

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PRÉSENTÉE À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DU DIPLÔME DE DOCTORAT EN GÉNIE
Ph.D.

PAR
DANIEL GAGNON

ÉTUDE DE LA TRANSITION TRIBOLOGIQUE ENTRE LE FRETTEMENT ET LE
MESO-FRETTEMENT POUR DES MATÉRIAUX DE CONTACT ÉLECTRIQUE

MONTREAL, LE 25 MAI 2005

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

M. Milenko Braunovic, codirecteur
MBInterface (consultant)

M. Le Van Ngan, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Patrick Thériault, professeur
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Duc Hai Nguyễn, examinateur externe
Unité expertise électrique, Hydro Québec IREQ

M. Phuc Nguyễn-Duy, examinateur externe
RusCan Technologie

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 31 MARS 2005

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

ÉTUDE DE LA TRANSITION TRIBOLOGIQUE ENTRE LE FRETTEMENT ET LE MESO-FRETTEMENT POUR DES MATÉRIAUX DE CONTACT ÉLECTRIQUE

Daniel Gagnon

RÉSUMÉ

Dans les installations électriques, les contacts sont toujours soumis à des contraintes alternées ou à des micro-déplacements. Il en résulte une corrosion par fretting, phénomène défini comme un type de détérioration de la surface qui se produit lorsque deux matériaux en contact sont soumis à des mouvements microscopiques d'oscillations de très faible amplitude (0 à 100 μm). Ceci a pour effet de provoquer une dégradation de la résistance de contact et une interruption du passage du courant. Ce phénomène a des répercussions considérables sur le plan pratique puisque les micro-déplacements de pièces en contact peuvent être causés par la dilatation thermique différentielle des métaux, par des vibrations mécaniques, par la relaxation des contraintes ou par l'échauffement des contacts lorsqu'on interrompt et rétablit le courant.

Nous avons donc dans le cadre de cette thèse étudié plusieurs aspects du fretting (0–100 μm) et du meso-fretting (100 à 1000 μm) pour différents matériaux de contact électrique. Des travaux expérimentaux ont été réalisés à partir de deux montages reproduisant divers aspects de la dégradation par le fretting. Un premier montage de fretting de type bille-plaque a été entièrement développé à l'ÉTS et un second montage, de type fil-plaque a été utilisé en collaboration avec Hydro Québec IREQ à Varennes. Plusieurs techniques de mesures et d'analyse relevant tant du domaine de la mécanique du contact que de la métallurgie ont été utilisées pour traiter les résultats.

L'influence du courant sur le taux d'usure et la force de friction a été examinée pour divers matériaux de contacts. Des essais de fatigue thermique et électrique ont été réalisés sur divers matériaux et lubrifiants de contact. Il a été démontré que pour le domaine entre 100 μm et 1000 μm , le taux d'usure n'est pas le même de 0 à 100 μm et au delà de 1000 μm . La plupart des matériaux évalués montrent un stade de comportement intermédiaire dont le début se situe entre 100 μm et 300 μm . Lorsque l'on substitue le courant CC à un courant CA de 60 Hz ou 400 Hz, la morphologie des débris aux abords de la zone de contact est différente. De plus, lors de la comparaison du vieillissement thermique par conduction versus par chauffage électrique de certains alliages sans plomb, il a été montré qu'il pourrait y avoir une différence entre les deux en ce qui concerne le taux de croissance des phases intermétalliques.

ÉTUDE DE LA TRANSITION TRIBOLOGIQUE ENTRE LE FRETTEMENT ET LE MÉSO-FRETTEMENT POUR DES MATÉRIAUX DE CONTACT ÉLECTRIQUE

Daniel Gagnon

SOMMAIRE

Dans les installations électriques, les contacts sont toujours soumis à des contraintes alternées ou à des micro-déplacements. Il en résulte une corrosion par fretting, phénomène défini comme un type de détérioration de la surface qui se produit lorsque deux matériaux en contact sont soumis à des mouvements microscopiques d'oscillations de très faible amplitude (0 à 100 μm). La dégradation des contacts s'accompagne d'une grande accumulation de petits débris métalliques qui s'oxydent rapidement. Ceci a pour effet de provoquer une dégradation de la résistance de contact et une interruption du passage du courant. Ce phénomène a des répercussions considérables sur le plan pratique puisque les micro-déplacements de pièces en contact peuvent être causés par la dilatation thermique différentielle des métaux, par des vibrations mécaniques, par la relaxation des contraintes ou par l'échauffement des contacts lorsqu'on interrompt et rétablit le courant.

Nous avons donc dans le cadre de cette thèse étudié plusieurs aspects du fretting (0–100 μm) et du meso-fretting (100 à 1000 μm) pour différents matériaux de contact électrique. Des travaux expérimentaux ont été réalisés à partir de deux montages reproduisant divers aspects de la dégradation par le fretting. Un premier montage de fretting de type bille-plaque a été entièrement développé à l'ETS et un second montage, de type fil-plaque a été utilisé en collaboration avec Hydro Québec IREQ à Varennes. Plusieurs techniques de mesures et d'analyse relevant tant du domaine de la mécanique du contact que de la métallurgie ont été utilisées pour traiter les résultats.

L'influence du courant sur le taux d'usure et la force de friction a été examinée pour divers matériaux de contacts. Des essais ont aussi été réalisés en fonction des nouvelles problématiques auxquelles font face l'industrie des contacts électriques. Des essais de fatigue thermique et électrique ont été réalisés sur divers matériaux et lubrifiants de contact. Il a été démontré que pour le domaine entre 100 μm et 1000 μm , le taux d'usure n'est pas le même de 0 à 100 μm et au delà de 1000 μm . La plupart des matériaux évalués montrent un stade de comportement intermédiaire dont le début se situe entre 100 μm et 300 μm . Il a aussi été montré que pour les échantillons cuivre-cuivre, l'augmentation de la résistance électrique du contact coïncide avec un changement au niveau du comportement de la force et du coefficient de friction du contact. Lorsque l'on substitue le courant CC à un courant CA de 60 Hz ou 400 Hz, la morphologie des débris aux abords de la zone de contact est différente. De plus, lors de la comparaison du vieillissement thermique par conduction versus par chauffage

électrique de certains alliages sans plomb, il a été montré qu'il pourrait y avoir une différence entre les deux en ce qui concerne le taux de croissance des phases intermétalliques. Un modèle de mécanisme de dégradation semblable à celui de l'étain est proposé pour ces alliages et des travaux supplémentaires sont en cours afin d'expliquer le comportement des intermétalliques lors du chauffage thermique et électrique.

STUDY OF THE TRIBOLOGY TRANSITION DOMAIN BETWEEN FRETTING AND MACRO-FRETTING WEAR PHENOMENAS FOR ELECTRICAL CONTACT MATERIALS

Daniel Gagnon

ABSTRACT

Fretting in electrical contacts is a common problem of significant practical importance that can affect a wide range of electrical equipment, incur costly component replacement and even more expensive equipment downtime. The process is defined as accelerated surface damage occurring at the interface of contacting materials subjected to small oscillatory movements of 0 to 100 μm in displacement. The fretting motion can be produced by mechanical vibrations, differential thermal expansion, load relaxation, and also by junction heating as the power is switched on and off. It is generally accepted that fretting is limited to slip amplitudes not greater than 100 μm . A considerable amount of rapidly oxidizing debris is usually generated in the contact area. This will lead to the build-up of an electrically insulating layer, which will gradually increase the contact resistance and will eventually lead to the electrical contact failure.

One the main goal of this study was to examine the wear behaviour of different electrical contact materials in the transition zone between a pure fretting regime (motion amplitude from 0–100 μm) to a macro-fretting regime (motion amplitude from 100 à 1000 μm). Beyond the 1000 μm , it is generally accepted that the regime is of the domain of general wear. Fretting tests were conducted on a variety of experimental set-ups. One of them was especially constructed for this purpose at ÉTS. The second experimental fretting set-up is located at Hydro Quebec IREQ and uses wire on plate samples. The ÉTS set-up developed for this study and uses ball on flat specimens. It was also constructed to permit measurement of the friction force and coefficient during the fretting motion of 5 individual samples. The wear rate of the plate samples was measured using both optical and electron microscopy. Various other surface analysis techniques such as EDX, thermo-gravimetry and micro-resistance measurements were used to analyze the samples. With regards to the advent of new materials in the electrical utilities industry, some thermal degradation testing was carried out in the course of our study. The fretting behaviour of high temperature contact aid compounds and some new lead-free alloys, were evaluated. Intermetallic layer growth has also been investigated for a variety of lead-free alloys.

Results have shown that the presence of a 50 mA electrical current in the contact zone is affecting the wear rate and friction force of most materials tested. It was shown that the onset of loss of contact in the copper-to-copper samples coincides with a change in the friction coefficient for ball on flat samples. The wear rate in the transition domain

from a pure fretting regime ($<100 \mu\text{m}$) to a pure wear regime ($>1000 \mu\text{m}$) is specific to that fretting amplitude bracket. Depending on the material tested, a distinctive macro-fretting wear rate starts around 100 to 300 μm . When an AC current is injected instead of a DC current in copper-to-copper samples, a different debris morphology is observed for 60 Hz and 400 Hz AC current. Thermal aging tests on lead free alloys has shown a potential difference in the mechanism of formation of intermetallic layers between the electrically heated samples and the oven heated ones. A model for the degradation mechanism under the influence of fretting is proposed for the lead free alloys.

AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS

La réalisation d'un tel travail ne peut tenir qu'à une seule personne. Je tiens d'abord à remercier sincèrement mon directeur de thèse Jacques Masounave ainsi que mon codirecteur Milenko Braunovic, qui m'ont donné l'opportunité de réaliser ce travail. Ils m'ont adroitement guidé tout au long de ce projet et leur grande connaissance du domaine m'a été judicieuse et essentielle. Je leurs serai toujours gré pour leurs critiques et encouragements portant sur les différents aspects de ce travail.

Je dois souligner que ce travail n'aurait été possible sans l'apport financier du CSRNG (M. Masounave et le Laboratoire des matériaux de l'ÉTS), qui a défrayé les coûts reliés à la fabrication et la mise au point du montage expérimental de fretting de l'ETS. Je tiens à y remercier M. Jean Guy Gagnon et M. Serge Plamondon pour leur soutien technique ainsi que tous les stagiaires pour l'excellent travail qu'ils ont réalisé lors du développement de cet appareil.

J'aimerais également remercier Hydro Québec, pour m'avoir permit d'utiliser des équipements et appareils pour la réalisation de certains essais à L'IREQ. Je tiens à y souligner le support technique de M. Éric Perreault, M. Stéphane Godin, M. René Veillette et Mme Lisa Rodrigue et je remercie mes collègues et patrons pour leurs encouragements.

Finalement, bien que j'aie consacré d'innombrables jours de congé à cette thèse, je crois avoir su maintenir un bon équilibre entre ma vie familiale et la poursuite de mes ambitions personnelles. À cet égard, je dois mentionner le support infailible de mon épouse Astrid, de mes 4 enfants, de ma famille et celui d'une belle-mère exceptionnelle, Marie-Thérèse St-Yves.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	iii
REMERCIEMENTS	v
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES FIGURES.....	xii
LISTE DES GRAPHS	xv
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES	xx
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PRINCIPAUX OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES DE TRAVAIL	5
1.1 Étude du meso-fretting.....	5
1.2 Lubrifiants à contact électrique à haute température	6
1.3 Nouveaux alliages à contact électrique.....	7
1.4 Comparaison du courant CA par rapport au CC sous fretting	8
1.5 Influence du courant électrique sur la force de friction	9
1.6 Fretting avec un montage fil-plaque versus bille-plaque	9
CHAPITRE 2 MÉCANISMES DE DÉGRADATION DES CONTACTS ÉLECTRIQUES	10
2.1 Introduction.....	10
2.2 Contact électrique.....	10
2.3 Passage du courant dans une interface métallique	12
2.4 Force de contact et fini de surface.....	14
2.5 Mécanismes de dégradation	16
2.5.1 Fretting-corrosion.....	16
2.5.2 Oxydation.....	17
2.5.3 Corrosion galvanique	18
2.5.4 Dilatation thermique.....	19

2.5.5	Relaxation des contraintes et fluage.....	19
2.5.6	Inter-diffusion et composés intermétalliques	20
2.6	Interrelation des mécanismes de dégradation des contacts électriques	21
2.7	État de l'art sur le fretting des contacts électriques.....	22
2.7.1	Effet de l'amplitude et de la fréquence	24
2.7.2	Effet du type de courant	27
2.7.3	Montages expérimentaux	27
2.7.4	Mesure de la force de friction	28
2.7.5	Lubrifiants et matériaux	29
2.7.6	Le plomb et les alliages à contact électrique.....	30
2.8	Conclusion	32
CHAPITRE 3 LE MESO-FRETTING		34
3.1	Introduction.....	34
3.2	Transition entre le fretting et le meso-fretting	34
3.3	Application de la propagation de fissure au fretting	37
3.3.1	Fissures courtes	38
3.3.2	Modèle de Hertz.....	40
3.3.3	Effet du cisaillement	41
3.4	Descriptions du fretting par la mécanique de rupture	43
3.4.1	Fissures intermédiaires et longues	43
3.4.2	Effet de l'amplitude.....	44
3.4.3	Modes de dégradation de la surface	45
3.4.4	Cartes d'usure.....	46
3.4.5	Troisième corps.....	49
3.5	Influence des matériaux	50
3.6	Conclusion	52
CHAPITRE 4 MONTAGES EXPÉRIMENTAUX.....		53
4.1	Introduction.....	53
4.2	Montage de fretting bille-plaque versus fil-plaque	53
4.3	Détails du montage expérimental de fretting bille-plaque	54
4.3.1	Mesure de la force et du coefficient de friction	57
4.3.2	Mesure de l'amplitude du déplacement de chacune des stations	58
4.3.3	Génération du mouvement de fretting	60
4.3.4	Ajustement de l'amplitude du mouvement.....	61
4.3.5	Circuit de mesure de la dégradation des contacts électriques	63
4.3.6	Acquisition des données d'essais.....	64
4.3.7	Mesure du taux d'usure d'un échantillon, exemple de calcul	67
4.3.8	Plan d'expérience fretting bille-plaque	69

