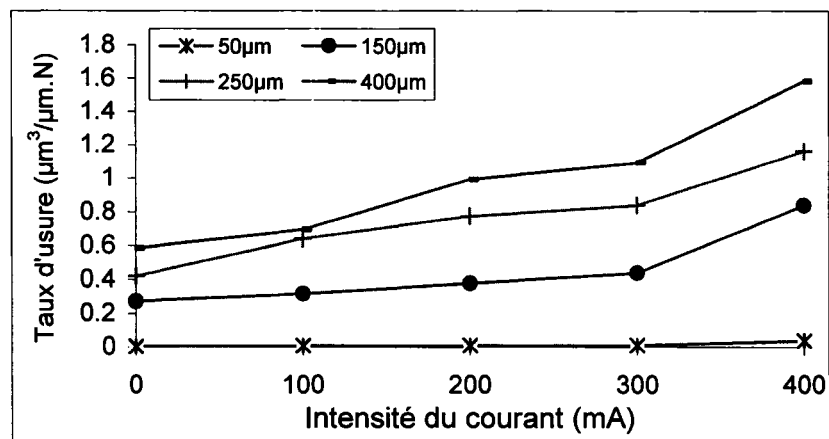


Figure 44 Évolution du taux d'usure vs intensité de courant et amplitude d'oscillation : couple AISI 52100-6061T6

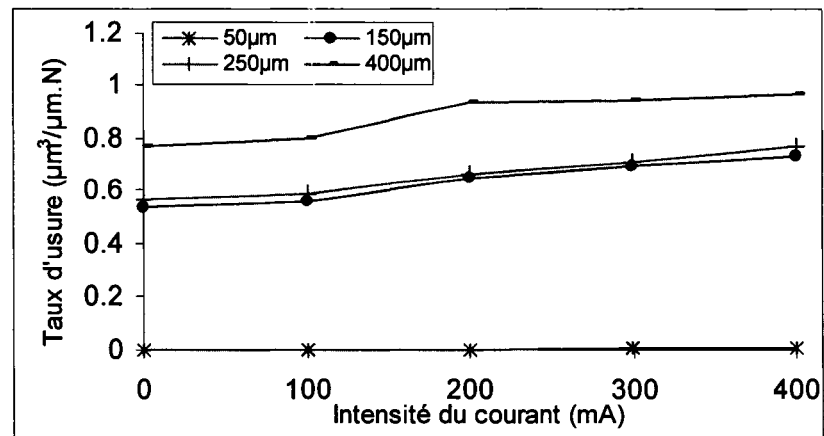


Figure 45 Évolution du taux d'usure vs intensité de courant et amplitude d'oscillation : couple Cu-Cu

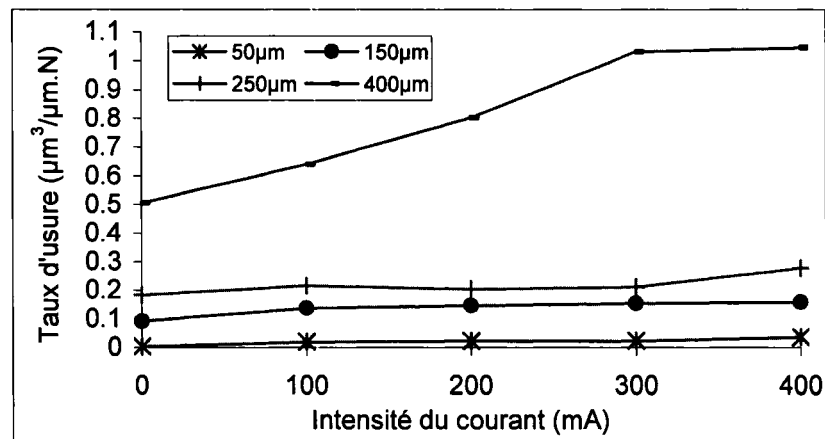


Figure 46 Évolution du taux d'usure vs intensité de courant et amplitude d'oscillation : couple 6061T6-Cu

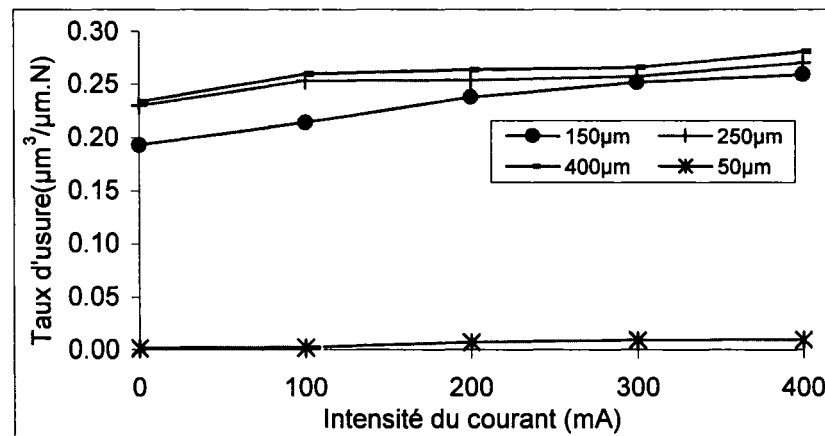


Figure 47 Évolution du taux d'usure vs intensité de courant et amplitude d'oscillation: couple AISI 52100-316L

Dans le couple Cu-6061T61 (figure 43) l'action du courant sur l'usure de la plaque augmente à mesure que l'amplitude du mouvement augmente. On note que le taux d'usure est multiplié par un facteur de 1.75 entre 0 et 400mA.

Le contact AISI 52100-6061T6 (figure 44) présente la même allure de comportement que celui de Cu-6061T6 mais avec une destruction plus prononcée. Cela est dû en partie à la variation de la dureté relative entre les deux contacts. À titre indicatif, pour une

amplitude de 400 μm et des valeurs de courant de 0 et 400mA, on note un rapport de dégradation 2.7 fois dans ce dernier contact à comparer à un rapport de 1.75 constaté dans le premier (Cu-6061T6). De là on constate que l'effet de la dureté relative sur l'usure augmente avec le courant électrique ou, énoncé d'une autre manière, le courant exerce plus d'effet quand le contact se détruit.

La figure 45 montre que l'effet du courant sur l'usure est légèrement prononcé dans le contact Cu-Cu en frottement à basse amplitude pour une intensité de courant entre 100 et 200mA. À cette amplitude de 400 μm , l'usure se stabilise à partir de 200mA. Pour les amplitudes intermédiaires de 150 et 250 μm , l'usure engendrée par la contrainte est en synergie avec celle courant. L'effet mesurable du courant commence à avoir lieu à des valeurs supérieures à 100mA pour les amplitudes de 150 et 250 μm . Pour l'amplitude maximale de 400 μm , l'usure est profondément affectée par le courant notamment entre 100 et 200mA. À comparer aux couples Cu-6061T6 et AISI 52100-6061T6, l'effet du courant est faible et est très faiblement linéaire à partir d'un courant de 200mA.

D'après la figure 46, l'usure du couple 6061T6-Cu ne dépend pas du courant jusqu'à une amplitude de 250 μm . En imposant une amplitude de mouvement de 400 μm , une usure significative se produit et qui va s'activer davantage avec l'application du courant jusqu'à 300mA avant de subir une saturation à partir de cette valeur seuil. Or, le taux d'usure passe de 0.5 à 1.03 $\frac{\mu\text{m}^3}{\mu\text{m.N}}$ entre 0 et 300mA, soit une dégradation accélérée d'un facteur de deux.

La combinaison des aciers AISI 52100 et 316L (figure 47) forme un couple qui s'avère être le plus résistant à la dégradation en présence du courant électrique. Ce dernier représente un taux d'usure maximal de 0.28 $\mu\text{m}^3/\mu\text{m.N}$. Sous une amplitude maximale de 400 μm et un courant 400mA. Ce couple correspond au niveau de dégradation le plus bas par rapport aux autres cas étudiés. L'amplitude du mouvement et le courant électrique ont une influence faible à partir des valeurs supérieures à 150 μm et 200mA

4.2.2 Dégradation en fretting

Reprenons ici distinctement l'évolution de la dégradation sous l'influence du courant dans le stade du fretting correspondant à l'amplitude de $50\mu\text{m}$. Les figures 48 à 52 permettent d'en visualiser le détail.

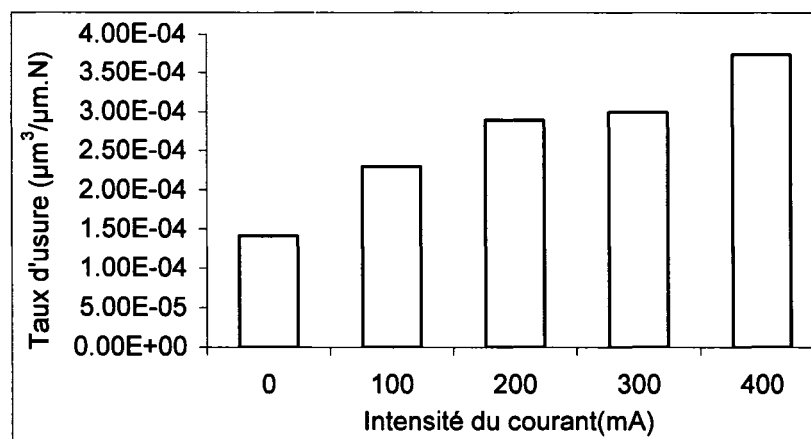


Figure 48 Évolution du taux d'usure en fretting vs intensité de courant
couple : Cu-6061T6 - $50\mu\text{m}$

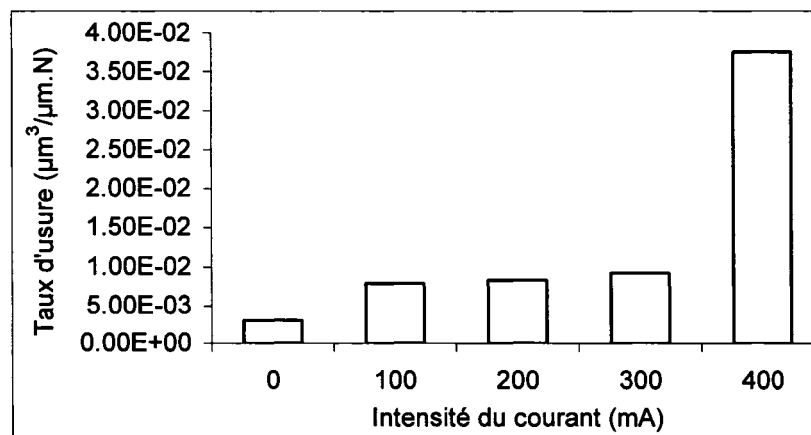


Figure 49 Évolution du taux d'usure en fretting vs intensité de courant
couple : AISI 52100-6061T6 - $50\mu\text{m}$

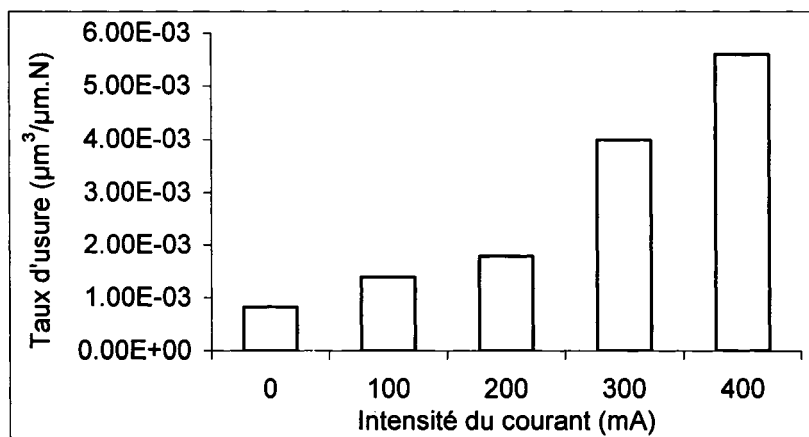


Figure 50 Évolution du taux d'usure en fretting vs intensité de courant
couple : Cu-Cu - 50 μm

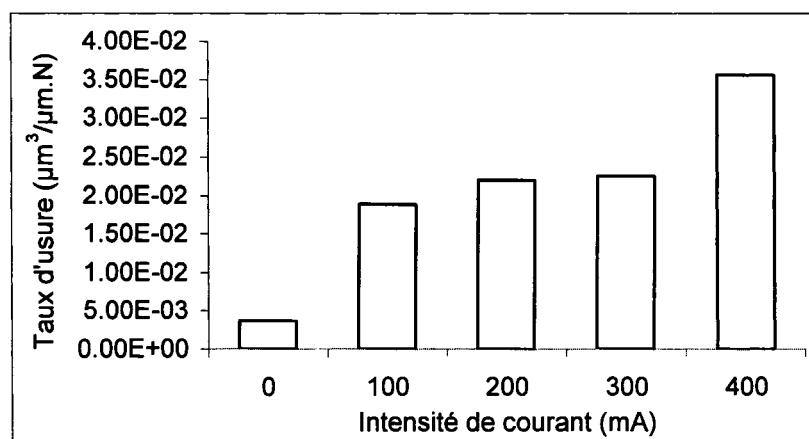


Figure 51 Évolution du taux d'usure en fretting vs intensité de courant
couple : 6061T6-Cu - 50 μm

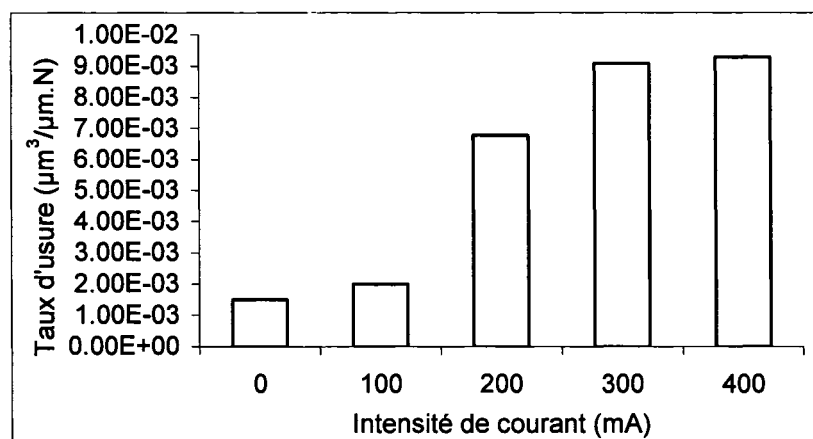


Figure 52 Évolution du taux d'usure en fretting vs intensité de courant
couple : AISI 52100-316L - 50 μm

Les résultats permettent de souligner les remarques suivantes :

- la dégradation du couple AISI 52100-6061T6 est faible jusqu'à une intensité de courant de 300mA avant de subir une augmentation très conséquente.
- le couple AISI 52100-316L se particularise par une usure stabilisée à partir d'un courant seuil de 300mA.
- suivant le degré d'usure produit, les systèmes Cu-6061T6, Cu-Cu et AISI 52100-316L représentent les couples à faible usure en fretting.

D'après ces résultats, on peut souligner que le courant exacerbe l'usure surtout aux grandes amplitudes de débattement.

4.2.3 Caractérisation mécaniques des surfaces

4.2.3.1 Mesures de micro dureté

Des mesures de micro dureté Vickers ont été effectuées sur les matériaux des plaques avec un micro duromètre Vickers. La prise de dureté a été faite sous une charge de 200gf. Les valeurs indiquées sur le tableau VI représentent la moyenne de cinq points de prélèvement sur la surface initiale des plaques.

Tableau VI

Micro dureté Vickers des matériaux des plaques

AISI 52100	6061T6	Cu	316L
825 ± 2	125 ± 2	110 ± 2	165 ± 2

4.2.3.2 Écrouissage des matériaux

Dans le but d'éclaircir l'effet de l'écrouissage des plaques sur le comportement à l'usure, des mesures de microdureté (HV200) ont été prises sur les traces d'usure à la fin de chaque test sans courant. Sous la même charge, on a obtenu des variations illustrées dans la figure 53. À noter que chaque lecture est la moyenne de 5 mesures prises pour les traces de 400µm d'amplitude. La micro indentation Vickers peut mettre en évidence certains changements dans les propriétés des matériaux. Ces modifications peuvent servir d'outil afin de comprendre le comportement en fretting.

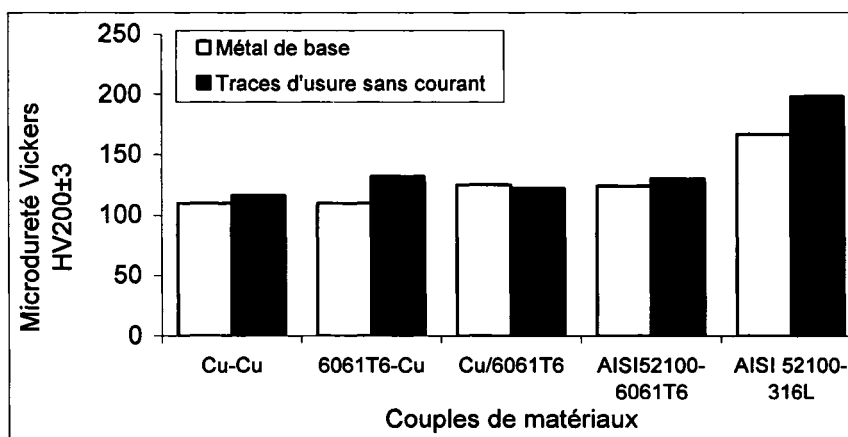


Figure 53 Micro dureté Vickers avant et après frottement sans courant pour une amplitude de 400µm

Ces nouvelles données de dureté montrent les tendances de comportements suivants :

- la plaque austénitique 316L s'avère être le matériau qui consolide le plus avec une dureté qui atteint 198 HV, soit une augmentation d'environ 20% de la dureté initiale.
- les autres couples sont peu affectés par le frottement. Des mesures plus sensibles pourraient être faites, mais il n'en demeurerait pas moins que l'effet d'écrouissage est faible. La faible charge peut expliquer ce résultat.