4.4	Essais de fretting fil-plaque.....	72
4.4.1	Contrôle du mouvement de fretting fil-plaque.....	73
4.4.2	Mesures de la résistance de contact	76
4.5	Essais de fretting avec courants CA et CC, préparation des échantillons	77
4.6	Essais sur les lubrifiants haute température	77
4.6.1	Essais de fretting, lubrifiants haute température	79
4.7	Essais de fretting, évaluation des alliages sans plomb.....	79
4.8	Dégradation des surfaces boulonnées de contact par cyclage thermique.....	81
4.8.1	Évaluation des lubrifiants haute température et alliages sans plomb par cyclage thermique.....	83
4.8.2	Lubrifiants haute température, cyclage thermique par conduction.....	84
4.8.3	Alliages sans plomb, cyclage thermique.....	84
4.9	Lubrifiants haute température, analyse par thermogravimétrie (TGA).....	85
4.9.1	Exposition prolongée à haute température pour les lubrifiants.....	85
4.10	Mesures de conductivité électrique des alliages sans plomb	86
4.11	Conclusion	87
CHAPITRE 5 RÉSULTATS		90
5.1	Introduction.....	90
5.2	Fretting et meso-fretting sans courant électrique.....	90
5.2.1	Cas du 52100 sur 316L	91
5.2.2	Effet de la force tangentielle	95
5.2.3	Effet de l'amplitude et du courant sur le coefficient de friction moyen.....	98
5.2.4	Effet de l'amplitude du mouvement sur le taux d'usure, sans courant.....	101
5.2.5	Cas du cuivre sans courant.....	108
5.3	Fretting et meso-fretting avec courant électrique (CC)	109
5.4	Validation des lubrifiants haute température	120
5.4.1	Cyclage de courant.....	120
5.4.2	Fretting	120
5.4.3	Thermogravimétrie.....	124
5.4.4	Exposition à haute température.....	125
5.4.5	Résumé lubrifiants haute température.....	128
5.5	Alliages sans plomb	129
5.5.1	Influence du fretting.....	129
5.5.2	Résistance électrique de l'interface	132
5.5.3	Phases intermétalliques	134
5.6	Influence du courant alternatif sur le fretting.....	137

5.6.1	Morphologie des débris et des surfaces	141
5.7	Conclusion	145
CHAPITRE 6 DISCUSSIONS		147
6.1	Effet de l'amplitude de déplacement sur le taux d'usure	147
6.2	Effet du courant sur la force de friction	151
6.3	Variation de la densité de courant et de la force de friction.....	152
6.4	Influence du courant CA sur le contact cuivre-cuivre	154
6.5	Influence du fretting et du vieillissement thermique sur les alliages sans plomb.....	155
6.6	Lubrifiants haute température	156
RECOMMANDATIONS POUR LA POURSUITE DES TRAVAUX		158
ANNEXES :		
1	Calibration montage bille-plaque.....	160
2	Résultats des essais de fretting bille sur plaque, avec et sans courant électrique.....	168
BIBLIOGRAPHIE		211

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Détails des paramètres des montages bille-plaque et fil-plaque 54
Tableau II	Paramètres d'essai pour couples billes plaques essais sans courant électrique fréquence = 1Hz 70
Tableau III	Paramètres d'essai pour couples billes plaques Essais avec courant électrique fréquence = 1Hz 71
Tableau IV	Lubrifiants haute température sélectionnés pour cette étude 78
Tableau V	Propriétés spécifiques des alliages sans plomb évalués 80
Tableau VI	Résultats de la mesure de la friction essais avec courant bille-plaque 115
Tableau VII	Résultats de la mesure de la friction essais sans courant bille-plaque 118
Tableau VIII	Résultats de l'analyse par thermogravimétrie lubrifiants haute température [Gagn02-1] 124
Tableau IX	Résistance électrique des alliages sans plomb sur les barres omnibus de cuivre avant et après vieillissement thermique par courant et par conduction [Brau04] 133
Tableau X	Épaisseur des phases intermétalliques formées à l'interface cuivre-enrobage 134

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Topographie d'une surface métallique rayée à la lime (1a) et avec une brosse métallique (1b) [image MBI Interface] 11
Figure 2	Topographie typique d'une surface métallique de contact [image MBIInterface]..... 12
Figure 3	Schéma de la résistance de constriction [Slade99] 13
Figure 4	Connecteur de puissance dégradé par le fretting [image MBI Interface]..... 17
Figure 5	Interrelation entre les divers mécanismes de dégradation des contacts électriques 22
Figure 6	Échantillon de fretting, contact Cu/Cu, 400 grf, amplitude 100 µm fréquence 1 Hz (3900X) [Gagn00]..... 37
Figure 7	Fissuration en surface à 45° 42
Figure 8	Modèle d'initiation de fissure selon la mécanique de rupture 44
Figure 9	Micrographie d'une plaque soumise au fretting, régime glissement (abrasion), glissement complet sur toute la trace (échantillon Cu-Cu, 50µm, 0.5N, 1Hz) [Gagn00] 45
Figure 10	Carte d'usure, bille sur plaque, acier inoxydable [Robe04] 46
Figure 11	Carte d'usure type [adaptée de Fouvry00] 47
Figure 12	Schéma du fonctionnement du montage de fretting bille-plaque 55
Figure 13	Schéma de fonctionnement du montage de fretting fil recourbé sur plaque 56
Figure 14	Schéma d'une station de mesure du montage de fretting bille-plaque..... 57
Figure 15	Photo montage de fretting bille-plaque..... 58
Figure 16	Détails de la mesure du déplacement montage bille-plaque..... 59
Figure 17	Détails de la mesure de la force de friction, montage bille-plaque 59
Figure 18	Génération du mouvement de fretting montage bille-plaque 61

Figure 19	Relation entre le mouvement rotatif de la came et le déplacement des plaques sur le montage bille-plaque, A-B) amplitude complète C-D) amplitude réduite	62
Figure 20	Circuit de mesure de la résistance de contact, montage bille-plaque.....	63
Figure 21	Système d'acquisition des données, montage bille-plaque	64
Figure 22	Schéma de la géométrie pour la mesure du taux d'usure	68
Figure 23	Schéma du montage de fretting fil-plaque.....	73
Figure 24	Échantillon de fretting fil sur plaque	74
Figure 25	Schéma du contrôle du mouvement plateau de fretting fil-plaque	75
Figure 26	Système de bras de levier entre le moteur pas à pas et le plateau mobile	75
Figure 27	Fretting avec courant CA-CC fil-plaque.....	76
Figure 28	Montage de vieillissement thermique des jonctions boulonnées avec graisses haute température.....	82
Figure 29	Schéma simplifié de la mesure de résistance à quatre fils réalisée avec l'appareil DMO-350 [Brau04]	87
Figure 30	Résumé des essais réalisés.....	89
Figure 31	Essais de fretting, ETS, bille d'acier 52100 sur plaque 316L	92
Figure 32	Essai avec bille 52100 plaque 316L, force = 0.72N, amplitude = 100µm, sans courant.....	93
Figure 33	Essai avec bille 52100 plaque 316L, force = 0.72N, fréquence = 1 Hz, sans courant, amplitude = 900µm	93
Figure 34	Traces observées pour différents paliers d'amplitude 52100 sur 316L fréquence : 1 Hz et force de contact: 0.72N	94
Figure 35	Zone micro alliée très fine, acier inoxydable, 52100 sur 316L, 450 µm sans courant.....	97
Figure 36	Transition des mécanismes en matière de débris.....	98
Figure 37	Effet de l'amplitude sur le contact cuivre-acier	109
Figure 38	Résultats de l'exposition continue à 200°C des lubrifiants haute température pendant 48 heures (grossissement = 5X) [Gagn02-1]	126

Figure 39	Résultats des essais de fretting, analyses des surfaces au microscope à balayage en fonction du temps et de la force de contact pour les alliages sans plomb SnAgCu, SnBi, SnAgCuSb et SnCu, amplitude : 100 μm et fréquence : 0.5Hz.[Gagn04] 131
Figure 40	Morphologie type des phases intermétalliques formées à l'interface entre le cuivre et l'enrobage. Phase 1 est du Cu_3Sn et la phase 2 est Cu_6Sn_5 [Brau04] 135
Figure 41	Schéma de la progression des phases intermétalliques à l'interface entre le cuivre et les alliages sans plomb [Brau04]..... 137
Figure 42	Variation du signal du courant et de la tension pour un contact cuivre-cuivre courant CA, a): signal au début de l'essai, b): 25000 cycles, c): 40000 cycles et d): 57000 cycles, conditions de l'essai: force: 400 grf, fréquence: 1Hz, amplitude: 100 μm , I: 50 mA. CA [Gagn00] 140
Figure 43	Image prise au microscope à balayage, contact cuivre-cuivre après 57000 cycles avec courant CA (gauche) et CC (droite), force: 400 grf, 1Hz, amplitude 100 μm , 50 mA [Gagn00] 141
Figure 44	Vue agrandie des débris, cuivre-cuivre après 57000 cycles, force: 400 grf, 1Hz, amplitude: 100 μm , 50 mA CA [Gagn00] 142
Figure 45	Stades de la production de la couche micro-alliée..... 150
Figure 46	Mesure de la densité de courant et de la force de contact..... 152
Figure 47	Nature des phases intermétalliques dans le système cuivre/étain [Brau04]..... 157
Figure 48	Montage de vieillissement des plaques de fretting enrobées d'alliages sans plomb 159

ANNEXES

Figure A1.1	Détermination de la force de friction du contact à partir de la flexion de la poutre 161
Figure A1.2	Mesure de la flexion de la poutre [Eng05] 162
Figure A1.5	Schéma de l'acquisition des valeurs de résistance de contact..... 166
Figure A1.6	Schéma de la logique de l'acquisition des données ÉTS 167

LISTE DES GRAPHES

	Page
Graphe 1	Résistance de contact en fonction de la force pour des raccords boulonnés [Brau88-2] 15
Graphe 2	Variation de la résistance électrique d'un contact fil sur plaque cuivre-cuivre avec force de contact = 400 grf, fréquence = 1Hz, amplitude de déplacement = 100 µm, et courant = 50 mA CC [Gagn00] 23
Graphe 3	Amplitude du mouvement (X) par rapport au nombre de cycles de fretting (Y) Pour différentes valeurs de résistance électrique d'un contact 60Sn40Pb-60Sn40Pb, force = 0.5N, fréquence = 8 Hz [Slade99] 25
Graphe 4	Graphe de l'évolution du taux d'usure dans le temps..... 35
Graphe 5	Schématisation du taux d'usure..... 48
Graphe 6	Graphe du coefficient de friction en fonction de la contrainte appliquée pour l'acier 49
Graphe 7	Mesure de l'amplitude du mouvement (A), de la force de friction (B) et du coefficient de friction (C), montage bille-plaque 65
Graphe 8	Résultats de la valeur de la résistance électrique en fonction du temps montage bille-plaque, bille de cuivre sur plaque de cuivre, fréquence= 1 Hz, force de contact = 0.72N, courant = 50 mA..... 66
Graphe 9	Cycle type d'essai de cyclage thermique [Gagn02] 83
Graphe 10	Évolution de force tangentielle avec l'amplitude du glissement..... 96
Graphe 11	Graphe montrant le coefficient de friction = $F(\text{ampl})$, avec et sans courant électrique, acier 52100 sur aluminium 6061 99
Graphe 12	Graphe montrant le coefficient de friction = $F(\text{ampl})$, acier 52100 sur cuivre avec et sans courant électrique..... 99
Graphe 13	Graphe montrant le coefficient de friction = $F(\text{ampl})$, aluminium 6061 sur aluminium 6061 avec et sans courant électrique 100
Graphe 14	Graphe montrant le coefficient de friction = $F(\text{ampl})$, aluminium 6061 sur laiton (7030) avec et sans courant électrique..... 100
Graphe 15	Graphe montrant le coefficient de friction = $F(\text{ampl})$, cuivre sur cuivre avec et sans courant électrique 101

Graphe 16	Mesure du taux d'usure (W) en fonction de l'amplitude du mouvement de fretting pour le couple bille-plaque Al_2O_3 sur acier inox 316L	102
Graphe 17	Mesure du taux d'usure (W) en fonction de l'amplitude du mouvement de fretting pour le couple bille-plaque acier 52100 sur acier inox 316L	102
Graphe 18	Mesure du taux d'usure (W) en fonction de l'amplitude du mouvement de fretting pour le couple bille-plaque laiton sur acier inox 316L	103
Graphe 19	Taux d'usure en (W) en fonction de l'amplitude du mouvement bille cuivre sur plaque 316L sans courant	103
Graphe 20	Taux d'usure en (W) en fonction de l'amplitude du mouvement bille Al_2O_3 sur plaque cuivre sans courant	104
Graphe 21	Taux d'usure en (W) en fonction de l'amplitude du mouvement bille 52100 sur plaque de cuivre sans courant	104
Graphe 22	Taux d'usure en (W) en fonction de l'amplitude du mouvement bille Al_2O_3 sur plaque d'aluminium 7030 sans courant	105
Graphe 23	Taux d'usure en (W) en fonction de l'amplitude du mouvement bille cuivre sur plaque aluminium 7030 sans courant	105
Graphe 24	Mesure de la résistance de contact (A), de la force de friction (B) et de l'amplitude du mouvement (C), essai de bille sur plaque cuivre-cuivre avec courant, ampl = 450 μm	112
Graphe 25	Mesure de l'amplitude du mouvement (A) et de la force de friction (B), essai de bille sur plaque cuivre-cuivre sans courant, ampl = 400 μm	113
Graphe 26	Effet du cyclage du courant sur la résistance de contact et la température des raccords boulonnés enduits des différents lubrifiants haute température, barres omnibus d'aluminium [Gagn02]	121
Graphe 27	Variation de la résistance de contact, échantillons aluminium-aluminium lubrifiés, fil sur plaque avec le temps, conditions des essais: force de contact = 100 grf (0.98N) et 500 grf (4.9N), fréquence 1Hz, amplitude de déplacement 25 μm /100 μm , courant 50 mA [Gagn02-1].....	122

Graphe 28	Variation de la résistance de contact cuivre-cuivre avec lubrifiants, fil sur plaque en fonction du temps, conditions des essais: force de contact : 100 grf (0.98N) et 500 grf (4.9N), fréquence 1Hz, amplitude de déplacement 25 μ m/100 μ m, courant 50 mA [Gagn02-1].....	123
Graphe 29	Résultats de l'analyse par thermo-gravimétrie des lubrifiants haute température, vitesse de chauffage : 10°C/min [Gagn02-1].....	127
Graphe 30	Résultats des essais de fretting, résistance du contact en fonction du temps et de la force de contact pour les alliages sans plomb SnAgCu et SnCu, amplitude : 100 μ m et fréquence : 0.5Hz. [Gagn04].....	130
Graphe 31	Variation de la résistance CC (haut) et CA (bas) pour un contact cuivre-cuivre fil sur plaque en fonction du nombre de cycles de fretting, conditions de l'essai : force de contact = 400 grf, fréquence du mouvement : 1Hz, amplitude : 100 μ m, courant = 50 mA. [Gagn00].....	138
Graphe 32	Température de la surface de contact en fonction du diamètre du point de contact pour le cuivre et l'aluminium [Gagn05].....	154

ANNEXE 1

Graphe A1. 1	Courbes de calibration des poutres de mesure de la force de friction, montage ÉTS.....	164
Graphe A1. 2	Courbes de calibration jauges de mesure du déplacement montage ÉTS	165

ANNEXE 2

Graphe A2. 1	6061 sur 6061 avec courant, 40, 100 et 325 μ m.....	169
Graphe A2. 2	Cuivre sur cuivre avec courant, 40, 100 et 325 μ m.....	170
Graphe A2. 3	Cuivre sur cuivre avec courant, 450 et 375 μ m.....	171
Graphe A2. 4	52100 sur cuivre avec courant, 40, 100 et 325 μ m.....	172
Graphe A2. 5	52100 sur cuivre avec courant, 450 et 375 μ m.....	173
Graphe A2. 6	Avec courant 6061 sur 7030, 40, 100 et 325 μ m.....	174
Graphe A2. 7	Avec courant 6061 sur 7030, 450 et 375 μ m.....	175
Graphe A2. 8	Avec courant 6061 sur cuivre, 40, 100 et 325 μ m.....	176

Graphe A2. 9	Avec courant 6061 sur cuivre, 450, 375 μm	177
Graphe A2. 10	Avec courant 7030 sur 6061, 40, 100 et 325 μm	178
Graphe A2. 11	Avec courant 7030 sur 6061, 450 et 375 μm	179
Graphe A2. 12	Avec courant 7030 sur 6061 série #2, 40, 100 et 325 μm	180
Graphe A2. 13	Avec courant 7030 sur 6061 série #2, 450 et 375 μm	181
Graphe A2. 14	7030 sur 7030 avec courant,40, 100 et 325 μm	182
Graphe A2. 15	7030 sur 7030 avec courant, 450 et 375 μm	183
Graphe A2. 16	Avec courant 7030 sur cuivre, 40, 100 et 325 μm	184
Graphe A2. 17	Avec courant 7030 sur cuivre, 450 et 375 μm	185
Graphe A2. 18	Avec courant laiton sur 6061, 30, 70 et 450 μm	186
Graphe A2. 19	Avec courant laiton sur 6061, 350 μm	187
Graphe A2. 20	Avec courant 52100 sur cuivre, 40, 100 et 325 μm	188
Graphe A2. 21	Avec courant 52100 sur cuivre, 450 et 375 μm	189
Graphe A2. 22	Avec courant cuivre sur 6061, 40, 80 et 325 μm	190
Graphe A2. 23	Avec courant cuivre sur 6061, 450 et 375 μm	191
Graphe A2. 24	Avec courant cuivre sur 7030, 40, 100 et 325 μm	192
Graphe A2. 25	Avec courant cuivre sur 7030, 450 et 375 μm	193
Graphe A2. 26	Avec courant cuivre sur cuivre, 40, 100 et 325 μm	194
Graphe A2. 27	Avec courant cuivre sur cuivre, 450 et 375 μm	195
Graphe A2. 28	Sans courant 6061 sur laiton, 50, 75, 350, 450 et 325 μm	196
Graphe A2. 29	Sans courant 7030 sur 316L, 50, 75, 350, 450 et 325 μm	197
Graphe A2. 30	Sans courant 7030 sur laiton, 50, 75, 350, 450 et 325 μm	198
Graphe A2. 31	Sans courant Al_2O_3 sur cuivre, 40, 80, 350, 450 et 325 μm	199
Graphe A2. 32	Sans courant Al_2O_3 sur laiton, 50, 75, 350, 450 et 325 μm	200
Graphe A2. 33	Sans courant, cuivre sur 316L, 50, 75, 350, 450 et 325 μm	201
Graphe A2. 34	Sans courant, Al_2O_3 sur 316L, 50, 75, 350, 450 et 325 μm	202
Graphe A2. 35	Sans courant, 6061 sur 6061, 50, 75, 350, 450 et 325 μm	203
Graphe A2. 36	Sans courant, 7030 sur 6061, 50, 75, 350, 450 et 325 μm	204
Graphe A2. 37	Sans courant, 7030 sur cuivre, 50, 75, 350, 450 et 325 μm	205

Graphe A2. 38	Sans courant, 52100 sur 316L, 50, 75, 350, 450 et 325 μ m	206
Graphe A2. 39	Sans courant, 52100 sur 6061, 50, 75, 350, 450 et 325 μ m.....	207
Graphe A2. 40	Sans courant, 52100 sur cuivre, 50, 75, 350, 450 et 325 μ m.....	208
Graphe A2. 41	Sans courant, cuivre sur 6061, 50, 75, 350, 450 et 325 μ m.....	209
Graphe A2. 42	Sans courant, cuivre sur cuivre, 80, 450 et 325 μ m.....	210

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

Mécanique de rupture

ΔK_0	Seuil de propagation de fissure
ΔK_s	Seuil de propagation pour les fissures courtes
a_0	Longueur critique de fissure
σ_a	Contrainte appliquée
$\Delta\sigma_a$	État de contrainte
N	Nombre de cycles nécessaires à la rupture
a_o	Longueur initiale de la fissure
a_f	Longueur finale de fissure
m	Constante dans l'équation de Paris
C	Constante dans l'équation de Paris
K_{Smax}	Facteur d'intensité de contraintes locales
K_{local}	Facteur d'intensité de contraintes locales
P	Pression de contact (modèle de Hertz)
R	Rayon de courbure (modèle de Hertz)
$\Delta\tau$	Amplitude du cisaillement
SSR	Shear Stress Range
SWT	Paramètre Smith Watson Topper
R_τ	Rapport de cisaillement dans le plan critique
m	Constante du modèle SSR
ϵ_a	Amplitude de la déformation
FP	Paramètre du modèle de Findley
K_{FP}	Facteur empirique du modèle de Findley
ΔK_o	Valeur de ΔK pour $R = 0$

Contact électrique

R_{AB}	Résistance électrique de l'interface $A-B$
ρ_1, ρ_2	Conductivité électrique des deux matériaux (1,2)
R_F	Résistance de la couche d'oxyde σ_F/na^2
σ_F	Résistance par unité de surface du matériau (Ohm/mm ²)
T_C	Température du point de contact
R_B	Résistance volumique électrique du matériel (Ohm)
R_C	Résistance de constriction (Ohm)
T_c	Surtempérature (°K)
T_b	Température du matériel (°K)
L	Constante de Wiedeman-Franz Lorenz = $2.45 \times 10^{-8} V^2 K^{-2}$
W_L	Travail effectué par la friction pour l'échantillon durant $n/2$ cycles
μ_i	Coefficient de friction moyen durant un cycle
F_n	Force normale sur le contact
d_i	Amplitude du déplacement (mm)

Intermétalliques

h	Épaisseur de la couche intermétallique
t	Temps
D	Coefficient de diffusion
D_0	Constante de diffusion
Q	Énergie minimale d'activation du procédé
K	Constante de Boltzman
T	Température absolue

Montages

F_f	Force de friction
F_C	Force de calibration

INTRODUCTION

Nous avons étudié dans cette thèse, deux phénomènes simultanés dans un contact électrique, soit le frottement de très faible amplitude entre deux matériaux et le passage d'un courant électrique de faible amplitude. Ce type d'étude n'est pas étrangère au département de Génie Mécanique de l'École de Technologie Supérieure. Depuis plusieurs années, le Laboratoire des matériaux y a mené de nombreuses études sur les phénomènes liés à la tribologie et à l'usure des surfaces. L'expérience acquise au fil des ans a permis de développer une expertise unique dans le domaine. Cette expérience a été mise à profit dans le développement d'un montage expérimental unique pour l'étude de la dégradation des contacts électriques. Nos travaux nous ont aussi amené à réaliser des essais et analyses en collaboration avec le Service expertise mécanique, métallurgie et civil de L'Institut de recherche d'Hydro Québec. L'étude de la dégradation des contacts électriques y a fait l'objet de nombreux travaux à l'IREQ au fil des ans.

Dans les installations électriques, les contacts sont toujours soumis à des contraintes alternées ou à des micro-déplacements. Il en résulte une corrosion par le fretting, phénomène défini comme un type de détérioration de la surface qui se produit lorsque deux matériaux en contact sont soumis à des mouvements microscopiques d'oscillation de très faible amplitude (0 à 100 μm). Le mouvement de fretting peut être imposé par des vibrations mécaniques, une dilatation thermique variable, une relaxation de force et aussi par le réchauffement d'une jonction électrique lors du démarrage et l'arrêt d'un équipement. La dégradation des contacts par le fretting s'accompagne d'une accumulation de petits débris métalliques qui s'oxydent rapidement. Ceci a pour effet de provoquer une dégradation de la résistance de contact et une interruption du passage du courant. Ce phénomène a des répercussions considérables sur le plan pratique.

En tribologie, il est généralement admis que l'usure par mode de frottement se produit pour des amplitudes de glissement supérieures à 100 μm , et l'usure par fretting pour des

amplitudes inférieures à 100 μm . Typiquement, le fretting ou micro-frottement est défini comme étant une fatigue mécanique en frottement qui ne requière pas la présence d'une fissure comme point de départ. Le mouvement relatif général de deux surfaces en contact peut être considéré comme résultant de la combinaison de trois mouvements élémentaires: le glissement, le pivotement et le roulement. Ces trois mouvements sont empêchés ou freinés par l'adhérence et/ou le frottement.

Puisque le domaine d'activité de nos travaux se situe en même temps dans le domaine de la tribologie et dans la dégradation des contacts électriques, une recherche bibliographique a du être réalisée dans les deux domaines. L'ajout du passage d'un courant électrique CA ou CC dans la zone du contact provoque un échauffement local qui peut influencer le mode de dégradation de la zone de contact.

Du point de vue de la tribologie, la dégradation d'une surface soumise à l'action du fretting est liée à des mécanismes qui sont influencés par plusieurs paramètres à la fois. Ainsi, la nature des matériaux, la force de contact, la présence d'un lubrifiant, de contaminants, d'un traitement de surface, sont tous des paramètres qui ont une influence sur la vie utile de la pièce. L'ajout du passage d'un courant amène des paramètres supplémentaires, tels que la création des phases intermétalliques, la corrosion galvanique, l'effet joule, l'électro-migration et autres phénomènes liés à la présence du courant.

Dans la littérature, dans le domaine des contacts électriques, les auteurs s'entendent sur la limite du fretting avec amplitude inférieure à 100 μm et les débattements du type meso-fretting sont communément définis comme étant du domaine de la *macro-usure*. Dans ce domaine, pour simuler l'usure causée par l'insertion et l'extraction des connecteurs enfichables en électronique, des essais de frottement avec une amplitude de déplacement de l'ordre de 2000 à 2500 μm sont typiquement réalisés.

Nous avons donc dans le cadre de cette thèse étudié des aspects de la dégradation des contacts électriques et plus précisément ceux liés au domaine du micro-frottement ou fretting. Des travaux expérimentaux ont été réalisés à partir de montages reproduisant le fretting et la fatigue thermique. Les essais de fretting ont été réalisés à partir de deux montages, un premier à géométrie bille sur plaque (ETS) et le second de type fil sur plaque (IREQ). Tous les essais de fatigue thermique ont pour leur part été réalisés à l'IREQ. Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse ont tous pour objectif de réaliser des avancées technologiques dans le domaine de l'étude des matériaux de contact avec et sans courant électrique.

Plan de la thèse

Cette thèse comporte plusieurs objectifs et est divisée en 6 chapitres :

- le chapitre 1 est consacré à la définition des différents objectifs et hypothèses de travail qui ont été élaborés;
- le second chapitre explique en détail les aspects de la métallurgie et de la mécanique de contact liés aux divers modes de dégradation des contacts électriques et les interrelations entre eux. On y souligne l'importance du fretting en tant que mécanisme dominant de dégradation pour les contacts électriques. Nous présentons les divers paramètres qui ont une influence sur la performance d'un contact électrique. Enfin, nous présentons, les conclusions de la revue de littérature, les hypothèses de notre travail ainsi que les objectifs des travaux expérimentaux;
- le troisième chapitre traite du domaine de la tribologie et de la mécanique du contact et de l'usure. On y abordera une revue de littérature dans le domaine ainsi

que l'influence des divers paramètres du frottement et de l'usure tant pour les échantillons fil-plaque que bille-plaque;

- le quatrième chapitre traite des montages expérimentaux qui ont été conçus et élaborés. Ces montages ont été réalisés afin de permettre de mesurer simultanément différents paramètres du frottement à grande et petite amplitude, soit la force de friction, le déplacement et la résistance électrique du contact. On y explique la philosophie de conception des montages ainsi que les objectifs fixés pour la construction. On y traite aussi des mesures et travaux de caractérisation qui sont nécessaires à l'examen des résultats;
- le cinquième chapitre résume en détails les résultats obtenus avec les différents montages expérimentaux. Afin d'alléger le texte certains résultats et démarches sont présentés en annexe;
- finalement, le dernier chapitre présente les principales conclusions de cette thèse. Nous y présentons nos contributions originales dans le domaine du fretting des surfaces de contact avec et sans courant électrique. Dans ce chapitre sont également présentées les recommandations quant à la poursuite des travaux de recherche dans le domaine.

Les objectifs spécifiques de chaque chapitre sont présentés à la fin de leur description dans le chapitre 1.

CHAPITRE 1

PRINCIPAUX OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES DE TRAVAIL

Nous allons dans un premier temps présenter ici, les principaux objectifs de cette thèse ainsi que les hypothèses de travail qui ont servi à diriger les travaux.

1.1 Étude du meso-fretting

Dans cette thèse, nous avons examiné la dégradation de divers matériaux de contact électrique soumis à l'action du fretting (micro-déplacements) et plus précisément la zone de transition entre le fretting et un mode à plus grande amplitude que nous appellerons *meso-fretting*. Cette appellation est nouvelle et a pour but de définir un domaine de l'usure des surfaces qui est en fait une transition entre le régime du fretting et celui de l'usure. Les lois du fretting et de l'usure sont relativement bien connues.