Un calcul approximatif rapide peut donner un ordre de grandeur de la contrainte appliquée. En appliquant l'équation (4.5) pour le cas de la plaque dure de 316L (165HV) on calcule un rayon de contact de :

$$a = \left(\frac{72 \cdot 10^3}{\pi \cdot 165} \right)^{1/2} = 0.072 \text{ mm}$$

avec une contrainte de l'ordre de $\sigma = \frac{72 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot a} = 6.1 \text{ MPa}$ ce qui est très en dessous de la limite d'élasticité.

4.2.3.3 Effet du courant

Des mesures plus systématiques éclairent l'effet du courant. Afin d'évaluer son impact possible sur la dureté des traces d'usure, on a de nouveau procédé à la mesure de la dureté de surface dans les traces d'usure pour chaque intensité du courant. Les figures 54, 55, 56 illustrent les variations mesurées.

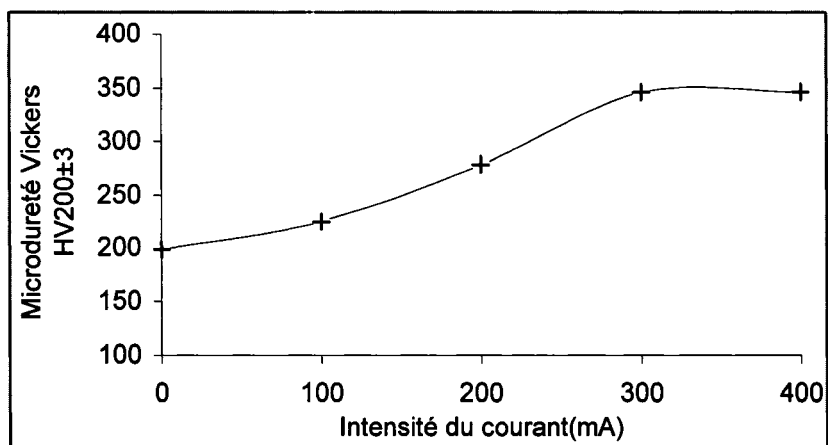


Figure 54 Microdureté Vickers des traces d'usure de la plaque 316L vs intensité de courant-bille AISI 52100 (400 μ m)

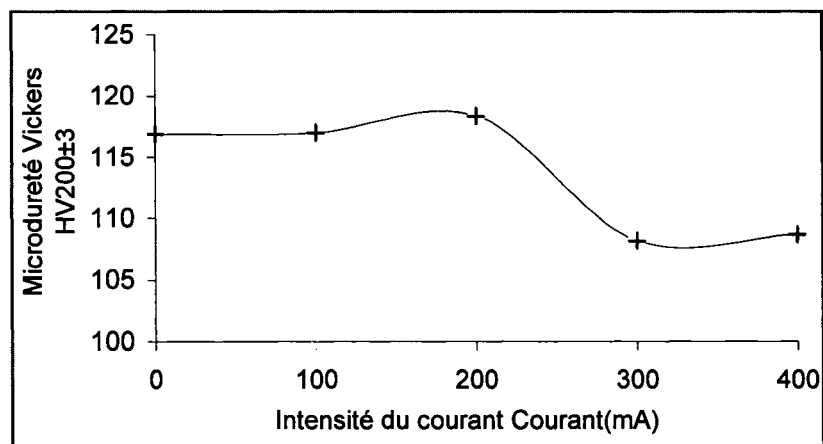


Figure 55 Microdureté Vickers des traces d'usure de la plaque Cu vs intensité de courant -bille Cu (400 μ m)

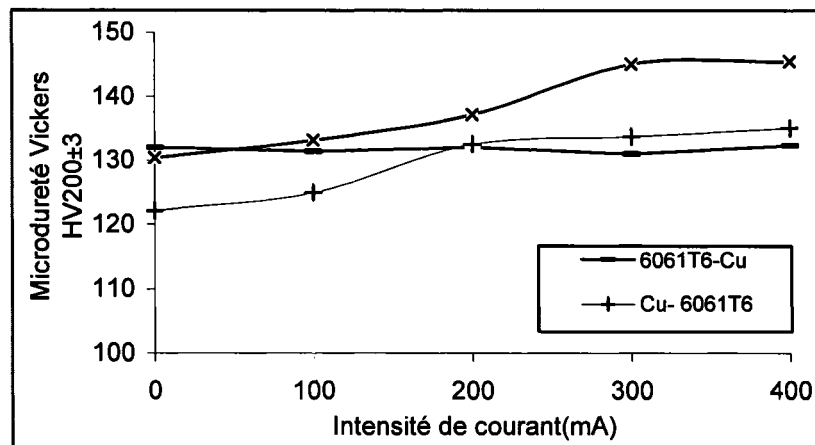


Figure 56 Microdureté HV200 des traces d'usure des plaques Cu et 6061T6 vs intensité de courant (400 μ m)

L'acier 316L consolide davantage sous l'effet du courant électrique jusqu'à atteindre une dureté de 346 HV pour un courant de 300mA avant de se stabiliser (figure 54). L'augmentation de la dureté est alors de l'ordre de 57%. On peut attribuer ce comportement à l'augmentation du taux d'oxydes stables et durs dans la trace d'usure.

Pour la plaque du cuivre (figure 55), la dureté augmente faiblement jusqu'à 118HV pour un courant de 200mA pour chuter après à 108 HV et se stabiliser autour de cette valeur. Dans ce cas, on souligne que cette baisse de dureté est entraînée par le chauffage du métal.

La dureté de la même plaque en cuivre soumise cette fois-ci au contact avec la bille en aluminium reste inchangée sous l'effet du courant (figure 56). Le faible écrouissage constaté s'est produit juste dans le contact sans courant (voir figure 53). Néanmoins, la dureté correspondante (~ 130) reste supérieure au pic de dureté de la même plaque du couple Cu-Cu (118HV). La plaque 6061T6 T6 durcit plus en contact avec la bille AISI 52100 qu'avec celle du cuivre. Dans le premier cas, la dureté atteint une valeur de 145 HV pour un courant de 300 mA tandis que dans le second cas, elle se stabilise à une valeur de 133HV à partir d'un courant de 200mA. On peut relier ces effets à l'augmentation du taux de débris d'oxyde d'aluminium très stable dans les traces.

4.2.4 Coefficient de friction

De la même façon que pour les contacts sans courant, le coefficient de friction a été mesuré pour chaque amplitude du mouvement et aux différentes valeurs d'intensité électrique. Les figures 57 à 61 montrent les variations du CDF.

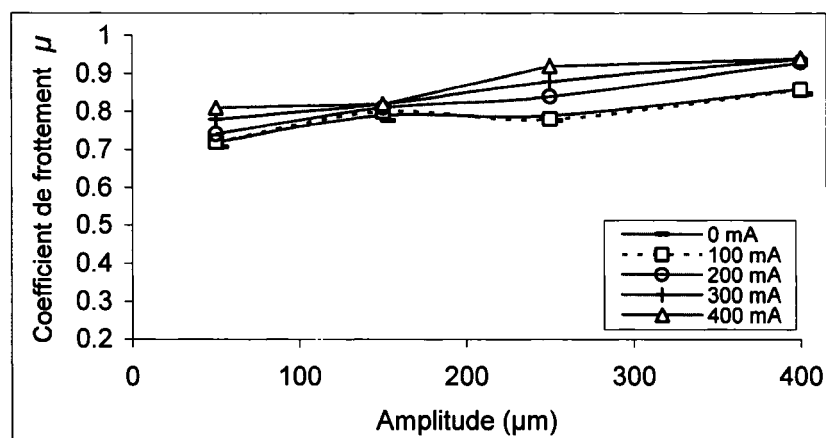


Figure 57 Coefficient de friction vs amplitude pour différentes intensités de courant électrique: couple Cu- 6061T6

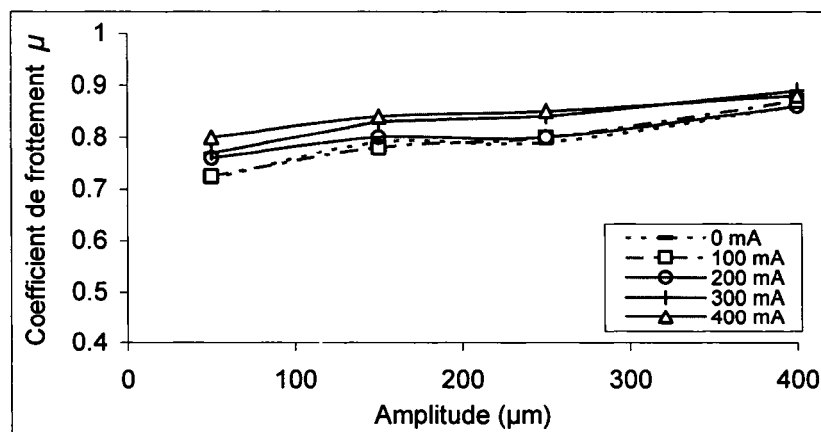


Figure 58 Coefficient de friction vs amplitude pour différentes intensités de courant électrique : couple AISI 52100-6061T6

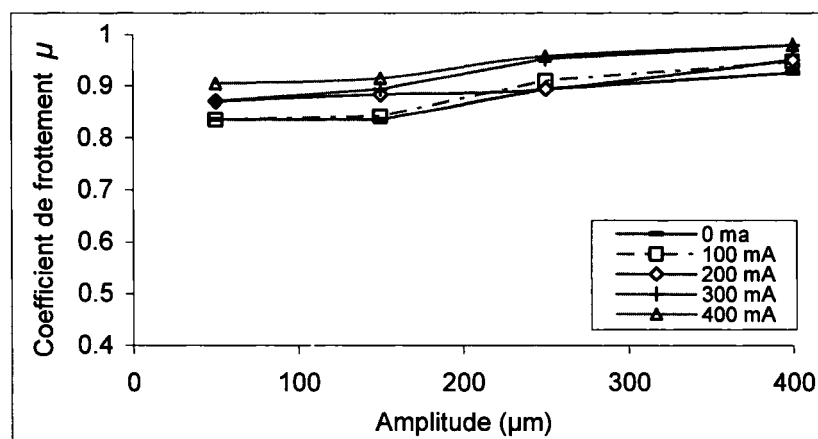


Figure 59 Coefficient de friction vs amplitude pour différentes intensités de courant électrique : couple Cu-Cu

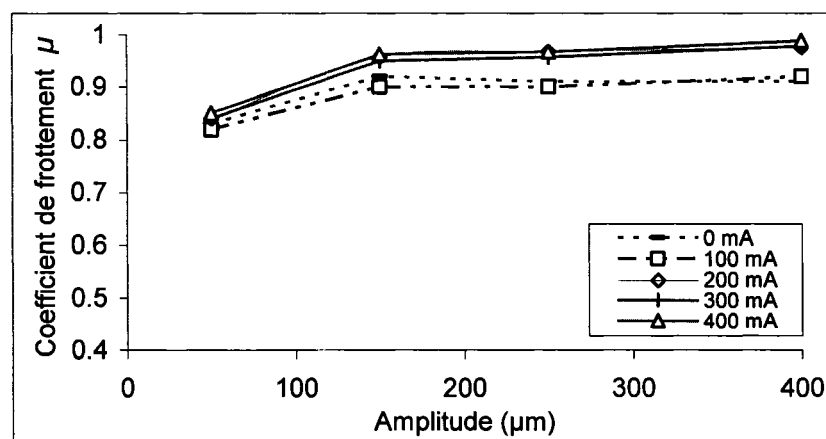


Figure 60 Coefficient de friction vs amplitude pour différentes intensités de courant électrique: couple 6061T6-Cu

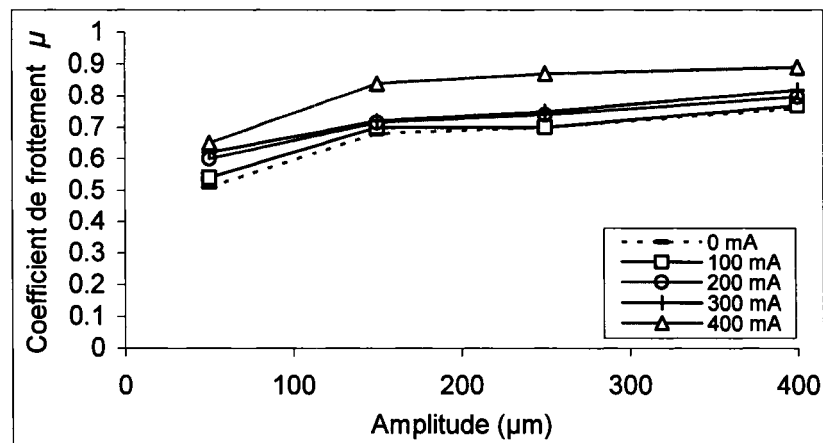


Figure 61 Coefficient de friction vs amplitude pour différentes intensités de courant électrique: couple AISI 52100- 316L

Le courant et l'amplitude du mouvement ont une action complémentaire mais faible sur l'évolution du coefficient de frottement. Il est possible de constater que l'amplitude du mouvement et l'intensité du courant font augmenter le coefficient de friction. Cette tendance se dégage pour l'ensemble des couples étudiés.

Il semble que le courant électrique exerce plus d'effet sur le contact AISI 52100-316L. Or, on enregistre des valeurs de coefficient de friction plus écartées entre 0 et 400mA pour toutes les amplitudes. Cet effet peut être dû à la grande résistivité électrique de ces deux matériaux en acier ainsi qu'à leur faible conductivité thermique. On rappelle que les deux matériaux, AISI 52100 et 316L, ont comme propriété de résistivité électrique les valeurs de 21.99 et $74(\text{ohm-cm}) \cdot 10^{-6}$ et de conductivité thermiques les valeurs de 46.6 et 16.3 (W/m-K) respectivement.

On constate donc que le fait d'introduire un matériau à faible résistivité électrique et à haute conductivité thermique contribue à diminuer le degré d'écart d'interaction en frottement avec l'augmentation de l'intensité du courant électrique.

4.2.5 Résistance à la dégradation des couples

Les figures 62, 63, 64 illustrent la différence de dégradation quantifiée pour les différents couples respectivement au niveau du fretting ($50\mu\text{m}$), méso-fretting ($150\mu\text{m}$) et frottement à basse amplitude ($400\mu\text{m}$). Cette disposition n'est en fait qu'une reprise des résultats recueillis d'essais réalisés sans et avec un courant électrique de 400mA .

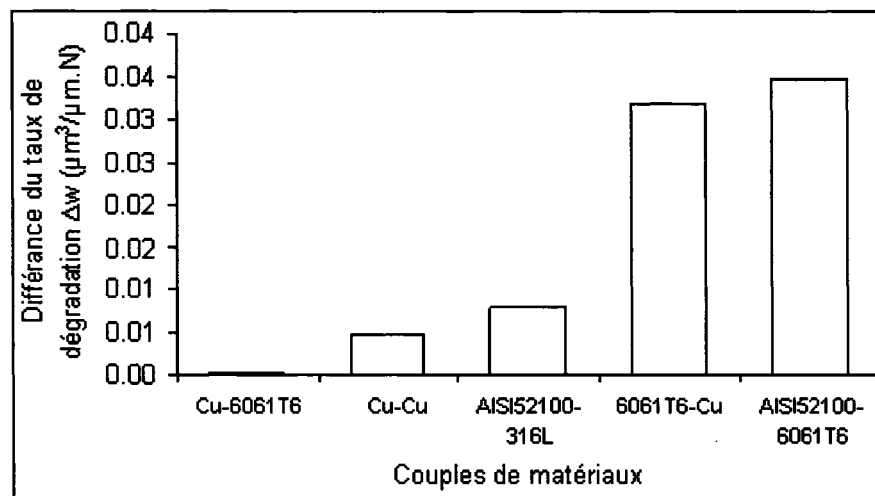


Figure 62 Évolution du taux de dégradation en fretting des couples pour essais sans et avec courant de 400mA - $50\mu\text{m}$

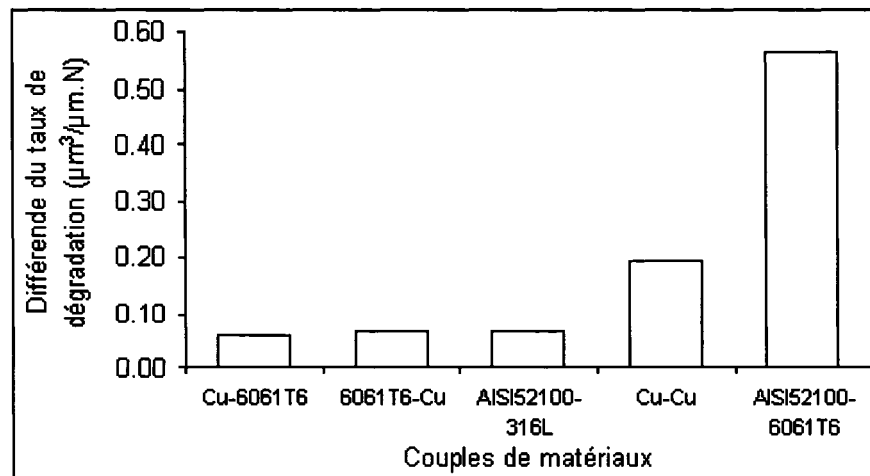


Figure 63 Évolution du taux de dégradation en méso-fretting des couples pour essais sans et avec courant de 400mA - $150\mu\text{m}$

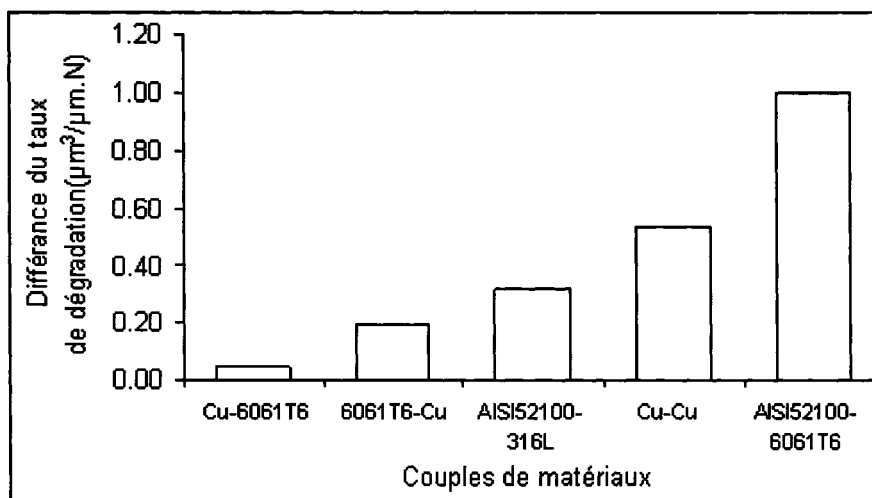


Figure 64 Évolution du taux de dégradation en frottement à basse amplitude : essais sans et avec courant de 400mA - 400µm

L'effet relatif du courant est proportionnel à l'amplitude du frottement. La différence en quantité de matière perdue due à l'augmentation de l'intensité du courant électrique est augmentée en moyenne par un facteur de 10 fois entre le fretting et le méso-fretting et de 100 fois entre le méso-fretting et le frottement à basse amplitude.

Les contacts Cu-6061T6, 6061T6-Cu et AISI 52100-316L présentent des écarts d'usure de même ordre de grandeur entre 0 et 400mA dans le stade du méso-fretting, stade où le couple Cu-Cu s'avère être d'une résistance faible. Par ailleurs, on note que la résistance à l'usure de ce dernier est bonne pour de grandes amplitudes.

Le courant accentue l'usure de façon sensiblement dépendante de l'amplitude dans le cas du 6061T6-Cu et AISI 52100-6061T6. Si l'on excepte le cas du AISI 52100-316L, on conçoit que le rapport de dureté dans ces deux derniers exemples ainsi que l'évolution du frottement vers des amplitudes supérieures contribuent conjointement à l'aggravation de l'usure avec l'effet électrique.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

Pour la commodité de la lecture, la discussion sera séparée en deux parties distincte, avec et sans courant électrique. Nous nous proposons de construire un modèle phénoménologique qui doit inclure les paramètres expérimentaux variables (amplitude de déplacement et courant électrique). Rappelons que la charge a été maintenue constante (72gf) et l'atmosphère a toujours été celle du laboratoire (21-23°C, 50-60 % RH).

La description choisie se veut générale, donc s'appliquer à tous les résultats obtenus. Ce paragraphe désire donc expliquer les raisons qui ont guidé le choix de la description phénoménologique ainsi que ses avantages et inconvénients.

5.1 Fretting sans courant électrique

5.1.1 Représentation généralisée du comportement à l'usure

La figure 65 reproduit l'ensemble des résultats qui seront détaillés plus loin. Cette figure permet de mettre en évidence le large spectre des niveaux de dégradation dans le stade du méso-fretting. Certains couples prennent des allures très rapprochées les unes des autres tandis que d'autres présentent des écarts significatifs. On peut commenter ces différentes tendances par la nature des matériaux mis en jeu et de l'interface de contact.

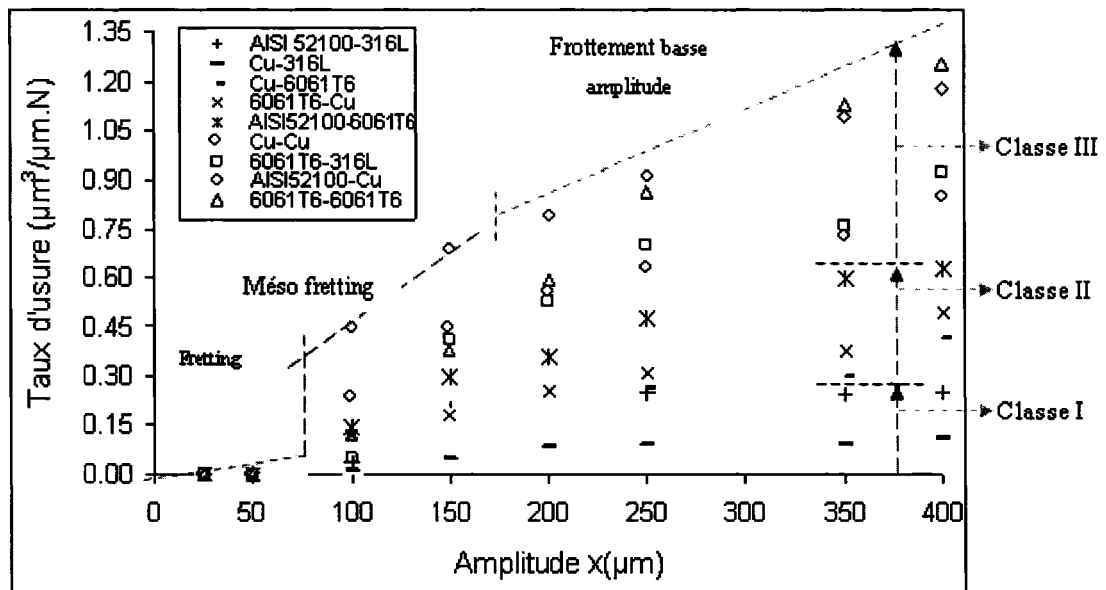


Figure 65 Taux d'usure des couples rapporté à l'amplitude de glissement

5.1.2 Description macroscopique

À partir de ces résultats une classification générale du comportement à l'usure peut être schématisée selon la figure ci-dessous (figure 66). Cette dernière est élaborée à partir de l'ensemble des résultats d'usures obtenus comme illustré dans la figure précédente.

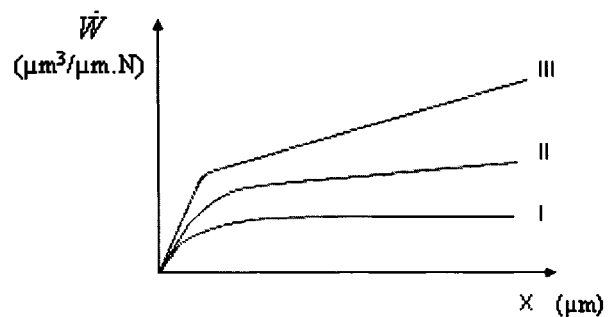


Figure 66 Tendence à l'usure des couples

Selon un ordre croissant de dégradation, on convient de distinguer trois classes de comportement nommées I, II et III. La classe I regroupe les contacts à faible taux d'usure tels que les cas du Cu-316L et AISI 52100-316L. La classe II se rapporte aux couples à niveau d'usure intermédiaire : Cu-6061T6, 6061T6-Cu et AISI 52100-6061T6. Les contacts à haute usure, notés III, regroupent les couples suivants : Cu-Cu, 6061T6-6061T6, 6061T6-316L, AISI 52100-Cu.

Cette classification correspond à des mécanismes de dégradation différents dont les tendances dans le stade d'usure à grande amplitude peuvent être décrites par les trois lois suivantes :

- Classe I : il y a formation d'une couche de tribo-surface stable. Un équilibre est atteint et l'usure est constante :

$$\dot{W} = a \quad (5.1)$$

- Classe II : le taux d'usure est faiblement proportionnel à l'amplitude de déplacement

$$\dot{W} = a.x + b \quad (5.2)$$

où a est un facteur qui marque l'efficacité de l'usure.

- Classe III : aucun équilibre n'est atteint, l'usure croît régulièrement avec l'amplitude

$$\dot{W} = a.x^n \quad (5.3)$$

Avec n , un facteur caractéristique des matériaux du couple. Ces trois lois correspondent à des mécanismes différents de dégradation qui seront détaillés plus loin.

5.1.3 Établissement d'un modèle mathématique

Les résultats des études menées sur le fretting s'accordent sur l'établissement d'un schéma concernant les étapes de l'endommagement en fonction de l'amplitude de vibration (figure67).

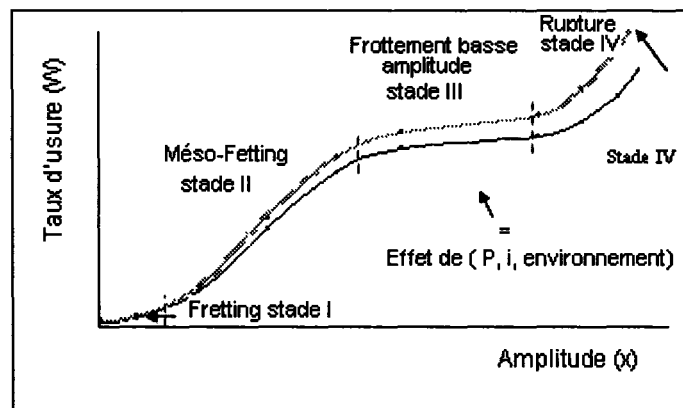


Figure 67 Cycles d'endommagement des contacts vs amplitude du mouvement

Les effets de la charge, du courant électrique ou de l'environnement sont indiqués sur le schéma. Les essais ont porté sur les 3 premiers stades. Une description qui explique l'ensemble des résultats que nous avons obtenus a été établie.

La formulation du modèle mathématique désire essentiellement décrire le méso-fretting. Pour ce faire, on se borne donc à la limite de $350\mu\text{m}$. En première approximation, on constate que l'ensemble des résultats du taux d'usure (figures 21, 22, 23), englobés dans la figure 65, présente une courbe comparable à la courbe de la fonction tangente hyperbolique $y = \tanh(x)$ présentée dans la figure 68.

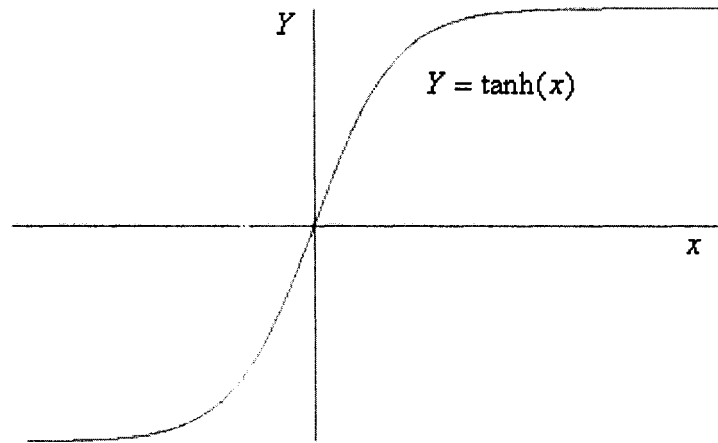


Figure 68 Tracé de la fonction $Y = \tanh(x)$

5.1.3.1 Changement de variables

On se propose de formuler le taux d'usure avec le changement de variable suivant:

$$Y = \frac{\dot{W} - \dot{W}_{Min}}{\dot{W}_{Max} - \dot{W}_{Min}} \quad (5.4)$$

avec \dot{W}_{Min} et \dot{W}_{Max} les indices du taux d'usure produite respectivement aux amplitudes de mouvement de 25 et 350 μ m. Ceci donne lieu à des valeurs Y adimensionnelles comprises entre 0 et 1.

$$0 \leq Y \leq 1 \quad (5.5)$$

Par analogie à l'allure des résultats d'usure obtenus, on se propose d'introduire deux constantes a et x_0 à la fonction $Y = \tanh(x)$ avec a une constante qui dépend du couple et x_0 la valeur d'amplitude pour laquelle $Y = 1/2$. L'équation de base $Y = \tanh(x)$ devient sous la forme :

$$Y = \frac{1}{2}[1 + \tanh(a.(x - x_0))] \quad (5.6)$$

La simulation des résultats d'usure avec le logiciel numérique Origin 6.1 permet d'obtenir les constantes a et x_0 . Les formulations du modèle pour l'ensemble des couples sont indiquées sur le tableau VII.

Tableau VII

Formulation mathématique de l'usure des couples

Bille	Plaque 316L	Plaque 6061T6	Plaque Cu
AISI 52100	$1/2(1 + \tanh(0.034(x - 125)))$ $R^2= 0.99$	$1/2(1 + \tanh(0.01(x - 165)))$ $R^2= 0.97$	$1/2(1 + \tanh(0.01(x - 140)))$ $R^2= 0.94$
6061T6	$1/2(1 + \tanh(0.014(x - 155)))$ $R^2= 0.97$	$1/2(1 + \tanh(0.01(x - 195)))$ $R^2= 0.99$	$1/2(1 + \tanh(0.013(x - 130)))$ $R^2= 0.96$
Cu	$1/2(1 + \tanh(0.02(x - 140)))$ $R^2= 0.99$	$1/2(1 + \tanh(0.01(x - 160)))$ $R^2= 0.97$	$1/2(1 + \tanh(0.012(x - 140)))$ $R^2= 0.97$

où R^2 est un coefficient de détermination

5.1.3.2 Représentation des données : taux d'usure expérimentale et taux d'usure du modèle mathématique

Dans ce qui suit, on compare les résultats expérimentaux du taux d'usure à ceux calculés par la fonction du modèle mathématique développée, $Y = \frac{1}{2}[1 + \tanh(a.(x - x_0))]$, pour l'ensemble des couples étudiés. Ces deux types de valeurs sont respectivement désignées par $Y_{Expérimental}$ et $Y_{Modèle}$ pour chaque cas de couple dans les figures 69 à 77.