Buts spécifiques

Nous avons étudiés la transition entre les deux modes, à savoir quelle sont les lois qui pourraient s'appliquer dans le méso-fretting soit dans la zone entre 100 μ m et 1000 μ m de débattement pour divers matériaux de contact électrique. Nous croyons que dans cette plage d'amplitudes, pour les matériaux étudiés, il est possible de dégager des particularités soit au niveau du taux d'usure ou de la force de friction des matériaux en fonction de l'amplitude du mouvement de fretting. Ces essais seront réalisés à partir d'un montage expérimental de fretting bille-plaque développé à cet effet.

1.2 Lubrifiants à contact électrique à haute température

L'industrie du transport et de la distribution d'électricité est en train de subir des changements importants. On assiste simultanément à une hausse de la demande en électricité et à la difficulté de construire de nouvelles lignes à cause de la conscientisation environnementale de la société. Ceci force donc les producteurs, généralement publiques, d'électricité à tenter de trouver de nouvelles méthodes pour transporter de plus en plus de puissance sur les réseaux existants. Ainsi, dans le transport de l'électricité, de nouveaux conducteurs aériens peuvent opérer en continu à des températures approchant 300°C. Les connections de puissance sont en général les maillons faibles du réseau et toute augmentation de la puissance transportée se traduit forcément par une augmentation de la température d'opération des connections. Ceci couplé à une maintenance souvent insuffisante, provoque des pannes liées à la dégradation trop rapide des jonctions tant aériennes que souterraines.

L'utilisation de lubrifiants à contact électrique a depuis longtemps démontrée son efficacité à réduire la dégradation des surfaces par le fretting et à limiter l'effet de la corrosion sur les raccords aériens. Cependant, les lubrifiants qui sont présentement utilisés sur les réseaux électriques ne sont cependant pas formulés pour des utilisations à de très hautes températures. Dans le cadre de nos travaux, nous avons sélectionné quelques candidats potentiels de lubrifiants et nous les avons soumis à divers essais de dégradation thermique et électrique de façon à en dégager un candidat intéressant.

Buts spécifiques

Bien qu'un lubrifiant soit conçu pour une application tribologique à haute température, la combinaison des aspects tribologiques et électriques typiques des contacts électriques, l'augmentation des contraintes électriques notamment, l'intensité et la densité de courant exigent de mieux définir les lubrifiants, de mieux préciser leurs modes de dégradation à haute température.

1.3 Nouveaux alliages à contact électrique

On assiste présentement à l'émergence de nouvelles exigences au niveau des matériaux de contacts tant dans le domaine des contacts de puissance (pour les utilités électriques, par exemple) que dans l'électronique et l'informatique. La mise en place de législation visant à éliminer l'utilisation du plomb dans les alliages de soudure de connections dans l'électronique force le manufacturier à se tourner vers d'autres alliages. Le recyclage des métaux d'apport dans les produits électroniques est possible, mais peut engendrer un coût important.

Le marché japonais de l'électronique qui est certainement un des plus grands au monde et celui-ci montre l'exemple en proposant des produits sans plomb tel que téléphones portables, ordinateurs bloc-notes, magnétoscopes, modules de mémoire, lecteurs de disque et systèmes automobiles. En Europe, la directive WEEE impose le brasage sans plomb après juillet 2006 et des systèmes de contrôle rigoureux sont mis en place. La majorité des composants électroniques ont des terminaisons protégées par des alliages, entre autres, au plomb. Le plomb joue un rôle important dans la métallurgie des alliages de soudure à basse température (brasage tendre) et particulièrement dans les connections en électronique.

Buts spécifiques

- Le comportement sous fretting et la résistance à la fatigue thermique de ces nouveaux alliages est peu connu. Vérifier les lois pertinentes est un de nos buts et on se propose également d'étudier;
- leur fiabilité à long terme en fonction de la résistance au fretting et de la dégradation et modification des couches de surface;
- les mécanismes de diffusion métallurgique de ces alliages sont aussi peu connus. Il est possible que la formation et la croissance des phases intermétalliques ait un

impact important sur la fiabilité à long terme de ces alliages pour des application de contact électrique;

- l'influence du mode de chauffage (électrique ou thermique) ait un impact sur la croissance des intermétalliques pour ces alliages.

Nous avons donc réalisé divers essais de dégradation par fretting et des essais de vieillissement thermique et électrique pour quelques uns de ces nouveaux alliages.

1.4 Comparaison du courant CA par rapport au CC sous fretting

La présence grandissante de l'informatique et de l'électronique de haut niveau nécessite une alimentation électrique sans faille qui offre au consommateur une onde d'excellente qualité et sans interruption de service. Il a été montré que le fretting peut générer des interruptions momentanées de très courtes durées lorsque les surfaces sont dans un stade avancé de dégradation, avec un courant continu (CC). La plupart des travaux visant à évaluer l'effet du fretting sur les contacts électriques ont été réalisés avec un courant continu. Le comportement sous fretting avec un courant alternatif a fait l'objet de très peu d'études.

Buts spécifiques

Le but de cette portion des travaux étant de déterminer les variations de la résistance de contact en fonction du nombre de cycles de fretting, en tenant compte de la nature du courant (CC/CA). L'hypothèse de travail est que le courant alternatif passant par une valeur nulle 60 fois par secondes, on pourrait s'attendre à ce que l'échauffement soit plus faible et puisse provoquer un effet sur la dégradation de la surface et de la résistance de contact. De plus la présence d'un champ constant pourrait affecter les résultats. Nous avons donc réalisé des essais de fretting avec des courants CA et CC, sur des couples cuivre-cuivre et aluminium-aluminium.

1.5 Influence du courant électrique sur la force de friction

Un des objectifs liés au développement du montage de fretting bille-plaque est d'étudier si un courant électrique de faible intensité et densité tel que généralement dans la littérature a un effet important sur le coefficient de friction et le taux d'usure du contact.

Buts spécifiques

L'hypothèse de ce travail est que bien que le courant soit très faible, il peut théoriquement générer un échauffement important par effet Joule. Le courant électrique bien qu'il soit de très faible amplitude mais de grande densité, peut influencer la force de friction.

1.6 Fretting avec un montage fil-plaque versus bille-plaque

Le développement d'un montage bille-plaque nous permet d'obtenir des résultats qui sont compatibles avec le monde de la tribologie. Le montage bille-plaque permet cependant d'utiliser des échantillons qui ont sensiblement la même géométrie que ceux utilisés sur le montage fil-plaque. Nous allons étudier l'influence de la géométrie du contact, comparer l'évolution de la résistance électrique de contact pour des échantillons de type fil sur plaque et bille sur plaque.

Buts spécifiques

Bien que la géométrie et la taille des échantillons sont similaires, pour des forces de contact équivalentes, nous devrions obtenir une variation de résistance de contact en fonction du nombre de cycles similaires pour les deux montages. La rigidité du montage joue un rôle important et le montage fil/plaque est plus flexible.

CHAPITRE 2

MÉCANISMES DE DÉGRADATION DES CONTACTS ÉLECTRIQUES

2.1 Introduction

La fonction principale d'un raccord électrique est d'assurer le passage du courant sans interruption. Pour qu'un contact électrique soit efficace, les paramètres suivants sont critiques: les dimensions (surface de contact), l'état des surfaces de contact, la pression (la force de serrage), la résistance électrique de contact et la protection contre les effets néfastes de l'environnement. La dégradation par le fretting des contacts électriques est un phénomène répandu et qui a des répercussions importantes sur les équipements électriques. Il peut causer des dommages importants et provoquer des pertes de temps et des mises hors service. Comme nous allons le voir, les contacts électriques de par leur fonction et leur environnement sont soumis à divers mécanismes de dégradation qui sont pour la plupart inter-reliés.

2.2 Contact électrique

Un contact électrique est composé de deux surfaces métalliques en contact. La figure 1 montre le profil agrandi de la surface d'une plaque métallique qui a été limée (fig. 1a) et brossée avec une brosse métallique (fig. 1b). Cette figure montre que bien qu'une surface peut avoir l'air relativement lisse, toute surface solide est très rugueuse à l'échelle microscopique. Il a été établi que les surfaces réelles de contact ne sont planes qu'en apparence [Holm67]. Elles se présentent en fait comme une succession de montagnes et de vallées. Ainsi, lorsque deux surfaces sont amenées l'une contre l'autre, il n'y a contact physique qu'aux endroits où les sommets des montagnes se touchent.

Ceci implique donc que la surface de contact réelle se limite à une fraction très réduite de la surface de contact apparente. Dans un état de déformation purement élastique, cette surface est évaluée à moins de 1% de la surface de contact apparente.

Une autre particularité d'une surface métallique est qu'en surface, les couches ne sont pas toujours homogènes. Tel que montré à la figure 2, la surface d'un métal est souvent composée d'une succession de 5 couches.

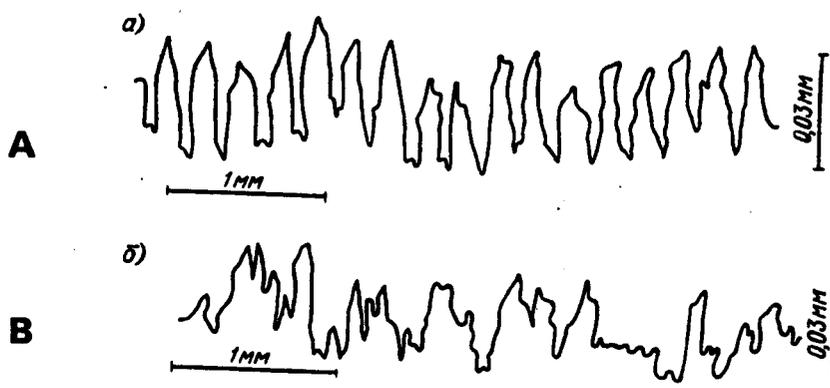


Figure 1 Topographie d'une surface métallique rayée à la lime (1a) et avec une brosse métallique (1b) [image MBI Interface]

En surface, on retrouve une couche de contaminant, suivie d'une couche de gaz absorbé, vient ensuite une couche d'oxyde dans la plupart des cas.

Par la suite, on retrouve le métal qui est composé d'une couche qui a été travaillée mécaniquement par le procédé de mise en forme utilisé et dont la microstructure sera alors différente du métal de base.

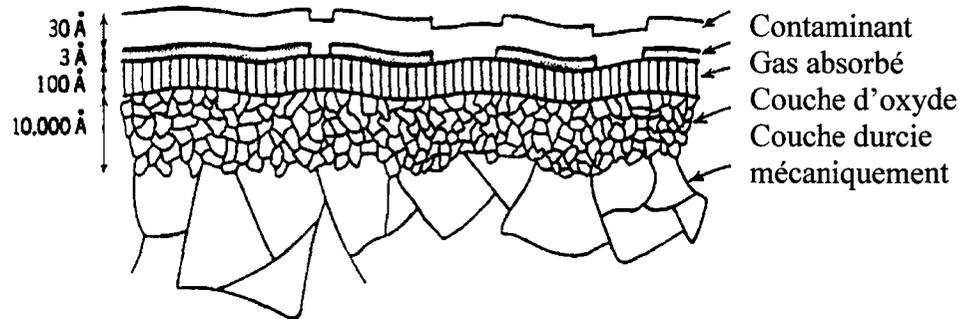


Figure 2 Topographie typique d'une surface métallique de contact [image MBInterface]

2.3 Passage du courant dans une interface métallique

Au niveau de la jonction de contact, le courant s'écoule donc à travers une très petite surface comparativement à la surface apparente. Cette surface conductrice de courant est la somme de toutes les petites zones de contact (figure 1). La résistance électrique de contact, par suite de la diminution de la surface réelle du contact est appelée résistance de constriction (R_C). La valeur de R_C est liée aux propriétés des métaux en présence, telles que la dureté et la résistivité, la résistance à l'oxydation, la déformation plastique, etc. Cet effet est illustré à la figure 3 où l'on montre la différence entre le passage du courant dans une interface (point A à B) comparativement au passage dans une section continue.

Le passage du courant à travers les points de contact peut avoir pour effet d'élever de façon significative la température locale des points de contacts. Ces points de contact ont alors une température très supérieure à la température superficielle ou apparente du joint. Cet écart de température est appelé surtempérature. Sa valeur dépend de la taille des points de contact et du courant total qui traverse l'ensemble des points de contact [Slade99].

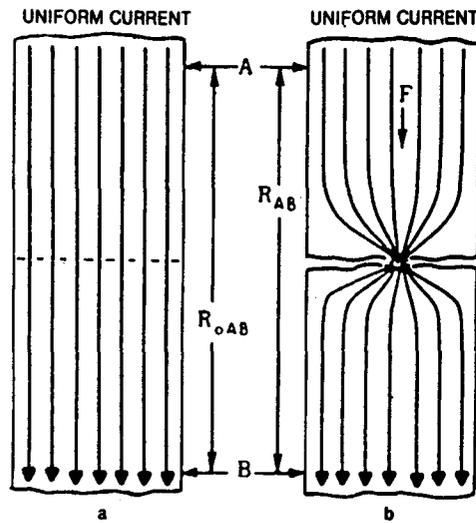


Figure 3 Schéma de la résistance de constriction [Slade99]

En tenant compte de la résistance de constriction, la valeur de la résistance électrique de l'interface $A-B$ ainsi que la valeur de la surtempérature d'un point de contact appelé "*a-spot*" [Holm67] peuvent se calculer de la façon suivante :

$$R_{AB} = R_C + R_F + R_B \quad (2.1)$$

avec

$$R_C = (\rho_1 + \rho_2)/4a \quad (2.2)$$

où

ρ_1, ρ_2 = Conductivité électrique des deux matériaux si différents

R_F = Résistance de la couche d'oxyde σ_F/na^2

σ_F = Résistance par unité de surface du matériau (Ohm/mm²)

R_B = Résistance volumique électrique du matériel (Ohm)

Lorsqu'il y a circulation uniforme du courant dans les points de contacts "*a-spots*", la température du point de contact (T_C) est en générale supérieure à celle du reste du matériau (T_B). L'augmentation de la résistance de constriction par rapport à la résistance normale du reste du contact peut alors s'exprimer en fonction de la valeur de la chute de

la tension électrique (U) entre les deux surfaces et la constante de Lorenz. Le terme ($T_c - T_b$) appelé surtempérature du point de contact et donnée par :

$$T_c^2 - T_b^2 = U^2 / 4L \quad (2.3)$$

où

T_c = Surtempérature (°K)

T_b = Température du matériel (°K)

U = Différence de potentiel électrique (V)

L = Constante de Wiedeman-Franz Lorenz = $2.45 \times 10^{-8} \text{V}^2 \text{K}^{-2}$

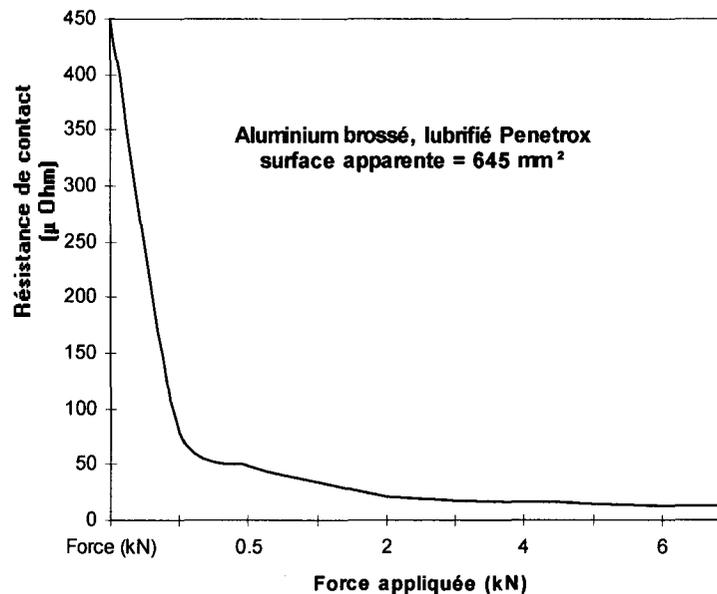
La relation montre qu'une faible hausse de tension électrique à l'interface (U) peut produire une hausse importante de la surtempérature. Cette hausse peut être assez importante pour ramollir et/ou faire fondre une partie de la surface du contact. Il est important de noter que ce modèle n'est valide qu'en tenant compte des hypothèses suivantes :

- la constriction n'est purement que métallique et qu'il n'a pas présence dans le point de contact d'oxyde ou d'une couche de contaminant;
- la perte de puissance due à la constriction est compensée par la conduction thermique;
- les lignes équipotentiels de courant et les lignes isothermiques sont coïncidentes;
- la tension électrique du contact U et la température T_b sont mesurées à des points qui n'ont que des gradients de tension et de température faibles.