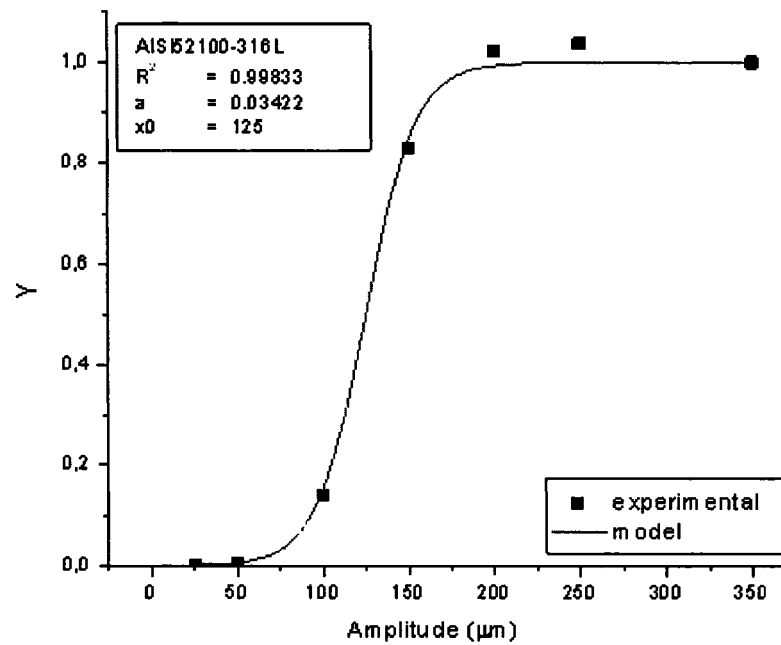


Figure 69 Taux d'usure vs amplitude : AISI 52100-316L

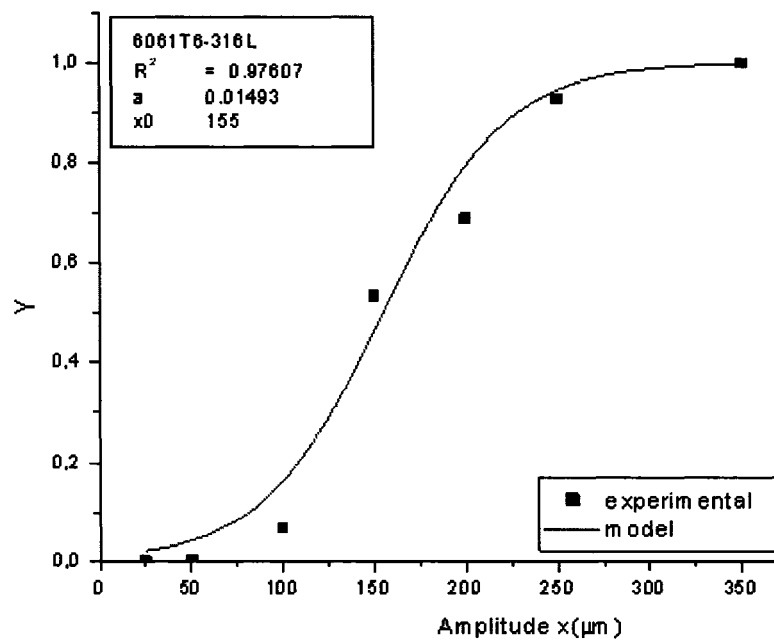


Figure 70 Taux d'usure vs amplitude : 6061T6-316L

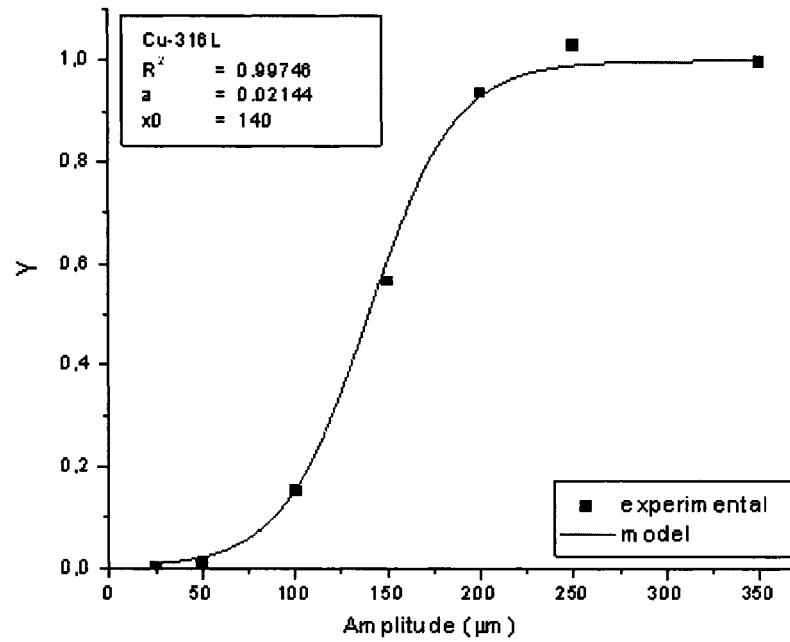


Figure 71 Taux d'usure vs amplitude : Cu-316L

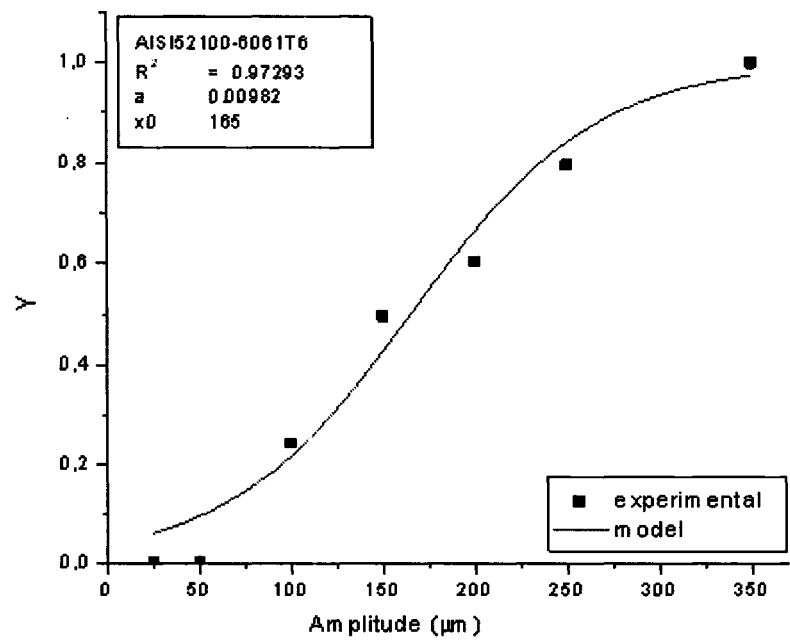


Figure 72 Taux d'usure vs amplitude : AISI 52100-6061T6

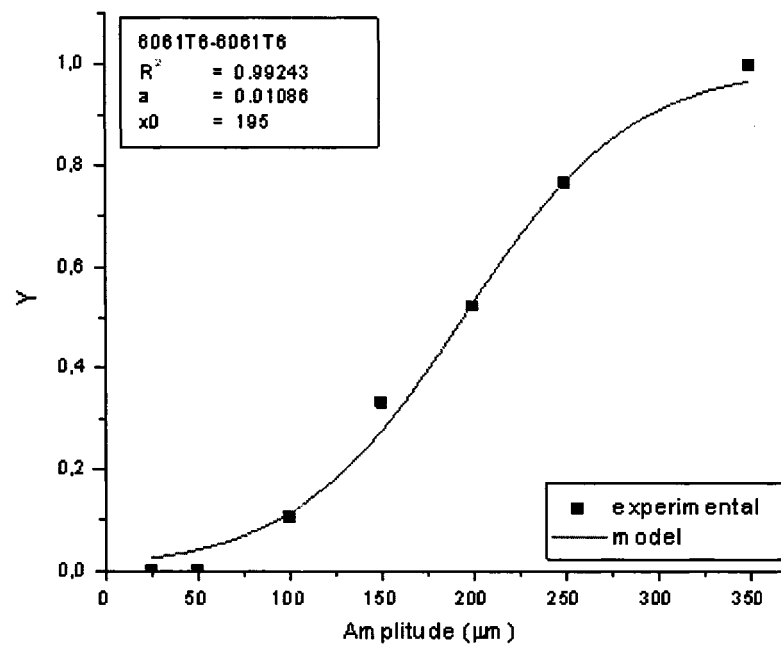


Figure 73 Taux d'usure vs amplitude : 6061T6-6061T6

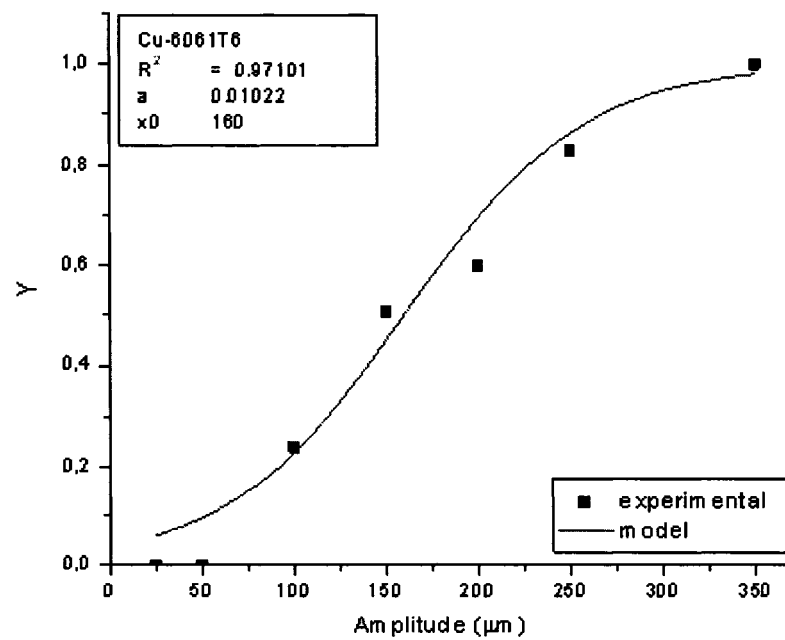


Figure 74 Taux d'usure vs amplitude : Cu-6061T6

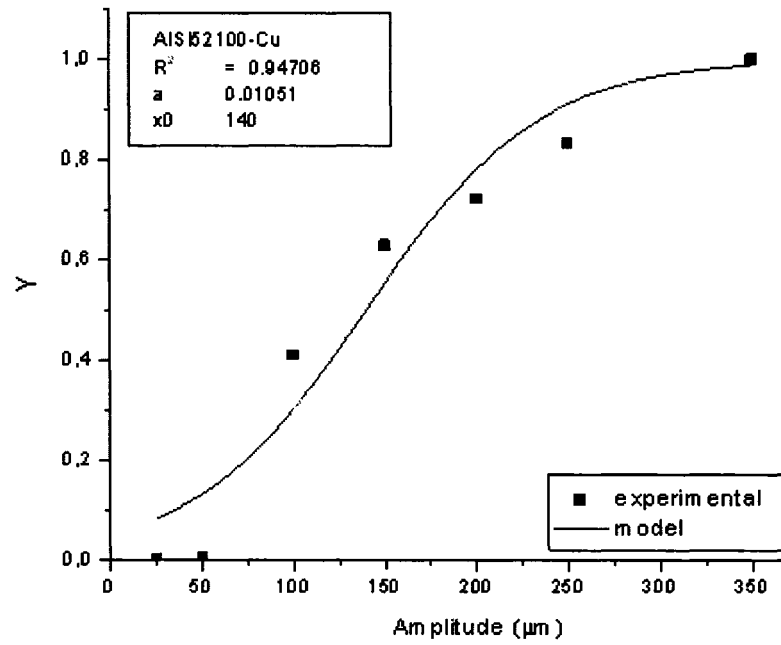


Figure 75 Taux d'usure vs amplitude : AISI 52100-Cu

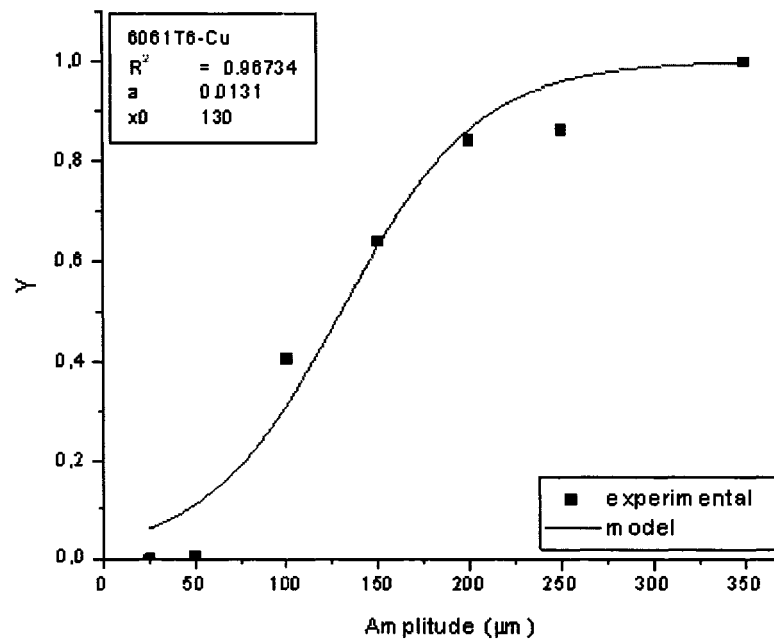


Figure 76 Taux d'usure vs amplitude : 6061T6-Cu

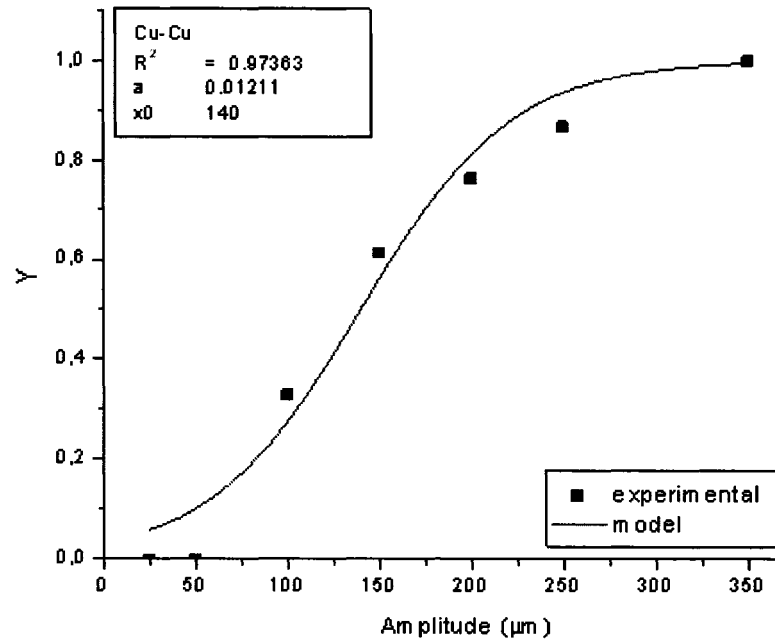


Figure 77 Taux d'usure vs amplitude : Cu-Cu

5.1.4 Facteurs influents

5.1.4.1 Contacts à faible usure : classe I

La chimie de surface, la dureté relative et l'aptitude à l'érouissage des matériaux permettent d'expliquer le comportement de cette classe de couples. Les couples à faible usure (classe I), Cu-316L et AISI 52100-316L présentent une bonne stabilité pour la résistance à l'usure. Notons que le couple acier-acier "AISI 52100-316L" s'use un peu plus rapidement que le couple cuivre-acier "Cu-316L" avec un rapport de 2.5 à 3. Dans le dernier cas, c'est la bille molle qui s'use plutôt que la plaque relativement dure et inversement pour le premier où l'usure porte principalement sur la plaque. Ceci permet d'avancer l'hypothèse selon laquelle l'usure est principalement fonction de la nature métallurgique des matériaux formant le couple et non du rapport des duretés relatives.

Le rapport de dureté relative (835 HV / 135 HV) est important dans le couple AISI 52100-316L. La valeur de ce critère donne une estimation grossière de la différence dans la résistance à la déformation plastique entre les deux matériaux (Vingsbo, Odfalk, & Shen, 1990). Les débris d'usure de la plaque forment de fines particules d'oxydes stables de type Cr_2O_3 et Fe_2O_3 (Gagnon, 2005). Cette couche forme un lubrifiant solide.

Du point de vue de la tribo-couche, le 316L est un métal intéressant dans les contacts à faible charge : il consolide facilement et les débris d'usure forment des oxydes de Cr et de Ni qui participent à la formation de la tribo-couche qui protège la surface de la plaque. La trace sur la figure 78 montre les débris d'oxydes transférés aux abords de la trace du fretting pour une amplitude de $400\mu\text{m}$. On y distingue 4 zones différentes de dommage : la zone I, centrale dite de Hertz, la zone II de compaction de particules, la zone III constitue le bord du contact et IV la zone d'évacuation des particules hors du contact. La répartition de ces différentes zones en fonction de l'évolution de la contrainte est représentée par la figure 79.

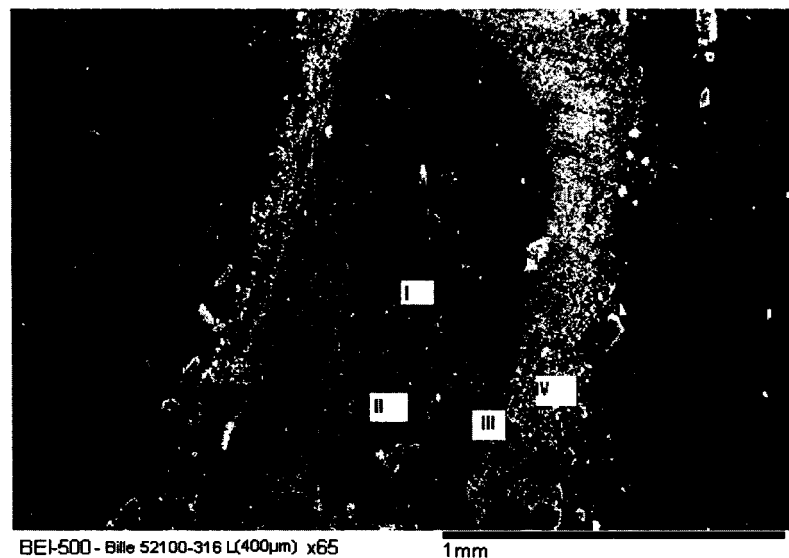


Figure 78 Débris d'oxydes évacués à la périphérie du contact

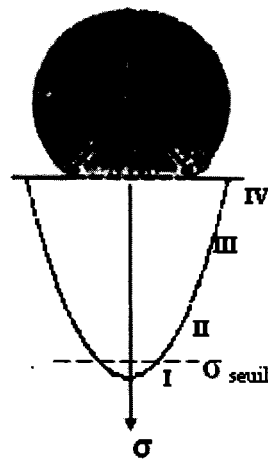


Figure 79 Répartition des zones de débris d'usure

Les grands débris sont formés dans la zone I où les contraintes sont plus élevées dans cette zone et le cisaillement est le plus fort. C'est dans cette zone centrale que s'élabore le dommage. On peut noter que cette zone est foncée en microscope électronique ce qui indique qu'elle est formée de métaux peu oxydés. Dans la zone suivante II, la surface est formée par de fines particules agglomérées et oxydées. Cette couche résiste bien à l'effort de traction et donc protège en grande partie les matériaux de la zone I. Les fines particules de la zone IV proviennent de la zone II.

Le dommage est donc le résultat entre deux mécanismes indépendants :

- la délamination de la zone I et donc formation de micro-coupeaux;
- la formation par agglomération de fines particules oxydées d'une couche de surface dans la zone II. Cette couche se dégrade par éjection, généralement, de petits débris qui constituent les zones III et IV.

L'élimination de l'un de ces deux mécanismes augmente la résistance du couple. L'analyse de la morphologie des traces d'usure dans ces zones donnera plus d'informations sur les mécanismes de destruction du couple (voir paragraphe 5.1.5 : étude morphologique des traces d'usure).

Le cuivre possède une faible solubilité dans l'acier 316L. Le tableau VIII renseigne sur la solubilité limite de cet élément avec ceux du 316L. Bien que la solubilité de chaque élément ne soit pas une bonne indication de la solubilité dans l'alliage, elle peut donner une bonne indication.