2.4 Force de contact et fini de surface

La variation de la force de contact a un effet important sur la résistance électrique du contact, cet effet est illustré au graphe 1. On y montre la variation de la résistance de

contact en fonction de la force appliquée sur un joint d'aluminium brossé et dont l'interface est recouverte de lubrifiant à contact. On note que la résistance de contact décroît rapidement avec l'augmentation de la force appliquée sur le joint. De plus, la résistance de contact est aussi influencée par la qualité du fini de surface. Par exemple, la force de contact (effort de serrage) nécessaire pour atteindre la zone où la résistance de contact est stable est plus grande pour des pièces dont le fini de surface est du type miroir que pour des surfaces brossées et lubrifiées.



Grappe 1 Résistance de contact en fonction de la force pour des raccords boulonnés [Brau88-2]

Dans le cas d'un mauvais raccord, la surtempérature est à l'origine d'une élévation de température apparente s'accompagnant de l'accélération de certains processus comme l'oxydation, le fluage, la corrosion par fretting, la formation de phases intermétalliques, etc.... Ces mécanismes conduisent tous à une diminution de la surface de contact et à un accroissement de la résistance électrique. Il est évident que la description de la surface de contact d'un connecteur représente un paramètre qualitatif. Cette surface doit être assez importante pour que sa dégradation à long terme laisse une réserve de contact qui

empêche toute surchauffe du joint. Malheureusement les connaissances actuelles des divers phénomènes responsables de la défaillance des contacts électriques ne permettent pas de déterminer avec suffisamment de précision la surface effective de contact qui devrait caractériser chaque type de joint.

2.5 Mécanismes de dégradation

On dit que le joint électrique est en défaillance, lorsque la température apparente du joint, dans des conditions normales de transfert de courant, dépasse nettement la température du conducteur. Selon l'environnement dans lequel se trouvent les contacts, le type de matériaux utilisés et la quantité de courant transportée, le contact va se dégrader plus ou moins rapidement. La plupart des phénomènes de dégradation des contacts sont inter-reliés. Nous allons les passer en revue rapidement et décrire les interactions.

2.5.1 Fretting-corrosion

La figure 4 montre un connecteur de puissance ayant subi des dommages par le fretting. On y remarque l'apparence corrodée de la surface. Cette corrosion amène la présence de débris et d'oxydes qui vont contribuer à la dégradation de la surface et provoquer une augmentation de la résistance électrique et de la température du connecteur. Le fretting est par définition le frottement alterné de très faible amplitude entre deux surfaces. Les évaluations précédentes des mécanismes de dégradation des contacts électriques sont obtenues à partir de mesures de résistances de contact statique. Cependant, dans les installations électriques, les contacts sont toujours soumis à des contraintes alternées ou à des micro-déplacements. Il en résulte une dégradation par corrosion et fretting simultanément, phénomènes définis comme détérioration de la surface lorsque deux matériaux en contact sont soumis à des mouvements microscopiques d'oscillation de très faible amplitude (0 à 100 μm).

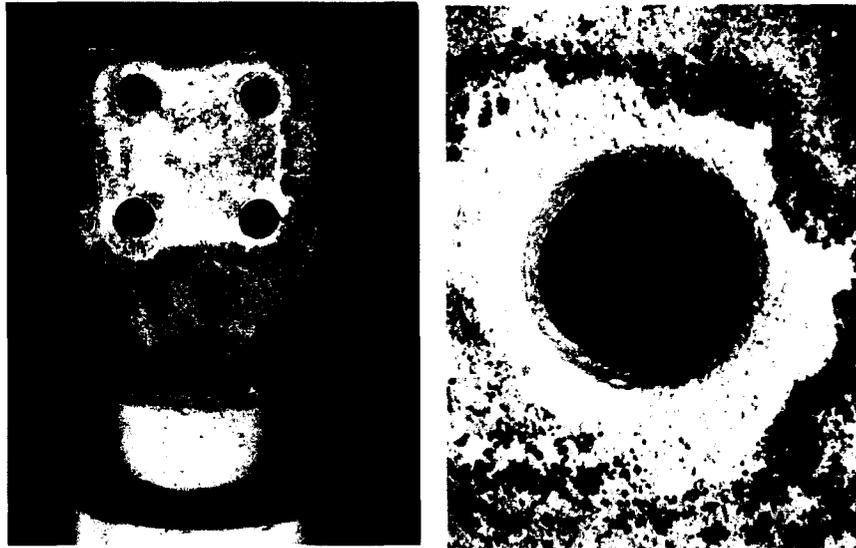


Figure 4: Connecteur de puissance dégradé par le fretting [image MBI Interface]

La dégradation des contacts par le fretting s'accompagne d'une accumulation de petits débris métalliques qui s'oxydent rapidement. Ceci a pour effet de provoquer une dégradation de la résistance de contact et une interruption du passage du courant. Ce phénomène a des répercussions considérables sur le plan pratique puisque les micro-déplacements de pièces en contact peuvent être causés par la dilatation thermique différentielle des métaux, par des vibrations mécaniques, par la relaxation des contraintes ou par l'échauffement des contacts lorsqu'on interrompt et rétablit le courant [Bock74, Antl85, Souter88]. Un autre exemple est celui des connecteurs de conducteurs aériens qui sont soumis en même temps à la dilatation thermique causée par la fluctuation du courant dans la ligne et la présence des vibrations éoliennes sur le conducteur [Gagn03].

2.5.2 Oxydation

L'oxydation de l'interface entre deux métaux en contact est considérée comme le plus important mécanisme de dégradation d'un raccord électrique. Dans le cas du cuivre, la présence d'oxygène dans l'environnement provoque une oxydation continue du

contact intermétallique, ce qui cause une augmentation accélérée de la résistance de contact. Pour le cuivre par exemple, les oxydes de cuivre s'épaississent, s'exfolient, et décollent de la surface du métal. Entre 40°C et 200°C, la croissance de l'épaisseur du film d'oxyde cuivreux Cu_2O est continue et dépend de la température. À des températures supérieures à 200 °C, d'autres oxydes de cuivre se forment en consommant continuellement la surface du métal. De plus, les oxydes de cuivre sont souvent semi-conducteurs avec une valeur de résistivité de $10^{10} \mu \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$. En présence de soufre dans l'environnement, une surface de cuivre se ternit en raison de la formation de sulfure d'hydrogène. La croissance du film terni est fortement liée au taux d'humidité ambiante. L'humidité peut réduire la croissance du film quand la concentration des sulfures est basse ou l'augmenter quand la concentration est élevée.

2.5.3 Corrosion galvanique

Dans un système où deux métaux de natures différentes sont en contact en présence d'un électrolyte, la corrosion galvanique est le plus important mécanisme de dégradation des contacts électriques. Dans un contact électrique, le sens du courant transporté entre les deux métaux peut cependant avoir un effet sur la tension galvanique totale entre les deux métaux. Lorsque deux métaux différents sont en contact dans un milieu corrosif, ils forment une pile qui produit un courant en consommant le métal anodique. Le processus continue tant que le milieu corrosif subsistera ou jusqu'à ce que l'anode soit entièrement consommée. Les dégâts causés par la corrosion galvanique augmentent avec la différence de potentiel mesurée entre les éléments métalliques dans le milieu considéré. Il faut donc protéger les deux métaux en utilisant des méthodes palliatives comme le plaquage avec un métal possédant un potentiel électrochimique intermédiaire, l'utilisation d'une graisse ou l'utilisation d'une anode sacrificielle.

2.5.4 Dilatation thermique

Lors d'une augmentation de température, si les deux métaux en contact ont des coefficients de dilatation différents, il est possible selon la géométrie du contact qu'il y ait diminution de la surface de contact. Ceci peut se produire par exemple, dans les géométries qui sont susceptibles aux faibles variations de l'alignement des pièces en contact. Ceci pourrait entraîner une augmentation de la résistance de contact et par conséquent une élévation de la température du raccord. Ce processus est à la fois itératif et cumulatif, le raccord se dégrade progressivement jusqu'à la défaillance. Si le coefficient de dilatation d'un des deux métaux est de beaucoup supérieur à l'autre (ex. acier et cuivre) il peut y avoir apparition d'un autre mécanisme de dégradation appelé rochetage thermo-élastique. Dans un joint boulonné (acier/cuivre), lorsque l'on utilise un boulon en acier, un serrage excessif de ce dernier peut entraîner, pendant la phase d'échauffement, la déformation plastique des conducteurs (cuivre). Subséquemment, lors de la phase de refroidissement les conducteurs ne peuvent plus retrouver leurs dimensions originales. Si le joint est soumis à une succession de cycles d'échauffement et de refroidissement, il pourra se desserrer et ainsi provoquer une augmentation de la résistance de contact du joint en même temps que de sa température [Brau88-2, Brau99, Kongs78].

2.5.5 Relaxation des contraintes et fluage

Certains métaux sont plus sujets au fluage que d'autres, tel est le cas de l'aluminium s'il est soumis à une contrainte constante pendant longtemps. La vitesse de fluage augmente avec la température et le niveau de contrainte. La relaxation des contraintes est aussi un phénomène qui dépend du temps. Cette relaxation se produit à des niveaux de contrainte élevés et se manifeste par une baisse de la pression due aux changements de structure subis par le métal. Le passage d'une déformation élastique à une déformation plastique a pour effet de réduire considérablement les pressions résiduelles de contact à l'intérieur

du joint. Cette réduction prend des proportions telles qu'il peut y avoir accroissement de la résistance de contact et le phénomène risque d'entraîner la défaillance du raccord.

Il a aussi été démontré que les propriétés plastiques des métaux peuvent être très fortement influencées par les champs électriques. L'effet de ces champs s'appelle électroplasticité et se manifeste par une forte augmentation de la ductilité. Il est très difficile d'évaluer l'importance de l'électroplasticité sur le comportement des contacts électriques à cause de la rareté des données publiées sur le sujet. Cependant, si l'électroplasticité est effective et possède sur le fluage et la relaxation des contraintes un effet aussi marqué que le laissent supposer les données initiales, son importance pourrait être très grande pour la compréhension des phénomènes des contacts électriques.

2.5.6 Inter-diffusion et composés intermétalliques

Plusieurs métaux ont la particularité lorsqu'ils sont en contact mécanique de permettre une dissolution mutuelle partielle ou totale de l'un dans l'autre. Certains sont insolubles et un nombre de métaux se combinent ensemble pour former une phase intermédiaire appelée phase intermétallique. La présence de ces phases intermétalliques dans un contact électrique s'avère souvent néfaste au rendement électrique du contact, particulièrement sous fretting. Ces phases peuvent souvent être multiples, par exemple dans le système Au/Al, il y a cinq intermétalliques de composition différente qui peuvent se former.

La croissance des phases intermétalliques est gérée par un mécanisme de diffusion de l'un dans l'autre par l'intermédiaire des vides dans le cristal qui sont rendus disponibles par la présence de défauts, de contamination, d'impuretés et la présence de joint de grains et de contrainte mécaniques. La vitesse à laquelle cette diffusion se produit est spécifique à chaque couple métallique et aussi à la direction de la diffusion. La vitesse de diffusion est aussi fonction de la température. Si un des deux matériaux est présent en

proportion volumique beaucoup plus importante que l'autre, la diffusion se produit rapidement. Le métal qui est minoritaire apparaît alors comme complètement submergé par l'autre. La diffusion rapide d'un métal dans un autre peut causer la formation de vides à l'intérieur du matériau résultats.

La croissance des couches intermétalliques et leur composition respective par rapport aux deux métaux de base va varier selon la vitesse de diffusion et la quantité de métal disponible. L'épaisseur de la couche intermétallique formée est estimée à partir de l'équation suivante :

$$h = (Dt)^{1/2} \quad (2.4)$$

Où h est l'épaisseur de la couche intermétallique, t est le temps et D est le coefficient de diffusion qui est donné par l'équation d'Arrhénius :

$$D = D_0 \exp(-Q/kT) \quad (2.5)$$

Où D_0 est la constante de diffusion, Q est l'énergie minimale d'activation du procédé, k est la constante de Boltzman et T est la température absolue.

2.6 Interrelation des mécanismes de dégradation des contacts électriques

La température du contact a un rôle important à jouer dans la plupart des phénomènes de dégradation vus dans les sections précédentes. Ils sont tous pour la plupart interdépendants, cette interrelation est schématisée à la figure 5.

On y voit que la dilatation thermique peut provoquer le rochetage thermo-élastique et le fretting. Le fretting contribue à la réduction de la zone de contact et le rochetage provoque le fluage et la relaxation de contrainte, ce qui amène la corrosion et

l'oxydation par l'apport d'oxygène dans la zone de contact. Tout ceci peut amener à la progression des phases intermétalliques si on est en présence de matériaux le permettant. Les intermétalliques étant pour la plupart mauvais conducteurs, on assiste alors à une hausse de la température du contact, ce qui aura pour effet de redémarrer le cycle.

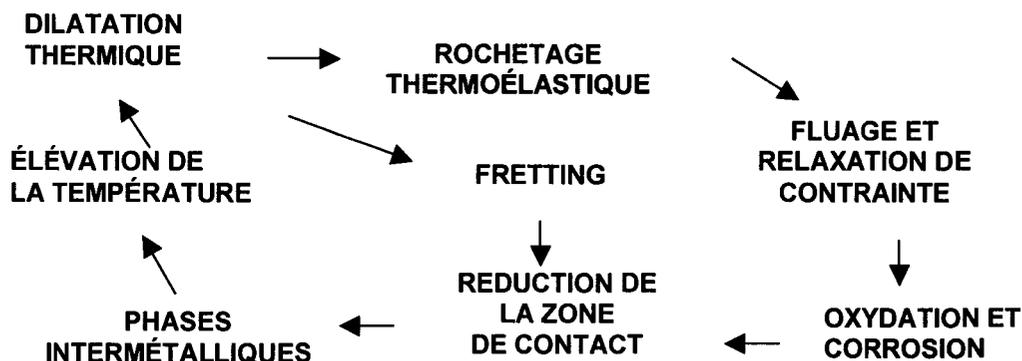
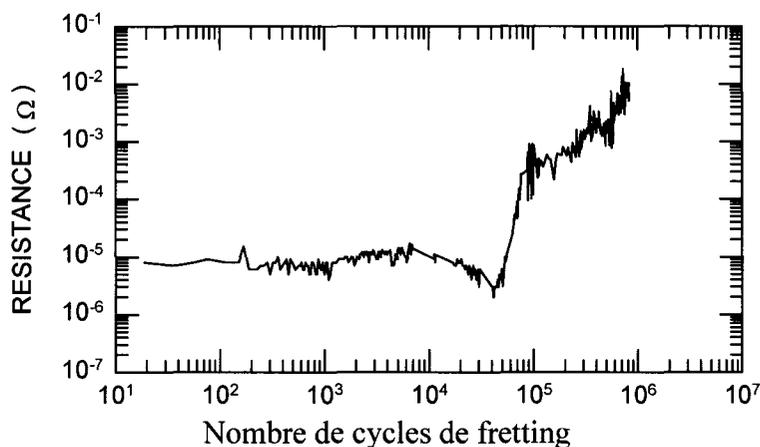


Figure 5 Interrelation entre les divers mécanismes de dégradation des contacts électriques

2.7 État de l'art sur le fretting des contacts électriques

Puisque le domaine d'activité de nos travaux se situe à la fois en même temps dans le domaine de la tribologie et dans la dégradation des contacts électriques, une recherche bibliographique a été réalisée dans les deux domaines. Nous allons dans le présent chapitre passer en revue les différents auteurs actifs dans le domaine de la dégradation par le fretting des contacts électriques. Afin de bien cerner les travaux qui nous intéressent, la revue de littérature s'est concentrée sur les aspects ayant trait à l'investigation de la dégradation par le fretting tant du point de vue métallurgique qu'électrique, ainsi que l'investigation de la tribologie des contacts électriques. La nature de la dégradation des contacts électriques par le fretting dépend de plusieurs paramètres. Le paramètre le plus utilisé dans les études de la dégradation par le fretting des contacts électriques est la valeur de la résistance de contact. La figure 7 montre le résultat d'un essai de dégradation par le fretting d'un contact fil sur plaque cuivre-cuivre

[Gagn00]. Ce type de représentation de la résistance de contact en fonction du temps (nombre de cycles de fretting) est très utilisée par la plupart des auteurs, tant pour l'étude des contacts secs que pour les contacts lubrifiés. Le graphe 2 montre la valeur de la résistance électrique sous un courant CC, avec les paramètres montrés sur la figure. Au début de l'essai, la résistance du contact est relativement stable et se dégrade à partir d'un temps qui est caractéristique des matériaux, de l'amplitude de déplacement, de la force de contact et du courant injecté.



Graphe 2 Variation de la résistance électrique d'un contact fil sur plaque cuivre-cuivre avec force de contact = 400 grf, fréquence = 1Hz, amplitude de déplacement = 100 μm, et courant = 50 mA CC [Gagn00]

Certains auteurs travaillent à modéliser le phénomène de la dégradation par le fretting. Cependant, aucun modèle unifié ne permet pour l'instant de prédire la dégradation par le fretting pour des paramètres de contacts électriques donnés et plusieurs théories ont été proposées par différents auteurs [Lee87, Hoo87]. Les premières communications sur le fretting dans les contacts électriques relatent les problèmes observés dans les relais et les interrupteurs des postes téléphoniques. [Fair64, Camp53, Wate72, Gole74, Hurr70, Bock74]. L'identification formelle du fretting comme mécanisme de dégradation des contacts électriques remonte à 1974 [Gole74]. L'étude de Brock avait été réalisée sur différents matériaux avec un montage dont le déplacement était généré par une dilatation

thermique. Leurs principales conclusions étaient que l'élévation de la résistance électrique de contact dans les échantillons secs ayant été soumis au fretting était causée par la croissance en surface d'une couche d'oxydes.

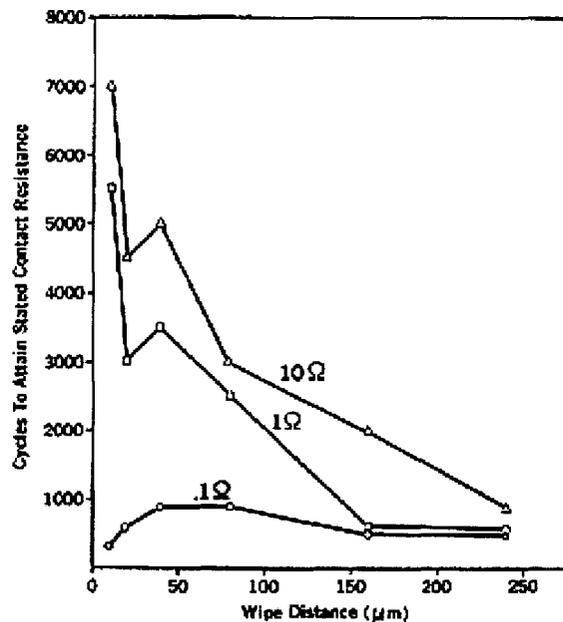
Depuis, des études approfondies ont été réalisées sur divers types de connections électriques, notamment, dans le monde de l'électronique, de l'industrie automobile et des "utilités" électriques. Il en est retenu que la dégradation par le fretting est un élément majeur des problématiques de mise hors services des connections électriques non lubrifiées [Hurr76]. Il semble que ce phénomène est inhérent à toutes les connections et tous les matériaux de contact électrique tel que l'or [Tian91], le palladium [Antl82, Trud96], l'étain [Brau89-1], l'argent [Souter88], le nickel, le cuivre et l'aluminium [Brau76, Brau88-1].

La littérature sur les contacts électriques rapporte que le fretting à forte amplitude est plus néfaste que celle du fretting à faible amplitude [Antl85-2], [Slade99]. De plus ils avançaient que la force de contact avait une influence sur le nombre de cycle avant l'arrêt complet du passage du courant. Antler [Antl82, Antl85, Antl85-2] et Whitlam [Whitl86] ont pour leur part démontré que pour le nickel/palladium, la dégradation du contact était due à deux phénomènes, soit la présence des résidus polymériques de friction et des oxydes du nickel. Dans ce cas, les résidus polymériques proviennent de l'absorption de polluants organiques dans l'air présent sur la surface de fretting.

2.7.1 Effet de l'amplitude et de la fréquence

Braunovic [Brau76, 86, 88-1, 88-2, 89-1, 89-2, 90, 92, 94, 99] a produit plusieurs ouvrages sur la dégradation des contacts électriques. Il a mis au point divers montages expérimentaux pour étudier les effets du fretting et de la fatigue thermique dans les connections électriques. Il a travaillé à évaluer le comportement avec différents matériaux de contact secs et avec lubrifiants tel que le cuivre, l'aluminium, l'étain,

l'argent et aussi certains revêtements nanocristallins [Trud96]. Il a montré que pour les connecteurs de puissance en aluminium on peut observer différents mécanismes de dégradation de la surface soumise au fretting tel que le claquage et l'arcage, l'abrasion, l'adhésion, et la délamination. De plus il a démontré que l'amplitude du mouvement de fretting ainsi que la force de contact ont un effet sur la vitesse de dégradation du contact [Slade99]. Le graphe 3 montre un exemple de l'effet de l'amplitude du déplacement sur le nombre de cycles nécessaire à l'atteinte d'une valeur cible de la résistance électrique pour un contact 60Sn40Pb-60Sn40Pb, force = 0.5N, fréquence = 8 Hz [Slade99]. Des courbes de résistance de contact sont tracées en fonction de l'amplitude du fretting en abscisse et du nombre de cycles nécessaire pour atteindre une valeur de résistance de contact cible en ordonnée. On y remarque que plus l'amplitude du mouvement est grande, moins il faut de cycles pour obtenir une valeur de résistance élevée.



Graphe 3 Amplitude du mouvement de fretting (X) par rapport au nombre de cycles de fretting (Y) pour différentes valeurs de résistance électrique d'un contact 60Sn40Pb-60Sn40Pb, force = 0.5N, fréquence = 8 Hz [Slade99]

Les auteurs dans le domaine des contacts électriques définissent le fretting comme étant d'une amplitude du mouvement de 100 μm et moins. Les essais de dégradation par fretting se font ainsi avec des amplitudes rarement supérieures à 150 μm . On doit cependant faire distinction entre les auteurs qui étudient le mode de dégradation associé à l'insertion et à l'extraction des connecteurs enfichables. Typiquement, pour des essais d'usure de ce type de connecteurs, l'amplitude de déplacement est de 2000 à 2500 μm , on appelle alors ceci le macro-wear [Aukl03, Noël012].

Pour des amplitudes de 10 à 50 μm , l'augmentation de l'amplitude accélère la dégradation alors que l'augmentation de la force de contact la ralentit. Castel, [Castel84] a pour sa part réalisé beaucoup d'essais de fretting sur le cuivre, le bronze le nickel et l'aluminium à des amplitudes de 10 à 150 μm , des forces de contacts de 0.1 à 0.6 N et des fréquences de mouvement entre 4 à 150Hz. Il rapporte que l'augmentation de la force réduit l'augmentation de la résistance de contact, l'augmentation de l'amplitude du mouvement accélère la vitesse de la dégradation et qu'en dessous de 50 Hz, la fréquence n'a pas ou peu d'influence. De plus, il a aussi rapporté que pour des amplitudes de mouvement inférieures à 3 μm le fretting n'a pas d'effet sur le contact pour ces matériaux. Slade [Slade99] explique que plus la fréquence de mouvement est faible et plus la dégradation devrait se faire rapidement. Ceci s'explique par la dynamique de la croissance des oxydes. En effet, avec un mouvement de fréquence faible, la couche des oxydes a le temps de croître alors qu'à fréquence élevé, la couche d'oxydes est mince et continuellement nettoyée par le passage suivant.

Abbott [Abb97] et McCarthy ont travaillé sur l'étain et la stabilité du contact électrique en fonction de la progression de la dégradation par le fretting. Ces travaux ont montré que le chauffage généré par le passage courant et la température ambiante ont un effet sur la vitesse de dégradation. Le phénomène est cependant complexe et il implique le taux d'oxydation de l'étain et le ramollissement avec la température.

Pour la plupart des études recensées, l'amplitude de déplacement varie de 10 à 150 μm et les fréquences entre une fraction de Hz à des dizaines de Hz. Malluci [Mall00, Mall03, Mall96, Mall97, Mall99] a pour sa part réalisé de nombreuses études tant expérimentales que par modélisation sur le fretting des contacts électriques en analysant l'influence de l'amplitude, de la force de contact, de la température et de la vibration pour reproduire le phénomène.

2.7.2 Effet du type de courant

La plupart des études recensées utilisent un courant continu pour la mesure de la résistance de contact. Peu d'études ont évalué la résistance au fretting à l'aide d'un courant alternatif CA [Brau76]. La valeur du courant est souvent très faible ($\cong 50 \text{ mA}$), de façon à ne pas dégrader thermiquement la surface ou à provoquer la conduction pas claquage à travers la couche d'oxydes en surface.

2.7.3 Montages expérimentaux

Les travaux recensés en littérature ont été réalisés à l'aide de montages expérimentaux qui reproduisent le déplacement par divers types de mécanismes. Dans ces montages, le mouvement est généré par divers mécanismes et le déplacement peut se faire par de glissement, en rotation, en bascule et même par vibration. La plupart, sauf Braunovic [Brau76, Brau88, Brau89, Brau90] utilisent des montages à un échantillon à la fois seulement. Hubner-Oberland et Minuth [Hub99] réalisent bien des essais sur plusieurs connecteurs à la fois, mais leur montage ne permet pas de mesurer le déplacement des échantillons de façon individuelle ou d'être certain de l'amplitude de déplacement de chacun des connecteurs.

2.7.4 Mesure de la force de friction

Quelques auteurs ont mesuré la force de friction des contacts soumis au fretting. La plupart, pour des études sur l'impact des lubrifiants à contact électrique. Aukland [Aukl03], a récemment montré que le calcul de la valeur du travail du frottement pouvait être utilisé comme paramètre indicateur de la performance des lubrifiants de contact.

La valeur du travail de frottement est obtenue par l'expression suivante :

$$W_L = \sum_{i=1}^n \mu_i F_n d_i \quad (2.3)$$

où

W_L = Travail effectué par la friction pour l'échantillon durant $n/2$ cycles.

μ_i = Coefficient de friction moyen durant un cycle.

F_n = Force normale sur le contact.

d_i = Amplitude du déplacement (mm).

Cet auteur montre que la valeur du coefficient de friction pour déterminer la zone de transition entre un régime d'usure et le régime sévère. Il a établi que la valeur de 0.4 comme coefficient de friction correspondant au point de transition entre les deux régimes pour le contact or-nickel. Ils rapportent que la valeur du coefficient de friction est fonction du lien métallique et de la force du lien de l'interface, ce qui fait en sorte que le point de transition sera différent selon les matériaux.