Tableau VIII Limite de solubilité chimique du cuivre dans la composition du 316L
(ASM Handbooks, volume 3, Alloy Phase Diagrams)

Constituants des billes	Limite de solubilité (%) dans la plaque Plaque 316L (18%Cr, 12%Ni)		
	Fe	Cr	Ni
Bille Cu	2.2 (Fe α), 4.1% Fe dans Cu	insoluble	100

La faible dureté du cuivre fait que la bille se comporte comme un matériau abradable en contact avec la plaque dure du 316L. Il n'a pas été constaté d'adhésion sur la surface de la plaque, la tribo-couche assure une protection efficace. Par ailleurs, la bille de cuivre s'écroute sous l'action de la déformation plastique engendrée par le frottement. Le contact se produit donc entre une bille de cuivre dur et peu soluble dans la plaque surtout à température ambiante. La figure 80 montre la formation de débris d'usure d'oxyde de cuivre déposés sur la plaque.

À grande amplitude de mouvement, les débris d'usures consistent en des petites particules oxydées CuO et CuO₂ souvent compactées et formées sur la plaque. Ils forment, après agglomération et compaction, une tribo-couche qui protège le contact. Ce cas de frottement a déjà fait l'objet d'étude (Bouchoucha et al., 1997) où l'usure dans le contact Cu-316L est identifiée par le "mode oxydation".

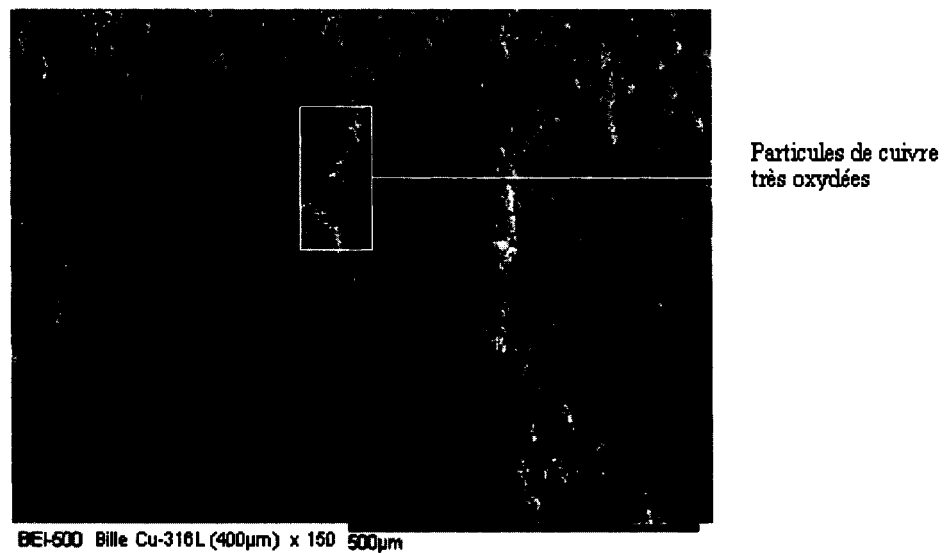


Figure 80 Débris oxydés de la bille en cuivre sur la plaque 316L (400µm)

5.1.4.2 Contacts à usure intermédiaire: classe II

Intéressons-nous du point de vue chimique aux contacts du cuivre avec l'aluminium 6061T6 qui possèdent un niveau d'usure II. Les deux matériaux sont partiellement solubles. La solubilité limite en poids du cuivre dans l'aluminium et de l'aluminium dans le cuivre étant de 5.65 % et 9.4% respectivement.

L'analyse par microscopie optique d'une trace d'usure sur la plaque d'aluminium dans le couple Cu-6061T6 permet d'identifier le mécanisme de destruction dans ce type de matériaux (figure 81). Le faciès d'usure souligne la présence d'une couche de transfert en zone claire avec la présence d'une zone contrastée en noir révélatrice d'un contact métal-métal. De même, on remarque la production d'une grande partie de débris d'usure oxydés éjectés du contact et répartis en forme d'anneau. L'analyse morphologique de cette zone périphérique montre de fines particules oxydées avec la présence de micro-coupeau détachés de la couche de transfert (photo à droite).

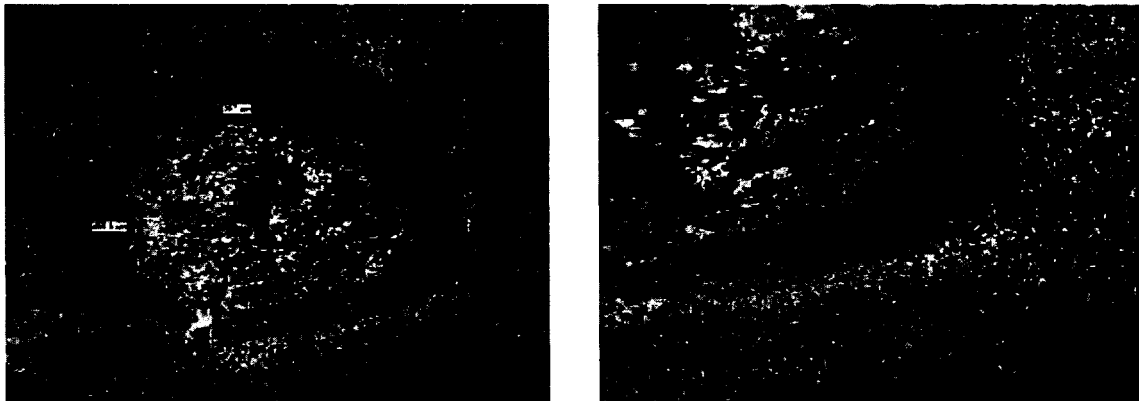


Figure 81 Micrographie optique (x100) des traces d'usure du couple Cu-6061T6, testé à 150 μ m.

Le mécanisme de dégradation dans cette zone II est donc bien illustré par le couple Cu-6061T6. Le cuivre est transféré sur la plaque. Une couche microalliée est formée, donc zone métallique (Cu) et de microalliage (Cu + oxydes). De fines particules de cuivre sont éjectées pour former la zone IV. Pour améliorer le contact, il faut donc s'orienter vers les mécanismes qui augmentent la stabilité de la tribo-couche.

Le taux d'usure produit dans le couple AISI 52100-6061T6 s'explique par la dégradation simultanée de la plaque et de la bille. Le rapport de la dureté relative (HR=6.6) sur l'usure se révèle aussi important dans ce couple.

Une précédente étude (Elleuch & Fouvry, 2002), portant sur un contact bille en AISI 52100 avec plaque en alliage d'aluminium A357 (0.6% Mg, 7% Si, bal Al) démontre que l'usure mesurée sur la bille est beaucoup plus grande que sur le corps antagoniste A357. Ainsi, l'acier s'use par l'action abrasive du troisième corps adhérent mécaniquement sur la surface "molle" de l'aluminium. Cette couche est composée d'un oxyde complexe de fer, de chrome et d'aluminium. L'analyse des surfaces a démontré que la composition chimique de la surface de fretting de l'acier AISI 52100 correspond à sa composition initiale (Elleuch & Fouvry, 2005). Il y a eu donc un transfert de l'aluminium sur l'acier AISI 52100 suivi par un contre transfert vers l'alliage d'aluminium.

5.1.4.3 Contacts à haute usure : classe III

La transition de systèmes à miscibilité partielle, "Cu-6061T6 et 6061T6-Cu", aux systèmes à miscibilité totale "6061T6-6061T6" et Cu-Cu" s'accompagne d'une augmentation du taux d'usure du niveau intermédiaire II au niveau III plus élevée. On retiendra l'effet de la déformation plastique qui intervient surtout pour ces matériaux généralement mous. À ce sujet, (Gagnon, 2005) souligne la formation d'un oxyde qui ne protège pas la surface dans le système Al-Cu. Pour Davies (Lipson & Colwell, 1961), minimiser l'usure revient à opter pour des métaux qui doivent être insolubles.

Le couple AISI 52100-Cu n'admet pas de saturation de l'usure. Il est marqué par un rapport de dureté important "825 / 110" et présente ainsi un niveau d'usure comparable à celui du le 6061T6-6061T6 (voir figure récapitulative 64, p78). Dans le contact AISI 52100-Cu, la plaque molle de cuivre est usée par déformation plastique et labourage sous l'action de la bille très dure. Dans ce mode d'usure "abrasif", le rapport de dureté est considéré comme un facteur important qui régit l'usure supposée être proportionnelle au rapport P/H comme indiqué par la loi d'Archard où P est la charge et H la dureté du corps le plus mou. Dans ce type de ce contact de corps "dur-mou", il faut retenir que la plaque molle épouse exactement la forme de la bille, des micro coupeaux longs se produisent et entraînent un taux d'usure élevé. En plus, on note l'absence de couche de transfert sur la plaque mais que la bille en acier se revêt du cuivre durci sous l'effet de la déformation. Le contact redevient sous forme Cu-Cu avant que la matière transférée se redépose sur la plaque.

Le couple 6061T6-316L se compose de matériaux de dureté proche. L'aluminium est soluble dans le fer α jusqu'à 28%. Le mécanisme de destruction consiste en l'adhésion avec un transfert de l'aluminium sur la plaque de l'acier. L'étude des traces de destruction apportera plus de détails sur le mode de destruction dans ce couple (voir paragraphe 5.1.5).

5.1.5 Étude morphologique des traces de fretting

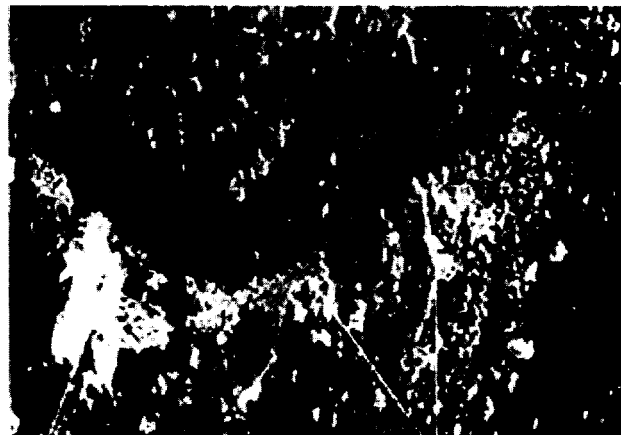
L'étude des traces d'usure permet de préciser le mécanisme du frottement incluant le fretting. Les photos prises par microscopie à balayage électronique illustrent les mécanismes de dégradation des surfaces.

5.1.5.1 Cas de AISI 52100-316L : matériau dur- matériau mou

La bille déforme plastiquement la plaque. Sous l'effet des contraintes tangentielles, des particules du matériau mou s'arrachent de la surface de la plaque et s'oxydent dans le cas des particules fines. La bille écroute le matériau mou et favorise l'incorporation de particules dans la surface molle. Il va donc se produire la formation d'une couche de surface par micro alliage mécanique constituée d'une matrice molle et de micro particules oxydées. Lorsque la contrainte tangentielle dépasse la résistance mécanique de la couche alliée, des micros copeaux vont se détacher avec la production de petits débris. Une agglomération de débris va se produire sur la surface, surtout à la périphérie de la trace de contact.

L'examen par microscopie à balayage révèle des traits spécifiques du fretting du couple AISI 52100-316L (figures 82 à 84). Ces figures représenteront des détails sur les différentes zones déjà notées I, II, III, IV sur la figure 78 (réf : titre 5.1.4.1, p 87).

Sur la photo de la figure 82, on distingue une région de débris fortement compactés (zone II). La partie frontale de la zone déformée présente une structure différente (zone III). L'analyse des bords de la trace (zone IV) met en évidence des particules de matériau oxydées et surtout des amas de particules agglomérées.



Amas de métal oxydé

Particules compactées

Figure 82 Particules de métal oxydes compactées au front du contact : couple AISI 52100-316L (x150)

La figure 83 montre nettement le centre de la piste du mouvement de fretting et le bord sur lequel les débris expulsés du contact sont accumulés. Des particules agglomérées de l'oxyde incrusté dans la zone de contact y sont également observables. La zone centrale semble avoir peu de débris ; en effet, ils ont tous été expulsés sur les cotés surtout dans la zone IV. Les particules blanchâtres, c'est à dire oxydées, sont encore très présentes surtout dans la zone IV.

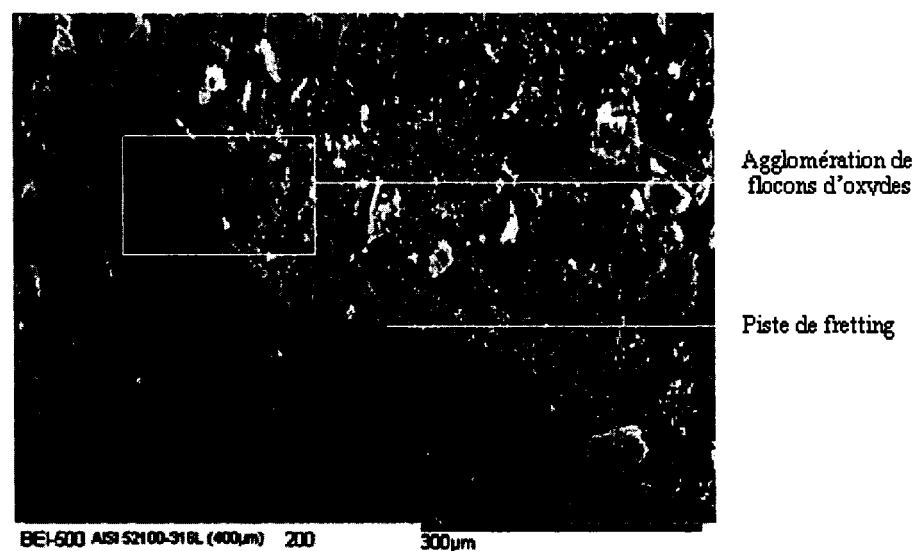


Figure 83 Piste de la trace et production de micro alliage mécanique : couple AISI 52100-316L

En grossissant davantage la zone du micro alliage encadrée dans la figure 83 (zone II), on obtient une vision plus précise de sa morphologie (figure 84). La présence d'un micro alliage mécanique sur la plaque est observable. Ces couches de micro alliage sont formées d'îlots de particules d'oxydes métalliques oxydées et plus ou moins adhérents à la surface.



Figure 84 Îlots de micro alliage produit sur la trace d'usure : couple AISI 52100-316L (zone II)

La dimension relative des zones I et II permet de préciser le mécanisme. La zone I est grande ce qui suggère que la bille dure s'est enfoncée dans la plaque. Lors du mouvement, de fines particules de 316L sont formées en grande quantité. Ces particules micrométriques sont éjectées de la zone de contact (la bille est dure), s'oxydent et forment les zones III et IV.

5.1.5.2 Cas de 6061T6-316L : matériaux de dureté proche

À faibles débattements du mouvement, de fins débris en cours d'oxydation et un transfert de particules d'aluminium sont produits sur la plaque. L'aluminium se dépose au centre du contact entouré d'une fine poudre d'hydroxyde d'aluminium agglomérée.

La figure 85 montre les traces d'adhésion d'aluminium au centre du contact pour une amplitude de $400\mu\text{m}$. Elle montre aussi l'agglomération de fines particules très peu oxydées (zone I, II) et de particules oxydées dispersées, zone IV.

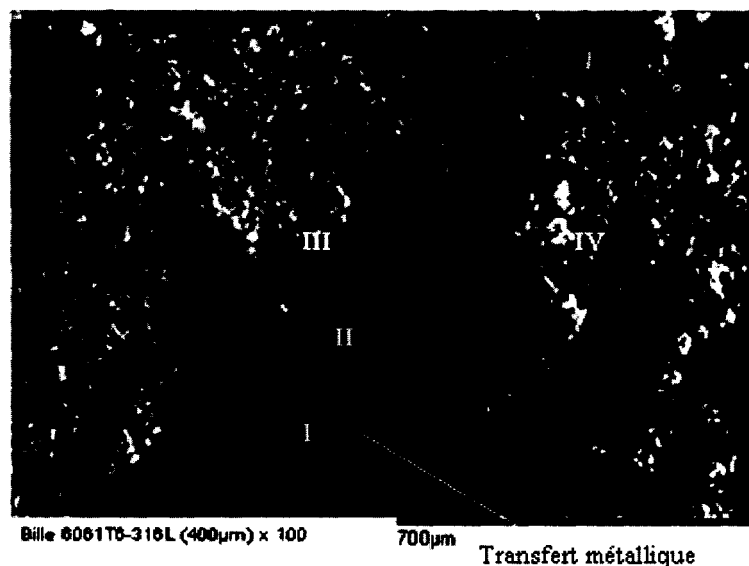


Figure 85 Transfert et adhésion de particules d'aluminium sur l'acier 316L

Les micro-coupeaux de débris dans la zone IV sont formés par l'agglomération de fines particules d'oxydes d'aluminium (figure 86).