Noël [Noël101, Noël199] utilise un montage dédié à l'étude du fretting avec lequel il est possible de mesurer la résistance de contact et le coefficient de friction. Ils ont utilisé ce montage pour comparer l'efficacité de diverses graisses à contact et rapportent le lien direct entre une force de friction faible et constante et une faible dégradation de la surface. Bahal [Bahal01] a récemment développé un montage permettant de réaliser des

essais en fatigue d'insertion et d'extraction sur 8 connecteurs simultanément. Finalement, Gabel, [Gabel01] a développé un montage avec lequel il mesure la dégradation de la résistance de contact et la force de friction pour des amplitudes de 1100 μm . Ils ont observé que pour des contacts, de nickel plaqué d'or, il ne leur a pas été possible d'établir un lien clair entre la résistance de contact et le passage du coefficient de friction à une valeur supérieure à 0,4, tel que rapporté par Antler [Antler87].

2.7.5 Lubrifiants et matériaux

L'utilisation de lubrifiants pour les contacts électriques a montré dans le passé son efficacité à améliorer de façon substantielle la fiabilité et la performance des contacts électriques [Frei76]. Les utilités électriques ont à évaluer diverses solutions de conducteurs et d'équipement pouvant opérer à des températures très élevées jusqu'à 300 °C [Kawa91, Tuns01, 3M04]. Ce type de solutions va considérablement augmenter les contraintes sur les points de contact. Plusieurs articles ont été réalisés sur le sujet de la performance des lubrifiants de contact [Brau85, Brau92, Brau99, Antl63, Antl85, Noel99]. Braunovic a évalué plusieurs composés chimiques pour des barres conductrices de cuivre et d'aluminium. Il a classé par indice performance plusieurs graisses disponibles sur le marché à l'aide d'un système de points suite à divers essais auquel ont été soumises ces graisses.

Antler a démontré que les composés à base de fluor ont un grand potentiel comme lubrifiant de contact, due à leur bonne stabilité thermique, leur faible tension de surface, faible viscosité et le fait qu'ils réagissent peu avec l'environnement [Antler87]. Les propriétés tribologiques des connecteurs enfichables recouverts d'étain ont été évaluées en détails par Noël et al. [Noël01]. Ils ont démontré que la composition moléculaire des lubrifiants à base de fluor a un effet sur la viscosité et la tension de surface. La très grande majorité des composés évalués en littérature ont cependant des températures maximales d'utilisation de l'ordre de 200°C.

2.7.6 Le plomb et les alliages à contact électrique

L'utilisation du plomb est interdite dans la peinture, le carburant, les boîtes de conserve, les métaux d'apport pour automobiles, les ampoules, ainsi que les métaux d'apport et supports pour la plomberie. Elle est cependant toujours autorisée dans les métaux d'apport pour composants électroniques. Cependant, l'agence américaine pour la protection de l'environnement a demandé aux industries américaines de réduire l'utilisation de matériaux dangereux.

Le recyclage des métaux d'apport dans les produits électroniques est possible, mais peut engendrer un coût important. Le marché japonais de l'électronique grand public montre l'exemple en proposant les produits verts suivants: téléphones portables, ordinateurs bloc-notes, magnétoscopes, modules de mémoire, lecteurs de disque et systèmes automobiles. En Europe, la directive WEEE impose le brasage sans plomb d'ici juillet 2006 et la mise en place du sans plomb est rigoureusement contrôlée. En Amérique du Nord et du Sud, les évaluations du processus sans plomb sont en cours : le sans plomb pourrait bientôt devenir une réalité. À ce jour, la date la plus probable d'entrée en vigueur de l'interdiction du plomb dans l'électronique en Europe est le 1^{er} janvier 2006.

La majorité des composants électroniques ont des terminaisons protégées par des alliages, entre autres, au plomb. Avec l'utilisation de brasures sans plomb, les températures de procédé approchent 260°C. Or, avec l'alliage étain/plomb, les composants et les substrats étaient prévus pour résister à des températures maximales de 240 °C. Au-delà de cette limite, les condensateurs électrolytiques, les relais, les bobines, les plastiques protecteurs de composants, les interfaces et les substrats, sont affectés thermiquement.

Pour le revêtement des connexions, plusieurs alliages peuvent être utilisés: nickel-palladium-or, étain-argent, étain-bismuth, étain-cuivre, étain pur. L'étain pur semble être la solution préférée par beaucoup d'industriels. Les revêtements sont faciles à mettre en

œuvre et présentent une bonne soudabilité. Le problème majeur rencontré avec ce matériau est la formation de filaments mono-cristallins (*whiskers*) pouvant causer des courts-circuits [Chud02]. On estime que 60 à 70 % des cartes de circuit imprimé sont recouvertes de brasure étain-plomb, généralement par nivelage à air chaud de la brasure (procédé HASL).

Les revêtements sont appliqués aux surfaces en cuivre des cartes de circuit imprimé pour préserver son aptitude au brasage et protéger les conducteurs en cuivre de la corrosion. Le passage aux alliages sans plomb dans l'électronique implique le remplacement d'un métal courant et bon marché par des alliages incluant des métaux tels que l'étain et l'argent. Outre les conséquences économiques liées au seul surcoût de ces métaux, ce changement implique l'adaptation des procédés de brasage et des méthodes de contrôles non destructifs.

À l'état liquide, le plomb pur, n'est pas un métal qui adhère bien. Lorsque l'on lui ajoute de l'étain, il adhère très bien à l'or, l'argent, le cuivre et aussi l'étain. De plus, il adhère à une température plus basse et est aussi plus facile à utiliser. De nouveaux alliages pour les procédés de soudure et brasure sont présentement offerts par les manufacturiers [Aim04, Lead04-1, Lead04-2]. Certains travaux ont été récemment réalisés sur le comportement de ces alliages faces aux mécanismes classique de dégradation des contacts électriques [Fields04, Roub01, Zheng00]. Des travaux supplémentaires sont cependant nécessaires pour approfondir le sujet, notamment sur le comportement sous fretting, la résistance à la fatigue thermique de nature électrique et la formation des couches intermétalliques.

Puisque la plupart des alliages sans plomb disponible commercialement, sont à forte base d'étain, il existe la possibilité que ceux-ci soient susceptibles à la formation de ces couches intermétalliques et/ou à la formation des aiguilles d'étain. Dans un système où il existe la possibilité de formation des intermétalliques tel que le cuivre sur l'aluminium,

les couches intermétallique sont pour la plupart fragiles et peuvent mettre en danger l'intégrité structurale du contact. Il est donc important de déterminer dans les cas des nouveaux alliages à contacts qui sont exempt de plomb, si ceux-ci présentent aussi ce type de faiblesse.

2.8 Conclusion

Tel que nous l'avons expliqué à l'introduction, les auteurs actifs dans le domaine du fretting des contacts électriques ne sont pas nécessairement actifs dans le domaine du fretting en général. Ce pour quoi, une seconde revue de littérature sur la tribologie du fretting est présentée au chapitre suivant. En résumé, la revue de littérature réalisée dans les publications propres au domaine des contacts électriques montre des opportunités de contribution originales dans divers sujets. La dégradation par le fretting des contacts électriques serait inhérente à toutes les connections et tous les matériaux de contact. Des études ont été réalisées dans le domaine entre 0 et 150 μm et aussi entre 2000 et 2500 μm . Tous les paramètres incluant la fréquence, l'amplitude, la force de contact et le type et valeur du courant ont une influence sur la vitesse de la dégradation de la résistance de contact. Nous avons défini des objectifs liés à la dégradation avec courant électriques qui sont distincts de ceux liés à la tribologie et qui seront présentés au chapitre suivant. Des essais ont donc été réalisés de façon à approfondir les sujets suivants :

- déterminer si un courant de faible intensité tel qu'utilisé en littérature a un effet sur le coefficient de friction et le taux d'usure du contact bille-plaque dans la plage d'amplitude entre 100 et 1000 μm ;
- peu de travaux ont été réalisés sur la dégradation par le fretting des contacts avec courant alternatif (CA). Nous avons donc réalisé une série d'essais à cet effet sur le montage de fretting fil-plaque;

- la plupart des lubrifiants à contact électrique n'étant pas formulés pour des applications à haute température, nous avons évalué quelques composés pour des applications potentielles de contact à haute température;
- l'apparition des nouveaux alliages à contact sans plomb sur le marché couplé au peu de travaux en littérature sur leur comportement sous fretting et sur la formation ds intermétalliques nous a amené à réaliser des essais de dégradation sur 4 de ces nouveaux alliages.

CHAPITRE 3

LE MESO-FRETTING

3.1 Introduction

En tribologie, Il est généralement admis que le frottement se produit pour des amplitudes de glissement supérieures à $100\mu\text{m}$, et le fretting pour des amplitudes inférieures à $100\mu\text{m}$. Typiquement, le fretting ou micro-frottement est défini comme étant une fatigue en frottement qui ne requière pas la présence d'une fissure comme point de départ. Le mouvement relatif général de deux surfaces en contact peut être considéré comme résultant de la combinaison de trois mouvements élémentaires: le glissement, le pivotement et le roulement. Ces trois mouvements sont empêchés ou freinés par l'adhérence et/ou le frottement.

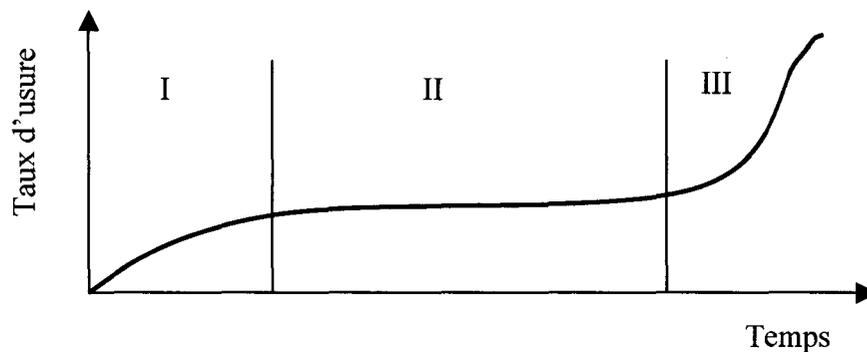
3.2 Transition entre le fretting et le meso-fretting

La transition entre ces deux phénomènes résulte à la fois du frottement et du fretting, on pourrait l'appeler le meso-fretting. Tel que discuté au chapitre précédent, dans le domaine des contacts électriques, on s'entend pour la limite des $100\mu\text{m}$ et typiquement on appelle le méso-fretting est appelé *macro-wear*. La littérature en contact électrique rapporte que la friction à forte amplitude est plus néfaste que celle du fretting [Antl85-1], [Slade99]. C'est ce phénomène intermédiaire qui est étudié dans le présent travail. Tel qu'illustré sur le graphe 4, le frottement est d'une manière générale décrit en trois stades :

- le stade I correspond la phase du rodage ou l'adaptation des deux surfaces;
- le stade II est celui du frottement stabilisé;

- Le stade III correspond à la destruction rapide du contact.

Dans un premier temps, nous ferons une synthèse rapide du frottement et du fretting afin de pouvoir établir le lien entre les deux. Nous devons spécifier que nous allons discuter dans cette section du fretting en général et non du fretting avec contact électrique qui a été traité dans la section précédente.



Graphe 4 Graphe de l'évolution du taux d'usure dans le temps

Le sujet du fretting est traité abondamment et avec beaucoup d'exemples dans le livre manuel #18 de l'ASM [ASM18]. On y trouve une excellente synthèse des propriétés tribologiques du contact en fretting. On y rapporte quelques exemples parmi les plus classiques de l'usure due au fretting; les joints rivetés, le fretting entre les brins des câbles multibrins, dans les roulements à bille, etc. Tant dans les applications de contacts électriques que dans les autres, l'accumulation des débris serait un phénomène dominant.

Tomlinson a démontré que pour qu'il y ait fatigue par le fretting, il devait y avoir un déplacement relatif non nul entre les deux surfaces. Celui-ci pouvait être très faible, de l'ordre du nanomètre et causer de l'endommagement [Tom27]. La zone d'usure est alors limitée à la périphérie du contact pour de très faibles amplitudes. Vingsbo a démontré qu'une valeur d'amplitude critique est nécessaire pour qu'il y ait déplacement relatif

complet entre les deux surfaces [Vings88, ASM18]. Tomlison rapporte également que la géométrie du contact a un effet sur l'accumulation des débris dans la zone du contact. Certaines géométries font en sorte que les débris vont facilement être expulsés alors que d'autre font en sorte qu'ils y restent.

Quelques auteurs ont traité de la transition entre le mode de faible amplitude et grande amplitude. Jian-Zhong [Jian01] a étudié cette transition entre le fretting-fatigue et le fretting-usure. Il décrit un changement important dans le mécanisme de destruction du contact. De plus, il a montré qu'il existe un effet synergique entre le fretting et la corrosion. En particulier, il rapporte que le temps de vie en fretting de l'acier 316L est réduit d'un facteur 10 en présence de corrosion (0.9% de NaCl). Aux points de contact des surfaces, les particules métalliques sont arrachées et portées à des températures très élevées par le transfert d'énergie et il en résulte une oxydation accélérée.

D'une façon générale on peut, schématiquement, séparer les mécanismes de dégradation d'une surface en 3 grandes familles : la déformation plastique, la propagation de fissure et la formation d'oxydes. La déformation plastique intervient surtout pour des matériaux mous, solubles l'un dans l'autre et formant un oxyde qui ne protège pas la surface. C'est le cas par exemple du cuivre et de l'aluminium. Sous l'effet de la friction, il se forme sur la surface une couche molle qui recouvre toute la surface et la protège. La figure 6 montre une micrographie prise au microscope à balayage d'un contact Cu/Cu fil-plaque qui illustre ce phénomène. On note sur cette photo que la couche de surface est formée par micro alliage et oxydation et recouvre toute ladite surface.