Figure 86 Agglomération de particules d'oxyde d'aluminium (zone IV)

Le micro-alliage mécanique est probablement responsable de la formation de ces débris. La formation de ces longs débris peut être schématisée par les mécanismes ci-dessous (figure 87) :

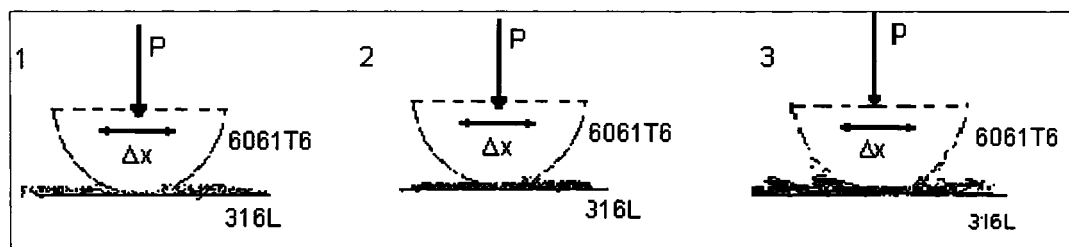


Figure 87 Mécanismes d'usure dans le contact 6061T6-316L

Ces différents stades correspondent à :

- 1- la formation de fines particules ($1\mu\text{m}$ ou moins) d'alliage d'aluminium qui se dépose sur la surface de la plaque.
- 2- la formation par micro alliage mécanique d'une couche $\text{Al-Al}_2\text{O}_3$ ou d'hydroxyde d'aluminium. Cette couche adhère faiblement sur la surface de la plaque.
- 3- la délamination de cette couche et formation de micro-coupeaux qui sont éjectés du frottement.

Cette description met en évidence une caractéristique importante des matériaux de la classe III. Il y a formation continue de micro-coupeaux qui vont être évacués hors de la zone de frottement. Dans le cas du présent couple 6061T6-316L, c'est la faible résistance de la couche de transfert qui explique la faible résistance du contact.

5.1.6 Schématisation de l'usure en méso-fretting

Le schéma ci-après est élaboré de façon à illustrer les zones de dégradation dans les différentes situations d'usure des couples (figure 88).

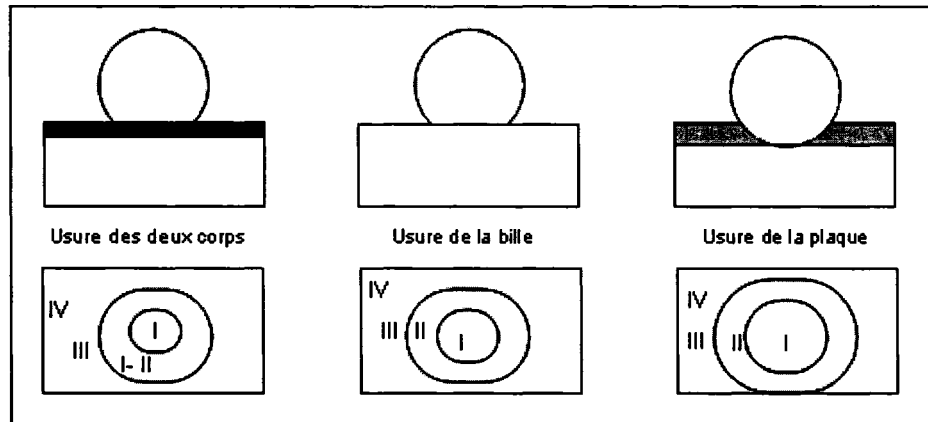


Figure 88 Zones de dégradation et propriétés et Propriétés mécaniques des couples

Les différentes zones de dégradation sont désignées comme suit :

- Zone I : production de débris ou zone d'élaboration;
- Zone II : agglomération et / ou formation de micro alliage;
- Zone III : agglomération sur les bords;
- Zone IV : éjection de fines particules ou de micro-coupeaux.

On conclut que la zone I est importante (donc observable) quand la plaque est soumise à l'action abrasive d'une bille très dure alors qu'elle devient petite en présence d'une bille molle / plaque dure. Dans les couples à dureté proche (cas N°3), les débris d'usure se forment et s'agglomèrent en même temps dans la même zone centrale du contact.

L'usure à faible débattement est donc le résultat de deux familles de conditions :

I- Mécanique :

1- le rapport de duretés fait partie de cette catégorie. On a proposé une relation générale :

$$\dot{W}_p = H_R \cdot \dot{W}_b + (1 - H_R) \cdot \dot{W}_p \quad (5.7)$$

2- la forme des contraintes dans la plaque (théorie de Hertz). Quatre zones sont identifiées :

- zone I : la zone centrale où les contraintes sont élevées;
- zone II : la zone adjacente où se produit l'élaboration d'une couche de surface.
- zones III et IV : zones extérieures qui recueillent les débris.

II- Métallurgique :

- 1- la résistance de la couche de surface;
 - 2- la formation de couches micro alliées;
 - 3- la compatibilité métallurgique; possible dissolution;
 - 4- la capacité de la couche micro alliée ou de la couche de transfert de résister à la délamination et à la formation de fines particules.
- Les phénomènes de délamination et de production de fines particules sont indépendants.

5.1.7 Discussion

Des résultats d'autres laboratoires permettent d'illustrer cette synthèse. En effet, (Podgornik, Kalin, Vizintin, & Vodopivec, 2001) ont mis en évidence l'élévation de la température dans un contact AISI 52100-AISI 52100. Ils montrent, ce qui est surprenant, qu'il y a une précipitation de fins carbures qui se sont formés à partir de l'austénite, donc d'une dissolution au delà de 1000°C. Ce résultat souligne l'importance de la température dans la dégradation. En étudiant l'effet de la température dans la dégradation, (Malucci, 1996) montre en particulier que les oxydes produits peuvent être incorporés dans la surface en formant une couche différente du métal de base. Cette remarque conduit à proposer des alliages courants.

(Waterhouse, 1992) met en évidence l'existence de trois stades : fretting, méso-fretting et frottement pour plusieurs matériaux. Pour de faibles amplitudes, les débris restent emprisonnés dans le contact tel que l'usure est localisée sur la surface. Il rappelle, ce qui est parfois oublié, que dans le cas de faibles amplitudes, les débris ne sont pas exposés au contact de l'air et le plus souvent ils forment une couche compactée. Il explique l'influence de la fréquence en se servant du film d'oxyde formé. Il conclut que dans les situations de glissement partiel essentiellement, le méso-fretting, la fréquence a une faible influence. Si la fréquence est suffisamment haute, il y a génération de température et donc un accroissement de la production de débris.

(Ohmae & Tsukizoe, 1974) montrent le rapport relatif des trois stades: le fretting, le méso-fretting et le frottement (figure 89). Cette transition, dans le cas du contact Fe-AISI 1025, a été largement corroborée par nos résultats. Ils montrent que le volume d'usure ne devient constant qu'après une période de rodage. Dans la majorité des cas, l'usure dépend du nombre de cycles (figure 90). Les auteurs soulignent l'action de l'environnement et constatent que l'oxydation domine pour de faibles amplitudes tandis que l'abrasion domine pour de grandes amplitudes.

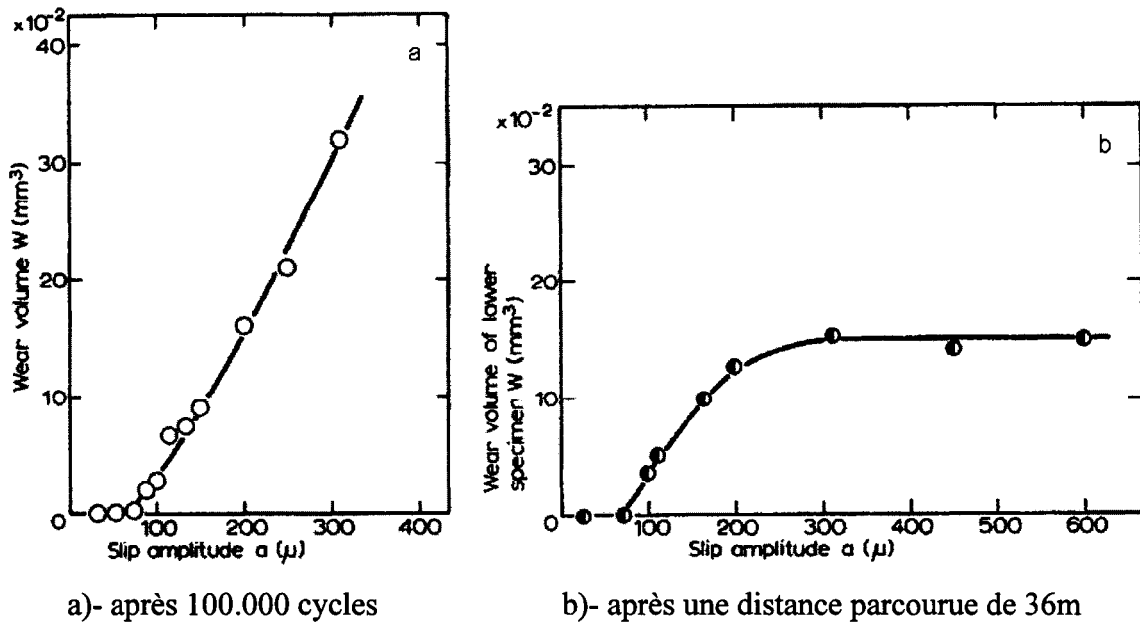


Figure 89 Taux d'usure du système vs amplitude.
(Ohmae & Tsukizoe, 1974)

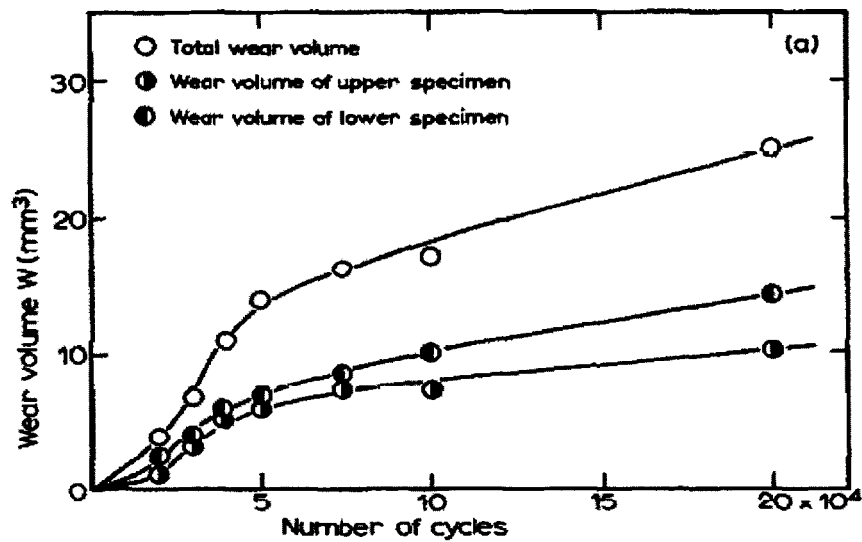


Figure 90 Volume d'usure vs nombre de cycles : AISI 1025-Fe - $200 \mu\text{m}$
(Ohmae & Tsukizoe, 1974)

5.2 Contacts sous courant électrique

5.2.1 Rapport du taux d'usure et de la dureté relative

Les figures 91, 92, 93 montrent le taux d'usure relatif des couples étudiés en fonction de la dureté relative HR. Les valeurs de ce paramètre sont indiquées entre parenthèses dans les figures. Par usure relative on entend le niveau de différence de perte de la matière, établie à 0 et à 400mA, rapporté au taux d'usure initiale sans courant électrique. L'usure relative ($\dot{W}_R = \frac{\dot{W}_{400mA} - \dot{W}_{0mA}}{\dot{W}_{0mA}}$) est un rapport sans unité.

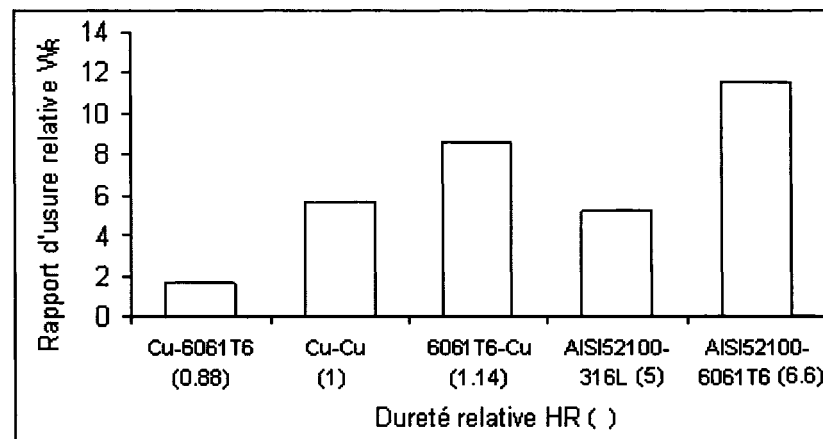


Figure 91 Rapport d'usure relatif vs HR en fretting - amplitude de 50 μ m

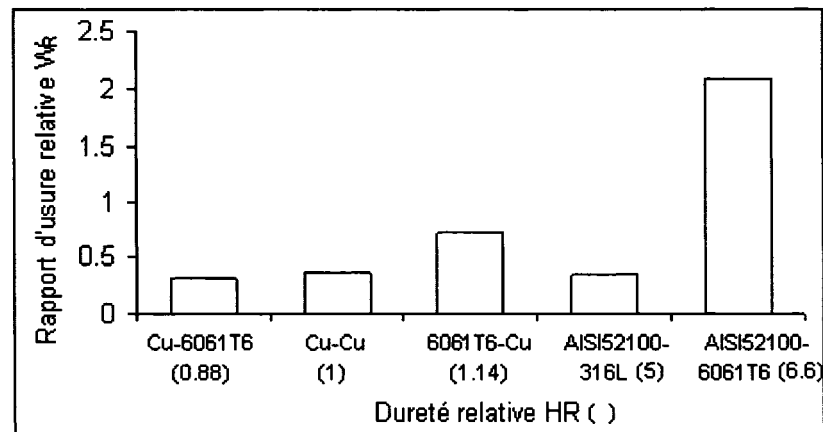


Figure 92 Rapport d'usure relatif vs HR en méso-fretting - amplitude de 150 μ m

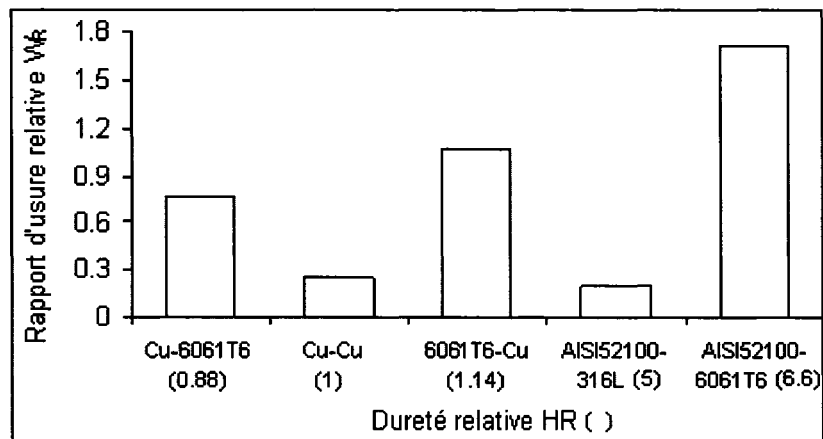


Figure 93 Rapport d'usure relatif vs HR en frottement- amplitude de $400\mu\text{m}$

Les résultats montrent que l'effet relatif du courant électrique est plus important en fretting. Ce résultat a d'importantes conséquences pratiques. Il faut souligner les conditions d'obtention de la courbe précédente, notamment l'application de la contrainte. La charge a été maintenue constante (94gf) ce qui implique que la contrainte diminue quand l'usure augmente, ce qui milite en faveur d'une diminution de l'usure en fretting.

La figure 94 montre la variation moyenne de l'usure relative mais en fonction de l'amplitude du mouvement.

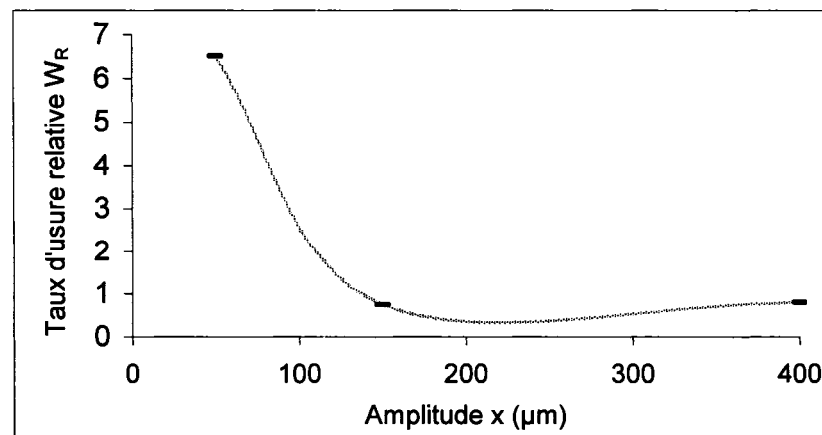


Figure 94 Évolution de l'usure relative moyenne en fonction de l'amplitude

On établit que l'effet relatif du courant sur l'usure est plus important en fretting mais l'effet absolu est plus important en frottement à basse amplitude.

La variation de l'usure relative en fonction du rapport des duretés pour les différents couples est reportée sur la figure 95.

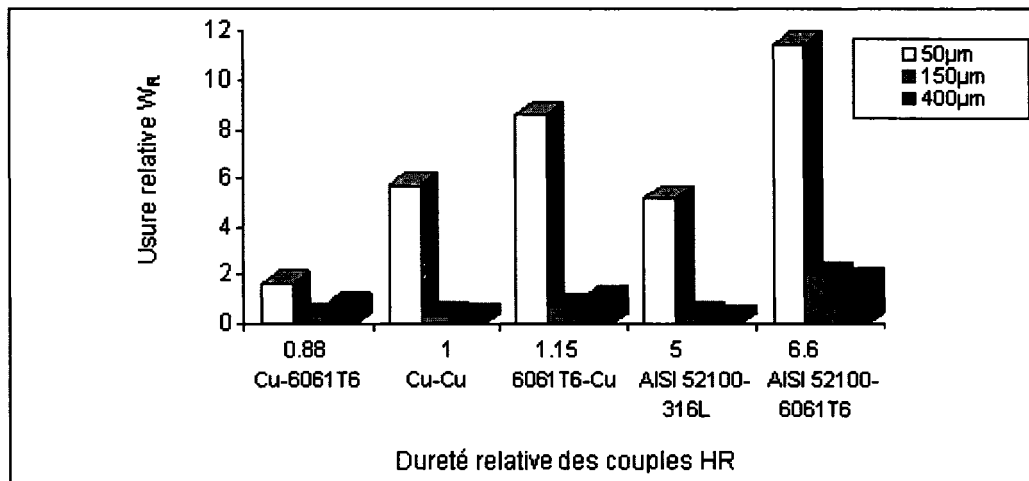


Figure 95 Variation de l'usure relative en fonction de la dureté relative et de l'amplitude du mouvement

Les résultats de (Kayaba & Iwabuchi, 1981) permettent d'apporter un éclairage intéressant de l'effet de la dureté. La qualité des débris produits dans leurs expériences est aussi importante. En fonction de la dureté de l'acier 1060, ils montrent que la dureté a une très faible influence. La production d'un oxyde ferreux noir joue un rôle favorable. La présence de cet oxyde réduit l'usure de la surface et ainsi diminuer le temps de vie. De même, sa formation réduit l'usure du partenaire qui émet et augmente l'usure du partenaire qui reçoit les particules. Ils soulignent aussi que l'oxyde ferrique Fe_2O_3 peut se présenter sous différentes structures : l'oxyde rouge (l'hématite) est peu adhérent et a une résistance plus faible que l'oxyde noir qui peut abradier la surface. Comme d'autres auteurs, ils démontrent ainsi l'action abrasive à grande amplitude de déplacement et que l'usure s'adoucit quand l'amplitude diminue. Le rapport des duretés est donc important, l'abrasivité des particules produites joue aussi un rôle prédominant.

5.2.3 Évolution de l'usure sous courant électrique.

L'effet du courant électrique est montré à la figure 96. En première approximation, les couples peuvent être regroupés en 2 classes :

- ceux où l'effet du courant électrique est faible : AISI 52100-316L, Cu-6061T6 et Cu-Cu;
- ceux où l'effet est plus important : AISI 52100-6061T6 et 6061T6-Cu.

L'explication de ces effets sera divisée en deux parties : les effets microscopiques, essentiellement la formation de la couche de surface et une description macroscopique (phénoménologique) par l'intermédiaire d'une relation mathématique.

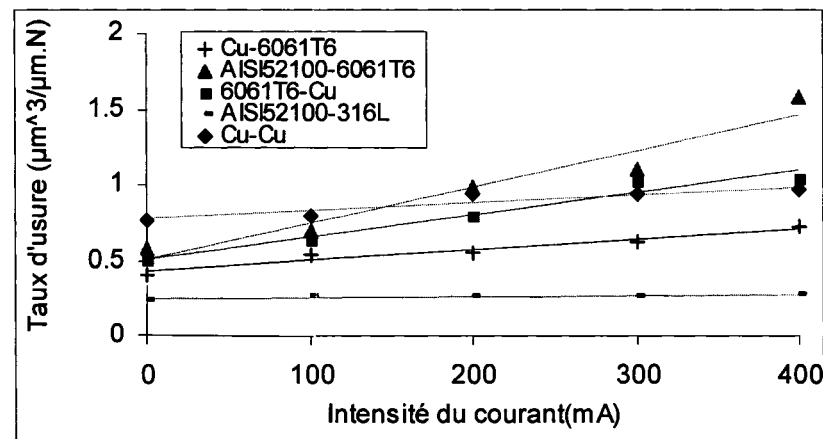


Figure 96 Taux d'usure des couples vs intensité de courant – stade du frottement à basse amplitude (400µm)

Commençons par le couple Cu-Cu. La dégradabilité du couple Cu-Cu est très faiblement dépendante du courant par rapport aux autres couples. Pour ce dernier cas, (Gagnon, Braunovic, & Masounave, 2005) ont établi le fait qu'un courant de 50mA dans le contact n'affecte pas l'usure. L'usure sans courant est élevée, soit la plus élevée des couples étudiés. L'usure de ce couple se produit par la destruction de la couche du 3^{ème} corps qui est formé de petites particules agglomérées d'oxyde de cuivre (Gagnon, 2005).

On a observé que la couche de surface est formée par un grand nombre de petites particules. De plus, on a signalé us avons déjà signalé que l'abrasion de la surface par des particules écrouies et oxydées explique ce taux d'usure élevé. Il y a destruction de la surface en continu. Au fur et à mesure que le temps de cyclage augmente, le nombre de particules abrasives augmente et donc le taux d'usure augmente constamment avec le temps et l'amplitude de vibration. Ce type de contact (Cu-Cu) est insensible à l'action du courant. Au fur à mesure que des particules abrasives sont produites, elles sont évacuées. C'est le cas des couples Cu-Cu, AISI 52100-316L et Cu-6061T6. Pour le cas du couple AISI 52100-6061T6, l'action du courant électrique sur le taux d'usure croît avec l'amplitude du mouvement, le courant exacerbe l'usure. Le taux d'usure excessive produit dans ce couple s'explique par le rapport des duretés : la bille est beaucoup plus résistante que la plaque.

En paramétrant l'évolution de la dégradation en fonction du courant pour l'ensemble des couples (figure 96), le taux d'usure peut être décrit par une fonction linéaire:

$$\dot{W}_{mi} = \alpha.I + \dot{W}_{(i=0)} \quad (5.8)$$

où I représente l'intensité du courant, \dot{W}_{mi} le taux d'usure mesuré sous l'application du courant et α est une constante qui décrit la pente caractérisant l'usure de la plaque sous l'effet du courant. Cette constante décrit en fait la sensibilité au courant électrique.

(Kohno et al., 1997) soulignent l'effet du courant dans la zone de contact en particulier. Ils accordent une certaine importance à la chaleur générée par le contact. Celui-ci doit être bon afin que la chaleur générée soit faible. Ils montrent que dans une gamme de courant donnée, il se forme un contact appelé (semi-contact) où toute décharge électrique se produit. La chaleur générée peut être calculée simplement par la loi Joule.

$$W = \beta.I.V \quad (5.9)$$

où β est un facteur qui tient compte de la génération d'arc.

La figure 97 montre la relation entre l'usure initiale (sans courant) et la pente de dégradation α (équation 5.8). Elle montre que l'influence du courant électrique sur le contact peut être, à l'exception du couple Cu-Cu, fonction du niveau d'usure sans courant.

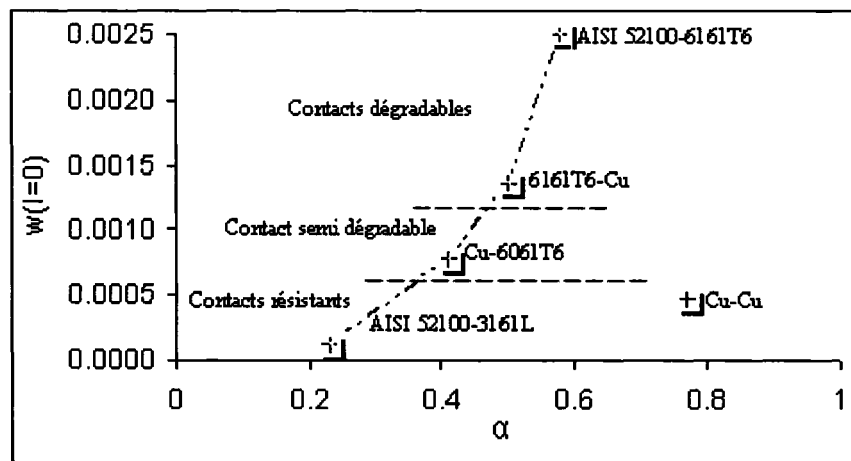


Figure 97 Effet du courant électrique en fonction de l'usure initiale

Cette figure appelle quelques commentaires :

- pour de faibles taux d'usure, le courant électrique n'exerce pas une influence marquée. C'est le cas des couples AISI 52100-316L et Cu-6061T6.
- Le couple Cu-Cu qui a un taux d'usure élevé est un peu sensible à l'effet du courant électrique.
- Les couples 6061T6-Cu et AISI 52100-6061T6 sont les plus sensibles à l'effet du courant électrique.

Hormis le couple Cu-Cu, la pente α est proportionnelle au taux d'usure sous courant. Cette constatation est un peu surprenante a priori. On aurait pu s'attendre à l'inverse : lorsque l'abrasion domine, le courant électrique n'a pas le temps d'agir, les débris emportent de possibles effets du courant. C'est le cas du Cu-Cu, mais pas celui des autres couples.

La relation linéaire obtenue est plus surprenante à plus d'un titre. Lorsque le niveau de $\dot{W}_{(i=0)}$ est élevé, la densité de courant diminue car la surface de contact augmente. De ce fait, on devrait s'attendre à une relation inverse. D'une autre part, on explique cette conséquence produite par le fait que l'action du courant électrique se manifeste dès que la couche de transfert est détruite avant de commencer à se reformer. Ceci est d'autant plus remarquable dans les cas où cette couche du troisième corps n'est pas très adhérente aux surfaces des matériaux en contact.

La sensibilité au courant s'explique par l'effet de la résistance à l'usure donc par la nature de la couche du 3^{ème} corps. Plus exactement, l'effet du courant électrique trouve son explication dans la possibilité de former des débris oxydés. Le couple AISI 52100-316L forme peu de débris, le courant n'aide donc pas à en former de nouveau. Au fur et à mesure que la quantité de débris augmente, le courant qui apporte une certaine quantité de chaleur aide à produire plus de débris. Des analyses plus approfondies sont donc encore nécessaires.

Pour des raisons pratiques des trains, (Senouci et al., 1999) ont étudié le contact électrique Cu-acier. Ils ont mis en évidence l'effet de l'oxydation et de l'intensité électrique sur ce dernier. Les résultats montrent que la polarité n'a pas d'effet important lorsque le mouvement est sous argon et que le contact reste toujours métal-métal. Cependant, en accroissant le courant électrique l'abrasion commence à apparaître lorsque le contact est sous oxygène. L'usure dépend fortement de l'intensité et de la polarité. Le mode d'usure change du type oxydation quand le fil en cuivre est anode au mode abrasion lorsqu'il est cathode. La surface peut être protégée par oxydation et endommagée par l'usure abrasive ou par un éventuel arc lorsque le courant électrique est fort. De ces travaux, on peut souligner la prudence qu'il y ait dans l'interprétation des résultats.

Lorsque l'effet du courant est de favoriser l'oxydation, il faut se demander si cette couche oxydée protège ou non la surface. Plusieurs situations peuvent se produire :

- l'oxyde est un isolant thermique et électrique ce qui accroît la température de contact.
- l'oxyde peut être abrasif ce qui augmente fortement le taux d'usure.

C'est dans nos expériences, cas du Cu-Cu, que l'oxyde formé peut être lubrifiant et ainsi le taux d'usure est stable. On rappelle aussi que dans le cas de la majorité des contacts qui contiennent le fer, l'oxyde ferrique joue souvent le rôle d'un lubrifiant solide. Un couple résistant est peu sensible au courant. Les débris formés sont stables, déjà oxydés sans courant. Le courant électrique affaiblit les couples à faible résistance électrique. Cette remarque s'applique tant qu'il n'y a pas de changement de mécanisme de dégradation comme par exemple le couple Cu-Cu où l'abrasion devient importante.

5.2.4 Effet combiné du courant et de l'amplitude

Le passage du courant électrique dans le contact stimule l'oxydation des surfaces et l'adhérence due à la génération de chaleur dans l'interface de contact. Une tendance généralisée du comportement à l'usure sous courant est schématisé ainsi (figure 98) :

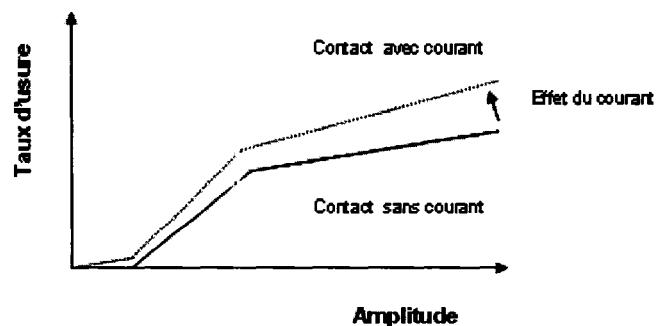


Figure 98 Effet du courant et de l'amplitude sur l'usure

L'action du courant et de l'amplitude est en synergie sur l'usure produite $\dot{W}_{p(i)}$. On peut schématiser cette tendance par la relation suivante :

$$\dot{W}_{p(i)} = A.I.x \quad (5.10)$$

où A est un facteur caractérisant la dégradabilité du couple qui est fonction de la nature des matériaux en interaction. En plus de ce qui précède, l'usure est fonction des facteurs suivants:

- Intensité électrique du courant I ;
- dureté relative HR
- indice d'écrouissage désigné par n ;
- amplitude du mouvement A ;
- la conductibilité thermique et la conductivité électriques des matériaux.

CONCLUSION

Au travers de la gamme d'essais réalisés aux différentes échelles du frottement, une bonne approche peut être tirée concernant la compréhension du comportement à la dégradation des couples métalliques en fonction de leurs propriétés intrinsèques (dureté, constitution chimique) et des paramètres opératoires à savoir l'influence de la gamme des amplitudes du mouvement et du courant électrique en mode continu.

À l'échelle des amplitudes, trois niveaux de dégradation ont été identifiés : le fretting (stade I), le méso-fretting dont la manifestation s'étale sur une plage de 75 à 150-175µm voire 200µm dépendamment des couples (stade II) ainsi que le stade du frottement à basse amplitude pour des amplitudes limitées à 400µm (stade III).

Dans le stade (I), l'usure est négligeable par rapport aux deux autres stades. Le classement du taux d'usure n'est pas changé dans les trois stades de frottement pour l'ensemble des couples. Si un couple s'use plus qu'un autre en fretting, son comportement reste inchangé à plus grande amplitude de déplacement. La pente décrivant la variation du taux d'usure par unité d'amplitude $\left(\frac{\partial \dot{W}}{\partial x}\right)$ passe par un maximum en méso-fretting. Cette dernière s'infléchit à partir d'une certaine amplitude caractéristique du couple.

Une formulation mathématique a été élaborée qui décrit le comportement à l'usure de l'ensemble des systèmes expérimentés. Ce modèle intègre l'ensemble des paramètres expérimentaux depuis le fretting jusqu'à une partie du stade de frottement à basse amplitude (350µm) en passant par le méso-fretting. L'usure de la plaque peut être prédite par la fonction modèle suivante :

$$Y = \frac{1}{2}[1 + \tanh(a.(x - x_0))] \quad (1)$$

avec Y un paramètre sans dimension.

$$Y = \frac{\dot{W} - \dot{W}_{Min}}{\dot{W}_{Max} - \dot{W}_{Min}}$$

L'effet du courant électrique dans le stade du frottement à basse amplitude est décrit par l'intermédiaire de la relation suivante :

$$\dot{W}_{mi} = \alpha \cdot I + \dot{W}_{(i=0)} \quad (1)$$

Le paramètre α est une caractéristique du couple. Il indique la sensibilité du couple à l'effet du courant électrique. Cette description est générale et s'applique à tous les couples étudiés. Elle souligne l'effet du courant électrique : l'apport du courant électrique stimule l'usure du couple. D'une façon générale, l'effet du courant sur le taux d'usure est linéaire. L'effet du couple sur la constante α est plus délicat à décrire et des études supplémentaires sont recommandées.

L'effet du mode de dégradation a été largement commenté : formation de fins débris, agglomération, délamination, adhésion et abrasion sont les phénomènes invoqués.

RECOMMANDATIONS

1 Fretting sans courant électrique

Le taux de dégradation dans les systèmes est fonction de la dureté relative. En effet, l'usure de la plaque diminue avec la diminution de la dureté relative. On note H_R la dureté relative du couple bille- plaque, soit : $H_R = \frac{H_{Bille}}{H_{plaque}}$. Trois situations d'usure se présentent en fonction de ce critère à savoir:

- 1- pour $H_{Bille} \geq H_{plaque}$, l'usure mesurée dans le contact, désignée \dot{W}_m , représente celle de la plaque: $\dot{W}_m = \dot{W}_p$
- 2- pour $H_{Bille} \ll H_{plaque}$, l'usure mesurée correspond à celle de la bille : $\dot{W}_m = \dot{W}_B$.
- 3- pour $H_{Bille} \approx H_{plaque}$, c'est le cas intermédiaire où l'usure peut être approximée selon l'hypothèse suivante :

$$\dot{W}_p = H_R \cdot \dot{W}_b + (1 - H_R) \cdot \dot{W}_p \quad (1)$$

Auquel cas, l'usure se rapporte aux deux matériaux. L'usure de la bille décroît à mesure que sa dureté est plus élevée que celle de la plaque.

Afin de pouvoir décrire les trois situations de la production de l'usure, on se propose l'établissement du modèle suivant (figure 99) :

- 1- pour $R_H < 0.8$: l'usure se rapporte à la bille;
- 2- pour $0.8 \leq R_H \leq 1.2$: l'usure est combinée entre la bille et la plaque;
- 3- pour $R_H > 1.2$: l'usure est relative à la plaque.

Cette hypothèse peut décrire l'évolution des deux partenaires dont le rapport de dureté avoisine l'unité, soit pour une gamme étroite de HR comprise entre 0.8 et 1. Les bornes 0.8 et 1.2 sont donnés arbitrairement.

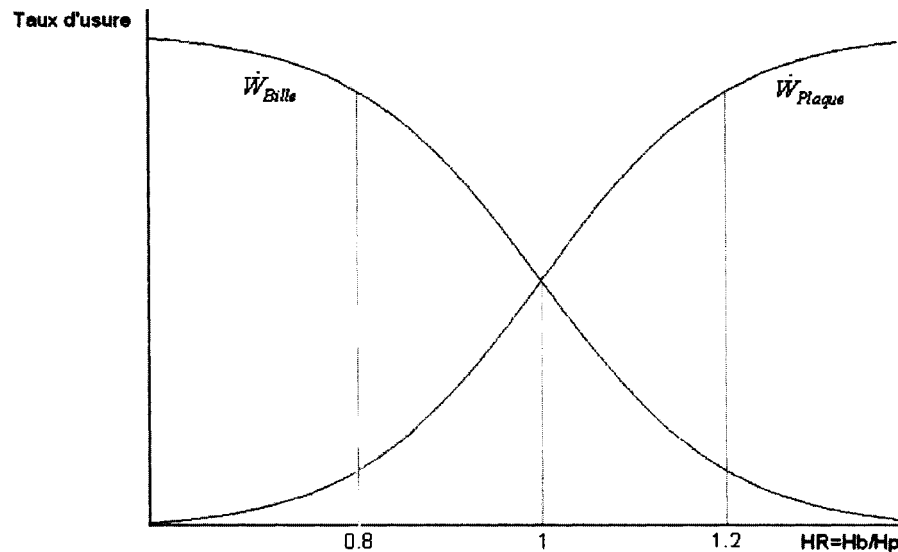


Figure 99 Évolution de l'usure des corps en fonction de la dureté relative

Dans une certaine mesure, ce postulat s'avère représenter la tendance à l'usure dans le couple. Cependant, il n'en demeure pas moins que la nature d'oxyde du troisième corps et la possibilité de son retransfert sur l'un des partenaires de contact puisse agir dans le sens inverse ou accommoder la vitesse d'usure. Des études subséquentes permettront de relativiser cette dernière hypothèse à la composition du troisième corps.

1.2 Fretting sous courant électrique

Indépendamment des couples de matériaux, il s'avère donc que le rapport de dégradation relative en présence du courant est plus important en fretting qu'en méso-fretting et en frottement comme le montrent les figures (91, 92, 93).

On attribue cette différence dans les résultats au rapport de la densité du courant électrique à l'amplitude du mouvement parcourue par cette zone de contact. Or, il y a plus d'énergie thermique confinée dans les contacts très limités que dans les contacts étendus sous l'action de l'amplitude. Cet effet peut être décrit par la relation suivante :

$$\dot{W}_R = \alpha \cdot \frac{J}{A} \quad (2)$$

où J est la densité du courant électrique et A l'amplitude du mouvement et

Avec l'intégration de la dureté relative comme propriété du couple, l'équation (2) peut être reformulée comme suit :

$$\dot{W}_R \cdot \alpha \cdot J \cdot \frac{H_R}{A} \quad (3)$$

avec α un facteur de proportionnalité.

Le courant électrique influence la dégradation en fonction de l'amplitude du mouvement et de la nature des surfaces en interaction. L'établissement de la couche du troisième corps dans le contact régira ensuite la fonctionnalité de cette influence. Aux grandes amplitudes, cette couche peut subir un renouvellement périodique et le courant électrique agit donc aux moments d'alternances correspondant au cycle reformation-arrachement de la couche du troisième corps. De même, on peut souligner que l'action du courant électrique est plus forte dans le cas de films aux particules lâches que dans de films adhérents et compacts à la surface.

Suite à des comportements tribologiques révélés pratiquement intéressants sous courant électrique, l'exemple des couples AISI 52100-316L et Cu-Cu, on peut également soulever une pré-explication pour ce phénomène qui doit avoir trait à l'évolution de la morphologie des débris d'oxydes sous courant électrique. À cet effet, on s'attendrait à ce que l'augmentation de l'intensité électrique du courant favorise la sphéroïdisation des particules oxydées ce qui rend le contact autolubrifiant.

BIBLIOGRAPHIE

- Antler, M. (1985, 1985/11). Electrical effects of fretting connector contact materials: a review. Paper presented at the Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers' Fretting Wear Seminar, 2-3 April 1985 Wear, Nottingham, UK.
- Antler, M. (1999). Contact fretting of electronic connectors. IEICE Transactions on Electronics, E82-C (1), 3-12.
- Archard, J. F. (1953). Contact and rubbing of flat surfaces. Journal of Applied Physics, 24(8), 981-988.
- Arnell, R. D., Davies, P. B., Halling, J., & Whomes, T. L. (1991). Tribology principles and design applications. New York, N.Y.: Springer-Verlag.
- ASM International. Handbook Committee. (1990). ASM handbook, Friction, lubrication, and wear technology (10th ed. Vol. 18). Materials Park, OH: ASM International.
- Azevedo, C. R. F., & Cescon, T. (2002). Failure analysis of aluminum cable steel reinforced (ACSR) conductor of the transmission line crossing the Parana River. Engineering Failure Analysis, 9(6), 645-664.
- Batchelor, A. W., Loh Nee, L., & Chandrasekaran, M. (2002). Materials degradation and its control by surface engineering (2nd ed.). London ; River Edge, N.J.: Imperial College Press.
- Bhushan, B., & Ge, S. (2003). Electromagnetic effects on the friction and wear of solid-solid interface. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 34(10-11), 938 - 945.
- Blanchard, P., Colombie, C., Pellerin, V., Fayeulle, S., & Vincent, L. (1991). Material effects in fretting wear: application to iron, titanium and aluminum alloys. Metallurgical Transactions A (Physical Metallurgy and Materials Science), 22A(7), 1535-1544.
- Bouchoucha, A., Chekroud, S., & Paulmier, D. (2004). Influence of the electrical sliding speed on friction and wear processes in an electrical contact copper-stainless steel. Applied Surface Science, 223(4), 330-342.
- Bouchoucha, A., Zaidi, H., Kadiri, E. K., & Paulmier, D. (1997, 1997/03/). Influence of electric fields on the tribological behaviour of electrodynamical copper/steel contacts. Paper presented at the 11th International Conference on Wear of Materials, 20-23 April 1997Wear, San Diego, CA, USA.
- Bowden, F. P., & Tabor, D. (2001). The friction and lubrication of solids. Oxford: Oxford University Press.
- Braunovic, M. (1986). Effect of fretting on the contact resistance of copper, aluminum and nickel-coated aluminum wire connections. Wear, 112(2), 181-197.

- Braunovic, M., & Alexandrov, N. (1994). Intermetallic compounds at aluminum-to-copper electrical interfaces: effect of temperature and electric current. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology Part A*, 17(1), 78-85.
- Cho, K. H., Kim, T. H., & Kim, S. S. (1998). Fretting wear characteristics of Zircaloy-4 tube. *Wear*, 219(1), 3-7.
- Daniel, C., & Mucklich, F. (2004). Electrical behavior of periodically microstructured Sn/CuSn₄ contact models under fretting conditions. *Wear*, 257(3-4), 266-270.
- Ding, J., Leen, S. B., & McColl, I. R. (2004). The effect of slip regime on fretting wear-induced stress evolution. *International Journal of Fatigue*, 26(5), 521-531.
- Elleuch, K., & Fouvry, S. (2002). Wear analysis of A357 aluminium alloy under fretting. *Wear*, 253(5-6), 662-672.
- Elleuch, K., & Fouvry, S. (2005). Experimental and modelling aspects of abrasive wear of a A357 aluminium alloy under gross slip fretting conditions. *Wear*, 258(1-4), 40-49.
- Endo, K., Goto, H., & Nakamura, T. (1973). FRETTING FATIGUE STRENGTH OF SEVERAL MATERIALS COMBINATIONS. *Bulletin of the JSME*, 16(92), 143-150.
- Fouvry, S., Elleuch, K., & Simeon, G. (2002, 2002/11/). Prediction of crack nucleation under partial slip fretting conditions. Paper presented at the Fretting Fatigue, May 2001 Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Nagaoka, Japan.
- Fouvry, S., Kapsa, P., & Vincent, L. (1996). Quantification of fretting damage. *Wear*, 200(1-2), 186-205.
- Gagnon, D. (2005). Étude de la transition tribologique entre le fretting et le méso-fretting pour des matériaux de contact électrique. École de technologie supérieure ;, Montréal.
- Gagnon, D., & Braunovic, M. (2000). Fretting in copper-to-copper contacts under AC and DC current conditions. Paper presented at the Electrical Contacts-2000 Proceedings of the 46th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Sep 25-Sep 27 2000, Chicago, IL, USA.
- Gagnon, D., & Braunovic, M. (2004). Effect of fretting in lead-free systems. Paper presented at the Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts, Sep 20-23 2004, Seattle, WA, United States.
- Gagnon, D., Braunovic, M., & Masounave, J. (2005, 2005//). Effect of fretting slip amplitude on the friction behaviour of electrical contact materials. Paper presented at the Electrical Contacts - 2005. Proceedings of the 51st IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 26-28 Sept. 2005, Chicago, IL, USA.

- Hannel, S., Fouvry, S., Kapsa, P., & Vincent, L. (2001). The fretting sliding transition as a criterion for electrical contact performance. *Wear*, 249(9), 761-770.
- Hoeppe, D., Adibnazari, S., & Moesser, M. W. (1994). Literature review and preliminary Studies of Fretting and Fretting fatigue Including Special Applications of Aircraft Joints (Final Report). Utah State Univ., Logan, UT.: Dept. of Mechanical Engineering.
- Holinski, R. (2001). Fundamentals of dry friction and some practical examples. *Industrial Lubrication and Tribology*, 53(2), 61-65.
- Holm, R. (1944). Determination of actual contact surface of brush contact: National Advisory Committee for Aeronautics (United States Advisory Committee for Aeronautics), Washington, DC, United States.
- Holm, R. (1967). *Electrical contacts*. Berlin: Springer-Verlag.
- Hyung, K. K., Heung, S. K., Yoon., K.-H., & Song., K.-N. (2001, August 12-17 2001). Experimental Investigation on the Parameters Affecting Fuel Fretting Wear. Paper presented at the Transactions, SMiRT 16, Washington DC USA.
- Iwabuchi, A. (1978). The effect of slip amplitude and load in fretting wear. *J. Japan Society of Mechanical Engineers*, 1978.
- Iwai, Y., & Endo, K. (1982). Transition of the lubricated wear of carbon steel. *Wear*, 75(1), 159-172.
- Jahanmir, S. (1985). The relationship of tangential stress to wear particle formation mechanisms. *Wear*, 103(3), 233-252.
- Jahanmir, S. (1986). On Mechanics and Mechanisms of Laminar Wear Particle Formation. In R. L. Latanision and T. E. Fischer (Eds.) *Harwood Press (Ed.), Mechanics and Physics of Surfaces (R. L. Latanision and T. E. Fischer (Eds.) ed., Vol. Vol. III, pp. 261-332)*. New York, NY: Harwood Press,.
- Kayaba, T., & Iwabuchi, A. (1981). Effect of the hardness of hardened steels and the action of oxides on fretting wear. *Wear*, 66(1), 27-41.
- KENNEDY, F. E. (1982). SINGLE PASS RUB PHENOMENA - ANALYSIS AND EXPERIMENT., 104(4), 582-588.
- Kohno, A., Ohtake, M., Mishina, H., Kanekama, U., Iwase, M., Mori, M., et al. (1997). Wear Mechanism of Pure Copper and Steel in a Current Collecting System. *Japanese Journal of Tribology*, 42(4), 497-502.
- Lipson, C., & Colwell, L. V. (1961). *Handbook of mechanical wear: wear, fretting, pitting, cavitation, corrosion*. Ann Arbor,: University of Michigan Press.

- Malucci, R. D. (1996). Impact of fretting parameters on contact degradation. Paper presented at the Proceedings of the 1996 42nd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts Joint with the 18th International Conference on Electrical Contacts, Sep 16-20 1996, Chicago, IL, USA.
- Moran, J., Sweetland, M., & Suh, N. P. (2004, 2004//). Low friction and wear on non-lubricated connector contact surfaces. Paper presented at the Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts, 20-23 Sept. 2004, Seattle, WA, USA.
- Nakayama, K., Fujiwara, T., & Hashimoto, H. (1984). Exoelectron measurement apparatus incorporated in a scanning electron microscope. *Journal of Physics E (Scientific Instruments)*, 17(12), 1199-1203.
- Nakayama, K., & Nevshupa, R. A. (2002). Plasma generation in a gap around a sliding contact. *Journal of Physics D (Applied Physics)*, 35(12), 53-56.
- Nakayama, K., Suzuki, N., & Hashimoto, H. (1992). Triboemission of charged particles and photons from solid surfaces during frictional damage. *Journal of Physics D (Applied Physics)*, 25(2), 303-308.
- Ohmae, N. (1987). Analysis of the large plastic deformation involved in wear processes using the finite element method with an updated Lagrangian formulation. *Transactions of the ASME. Journal of Tribology*, 109(2), 330-337.
- Ohmae, N., & Tsukizoe, T. (1974). The effect of slip amplitude on fretting. *Wear*, 27(3), 281-294.
- Podgornik, B., Kalin, M., Vizintin, J., & Vodopivec, F. (2001). Microstructural changes and contact temperatures during fretting in steel-steel contact. *Journal of Tribology*, 123(4), 670-675.
- Rabinowicz, E. (1964). Practical uses of surface energy criterion. *Wear-Usure-Verschleiss L2* - [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(64\)90074-2](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(64)90074-2), 7(1), 9-22.
- Roberts, S. (2006). Surface engineering: <http://www-sgrgroup.materials.ox.ac.uk/lectures/tribology/surfeng.pdf>
- Roberts, S. G. (2000). Hertzian Testing of Ceramics. *British Ceramic Transactions*, 99, (1), 31-38.
- Rudolphi, A. K., & Jacobson, S. (1997). Stationary loading, fretting and sliding of silver coated copper contacts - influence of corrosion films and corrosive atmosphere. *Tribology International*, 30(3), 165-175.

- Senouci, A., Zaidi, H., Frene, J., Bouchoucha, A., & Paulmier, D. (1999). Damage of surfaces in sliding electrical contact copper/steel. Proceedings of the 1998 14th International Vacuum Congress(IVC-14), 10th Conference on Solid Surfaces(ICSS-10), 5th Conference on Nanometre-scale Science and Technology(NANO-5), 10th Conference on Quantitative Surfaces Analysis(QSA-10), Aug 31-Sep 4 1998 Applied Surface Science, 144-145, 287-291.
- Shao, C. B., & Zhang, J. G. (1998, 1998//). Electric contact behavior of Cu-Sn intermetallic compound formed in tin platings. Paper presented at the Electrical Contacts - 1998. Proceedings of the Forty-Fourth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 26-28 Oct. 1998, Arlington, VA, USA.
- Suh, N. P. (1973). The delamination theory of wear. *Wear*, 25(1), 111-124.
- Suh, N. P. (1977). An overview of the delamination theory of wear. *Wear*, 44(1), 1-16.
- Suh, N. P., & Sin, H. C. (1981). GENESIS OF FRICTION. *Wear*, 69(1), 91-114.
- Tevaarwerk, J. L. (1985). Rolling slip and traction measurements on low modulus materials: NASA.
- Varenberg, M., Halperin, G., & Etsion, I. (2002). Different aspects of the role of wear debris in fretting wear. *Wear*, 252(11-12), 902-910.
- Vingsbo, O., Od Falk, M., & Shen, N.-E. (1990). Fretting maps and fretting behavior of some FCC metal alloys. *Wear*, 138(1-2), 153-167.
- Vingsbo, O., & Soderberg, S. (1988). On fretting maps. *Wear*, 126(2), 131-147.
- Waterhouse, R. (1992). Fretting Wear. In A. I. H. Committee. (Ed.), *ASM Handbook* (Vol. Vol. 18, Friction, Lubrication and Wear technology, pp. 233–256). Cleveland, OH.
- Wharton, M. H., Waterhouse, R. B., Hirakawa, K., & Nishioka, K. (1973). The effect of different contact materials on the fretting fatigue strength of aluminium alloy. *Wear*, 26(2), 253-260.
- Williams, J. A. (1999). Wear modelling: Analytical, computational and mapping: A continuum mechanics approach. Proceedings of the 1999 12th International Conference on Wear of Materials, WOM-99, 225-229(I), 1-17.
- Zaidi, H., Chin, K. J., & Frene, J. (2001). Analysis of surface and subsurface of sliding electrical contact steel/steel in magnetic field. *Surface & Coatings Technology*, 148(2-3), 241-250.