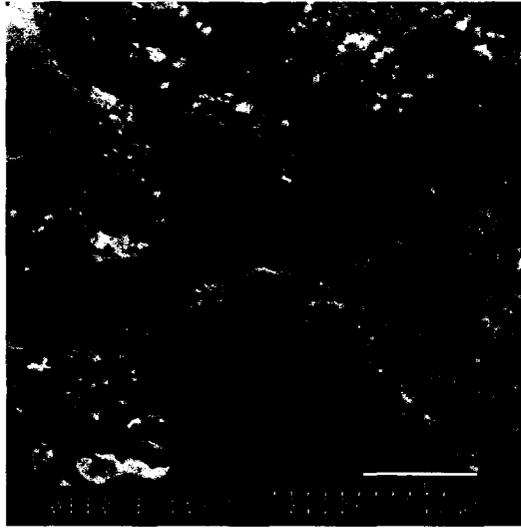


Figure 6 Échantillon de fretting, contact Cu/Cu, 400 grf, amplitude 100 μm fréquence 1 Hz (3900X) [Gagn00]

Dans le cas de deux matériaux durs il n'y a pas de formation de couche micro alliée mais la formation d'un tapis de micro particules qui restent sur la surface par attraction électrostatique. Dans ce cas, une approche fondée sur la mécanique de rupture, c'est à dire sur la probabilité d'initiation et de propagation d'une fissure par fatigue ou rupture brutale est plus appropriée tandis qu'un choix de matériau s'appuyant sur la métallurgie permet de mieux choisir les matériaux dans le premier cas (mou/mou).

3.3 Application de la propagation de fissure au fretting

La fissuration est un phénomène de destruction important. Celle-ci dépend de plusieurs facteurs et il n'est pas toujours aisé de les regrouper tous sur une même description afin de mettre en évidence le rôle joué par chacun d'entre eux. Une des difficultés rencontrées est surtout de pouvoir décrire précisément l'initiation et la propagation d'une fissure. En frottement comme en fretting, il y a des considérations métallurgiques mais aussi mécaniques qui rentrent en ligne de compte. La mécanique de la rupture et la production de débris sont les principaux phénomènes qui permettent d'expliquer le comportement d'un contact où l'oxydation n'est pas le phénomène dominant. La

variation cyclique des déformations induites lors du frottement, peuvent provoquer l'apparition de fissures locales. Les matériaux contiennent nombre d'inclusions ou autres défauts qui constituent des sites de micro initiation par excellence. D'après Zhou et Vincent [Zhou93], la fissuration peut se produire avec ou sans changements visibles sur la surface extérieure au contact. La tentation a été très grande d'appliquer la mécanique de rupture à l'étude du comportement de fissure de fatigue. Ainsi par exemple, il est possible de calculer la longueur critique a_0 au-delà de laquelle la fissure se propage, si on connaît le seuil de propagation de la fissure ΔK_0 et la contrainte appliquée σ_a :

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_0}{\Delta \sigma_a} \right)^2 \quad (3.1)$$

$\Delta \sigma_a$ étant la variation des contraintes et ΔK_0 , la variation du facteur d'intensité de contrainte. Cette approche relativement classique possède ses limites, car il faut connaître l'état des contraintes $\Delta \sigma_a$. Celles-ci sont faciles à calculer pour des surfaces de contact importantes et plus délicates pour des contacts ponctuels. En appliquant les calculs classiques de la mécanique de rupture de Paris, il est possible de calculer N_f le nombre de cycles nécessaire à la rupture :

$$N_f = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{c(\Delta K)^m} \quad (3.2)$$

Où a_0 est la longueur initiale de la fissure, a_f la longueur finale, m et C sont des constantes obtenues expérimentalement et propres aux matériaux choisis.

3.3.1 Fissures courtes

Il a aussi été montré que les fissures courtes se propagent plus rapidement que les fissures longues [Mill87]. Pour calculer la durée de vie de la fissure, on modifie le seuil de propagation prévu pour une fissure longue :

$$\Delta K_{s(court)} = \Delta K_s \sqrt{\frac{a}{a + a_o}} \quad (3.3)$$

où ΔK_s est le seuil de propagation pour les fissures courtes. Shevelya [Shev99] montre que l'initiation de la fissure peut être contrôlée par un paramètre K_{local} , facteur d'intensité de contraintes locales. Lorsque $K_{local} < K_{Smax}$, la fissure ne s'initie pas. À mesure que la fissure avance, il y a diminution du facteur d'intensité de contraintes locales et de la vitesse de propagation. Le mode d'application de la contrainte joue un rôle important: en général, les petites amplitudes provoquent une fissuration perpendiculaire au mouvement, et les grandes amplitudes, une fissuration qui a tendance à être parallèle. Il convient également de remarquer qu'aux hautes charges et petites amplitudes est associée l'adhésion, surtout lorsque le glissement est prédominant. Entre le roulement et le glissement, existe une zone de transition mal connue de glissement partiel. Cette transition est évidemment très importante, puisque le contact s'use peu dans la région de roulement et plus dans la région d'adhésion. Cette amplitude critique est donc importante pour pouvoir prédire le temps de vie du contact. Les fissures sont initiées quelque part à l'intérieur de la région où il y a du micro-glissement. Un haut coefficient de friction favorise l'initiation de fissures.

D'après Hills et Mugadu [Hills94], la vie du contact peut être divisée classiquement en deux stades : d'une part l'initiation et d'autre part la propagation. Le temps de vie peut être réglé par le contrôle de l'initiation des fissures, l'usure peut continuellement enlever l'effet des micro-fissures. En général, il est rapporté que la résistance en fatigue diminue avec la diminution de l'amplitude, et ce jusqu'à une valeur se situant entre 30 à 50 μ m. Au-delà de cette valeur, la résistance en fatigue augmente. Au-delà de cette valeur, on assiste à une augmentation de la résistance en fatigue. L'explication traditionnelle repose sur le fait que l'usure en fretting devient plus importante pour ces grandes amplitudes et que par conséquent les micro-fissures initiées au passage précédent sont érodées au

passage suivant. L'influence du déplacement sur les performances en fatigue reste à ce jour difficile à expliquer.

3.3.2 Modèle de Hertz

Une autre approche possible est de considérer le contact comme étant Hertzien et de préciser l'état des contraintes (roulement ou glissement). Hertz a développé des équations modéliser calculer les contraintes de surface de diverses géométries de contact, telle que bille sur plaque et bille sur bille.

La difficulté avec cette approche se retrouve dans la quantification du rapport glissement/roulement. Dans le modèle de contact de Hertz, P est la pression de contact et R le rayon de courbure. La pression est proportionnelle à $(P/R)^{1/2}$ tandis que la taille du contact est proportionnelle à $(P*R)^{1/2}$.

Pour Namjoshi et Mall [Nam02], l'initiation d'une fissure en fatigue par fretting dépend fortement du gradient de concentration et de contrainte qui s'exercent sur les points critiques du frottement. Ainsi, il faudrait tenir compte d'un couple d'exigences : le gradient de déformation de contraintes et sa valeur absolue. Lorsque le temps de vie est très grand, l'essentiel de la vie du contact est dépensé dans l'initiation de la fissure. Par conséquent, tout phénomène qui ralentit l'initiation de la fissure augmente le temps de vie. Ils montrent que la fissure est initiée avec un angle d'environ 45° par rapport à la surface de la contrainte principale ainsi que cela a déjà été constaté pour l'initiation de fissure de fatigue. On peut souligner que le stade I peut être subdivisé en deux parties : d'une part la germination et d'autre part les premiers stades de la croissance. Lorsque le coefficient de friction diminue, le stade de nucléation augmente.

Pour pouvoir diminuer la résistance en fretting, il faut donc diminuer le coefficient de friction, ce qui donc augmente la résistance en fatigue. Par contre, leur raisonnement ne

prend pas en compte la présence d'une couche de troisième corps. Cette couche peut ou non diminuer le coefficient de friction. L'étude de cette troisième couche a été faite par quelques auteurs dont Masounave [Masou76]. Ils ont montré qu'en frottement, la surface se recouvre d'une couche qui a été formée par adhésion du métal le plus mou sur le métal le plus dur. Mais nous reviendrons plus en détails sur cette notion dans la section «oxydation et débris».

3.3.3 Effet du cisaillement

Sous l'effet d'une force de friction, la surface est soumise à un cisaillement important. Elle doit donc, pour conserver son intégrité, résister à l'initiation de fissure en cisaillement. La situation est évidemment différente pour des matériaux ductiles. Ceux qui assurent une bonne lubrification ont un plan de cisaillement faible ce qui permet aux charges de se transmettre. Il y a quelques études qui permettent de définir des paramètres de cisaillement critique. On peut citer entre autre, le Shear Stress Range (SSR), et celui proposé par Namjoshi et Mall [Nam02] qui montrent que l'amplitude de cisaillement est donnée par:

$$\Delta\tau = \tau_{\max} - \tau_{\min} \quad (3.4)$$

Classiquement, ils postulent que la propagation de fissure survient lorsque ce paramètre atteint une valeur critique. Ce paramètre est calculé en chaque point du mouvement et la première initiation de fissure se produit à l'endroit où $\Delta\tau$ est maximal. Walker a modifié ce critère en proposant un paramètre plus critique, le SSR (Shear Stress Range) suivant une première approche de Lykins.

$$SSR = \tau_{\max} * (1 - R_{\tau})^m \quad (3.5)$$

Où R_τ est le rapport de cisaillement dans le plan critique (le lieu où la fissure s'amorce), m est un paramètre ajustable de l'ordre de 0.45. Szolwinski [Szo196] a précisé cette approche de plan critique en proposant un paramètre modifié SWT (Smith Watson Topper) défini par :

$$\text{SWT} = \sigma_{\max} \cdot \varepsilon_a \quad (3.6)$$

où ε_a est l'amplitude de la déformation. Une autre approche a été proposée par Findley, qui a défini le paramètre FP suivant :

$$\text{FP} = \Delta\tau + K_{FP}\sigma_{a \max} \quad (3.7)$$

Le facteur K_{FP} est déterminé empiriquement, et est de l'ordre de 0.35 pour le $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$. Ce paramètre permet aussi de prévoir l'initiation de la fissure et l'endroit où elle va s'initier. Il est même possible de le calculer en chaque point du glissement. Dans le cas du $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$, pour des amplitudes de 50 à 100 μm , la fissure initiale est située à 45° par rapport à la surface (figure 7).

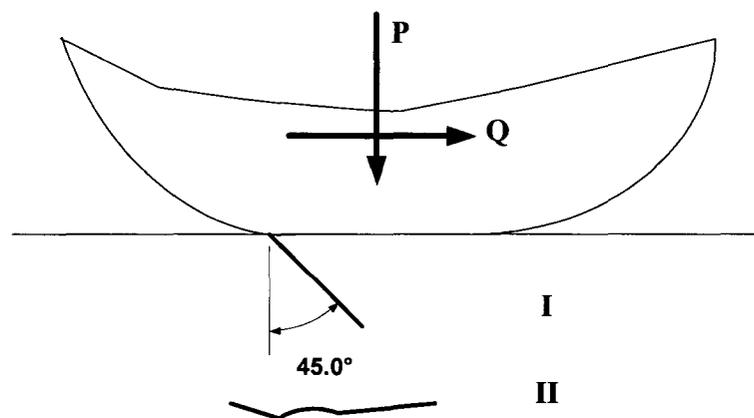


Figure 7 Fissuration en surface à 45°

Dans ce domaine initial (génération de la fissure), les lois des fissures courtes s'appliquent. Dans le stade II, l'explication se rapproche de celle des fissures longues.

3.4 Descriptions du fretting par la mécanique de rupture

Pour décrire le fretting à partir de la mécanique de la rupture, on peut donc proposer l'explication suivante : pour des petites amplitudes, la déformation est insuffisante pour générer facilement une fissure. Le fretting crée des micros débris qui s'oxydent et les oxydes formés ne sont pas adhérents. Pour de grandes amplitudes, la rupture se produit par le mécanisme classique de l'initiation et propagation de fissure, ce qui entraîne la formation de grands débris et aussi la formation d'une couche de micro alliage et d'oxyde sur la surface.

3.4.1 Fissures intermédiaires et longues

Dans le cas intermédiaire, c'est à dire pour des fissures petites mais non courtes qui se propagent, le rapport de contraintes joue un rôle important, celui-ci est donné par :

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (3.8)$$

On peut donc écrire la relation connue en mécanique de rupture :

$$\Delta\tau = \tau_{\max} (1-R)^m \quad (3.9)$$

Elle a été établie par analogie avec la loi de Paris :

$$\frac{da}{dN} = A^* \Delta K^m \text{ avec } \Delta K = K_{\max} - K_{\min}. \quad (3.10)$$

Lorsque $R \neq 0$ ($R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}}$). Un grand nombre de lois ont été écrites pour tenir compte de l'effet de R :

$$\Delta K_R = \Delta K_0 (1-R)^m \quad (3.11)$$

3.4.2 Effet de l'amplitude

D'autres lois ont aussi été élaborées pour expliquer, l'initiation et la propagation d'une fissure pendant le fretting. Le fretting peut s'expliquer par un modèle provenant de la mécanique de rupture : initiation de rupture et propagation. Pour que la fissure s'initie, il faut que $\tau > \tau_s$. Par analogie avec la mécanique de rupture, on retrouve une valeur critique. Si τ_s est supérieur à la valeur critique, on se trouve dans le cas de la figure 8. Si $\Delta A < \Delta C$, alors il n'y a pas d'évacuation des débris. Si $\Delta A > \Delta C$ avec $\tau > \tau_s$, alors il y a initiation de fissure.

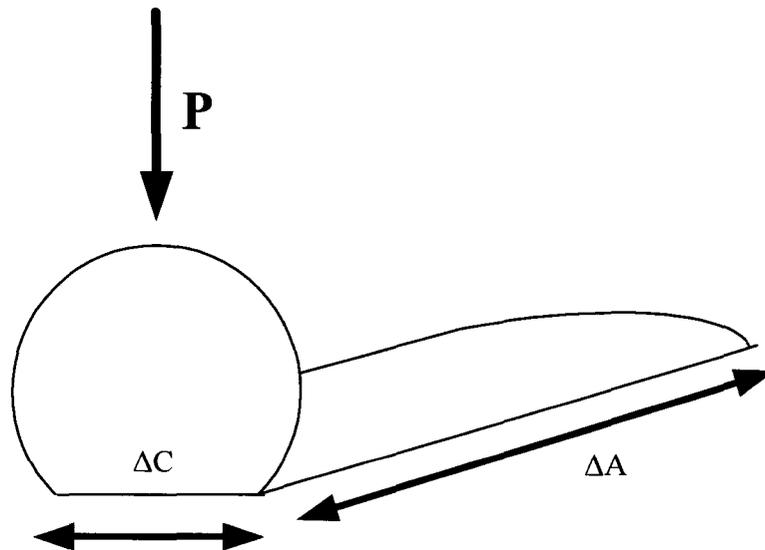


Figure 8 Modèle d'initiation de fissure selon la mécanique de rupture

3.4.3 Modes de dégradation de la surface

Une autre description du frottement repose sur l'étude des phénomènes micro structuraux qui entraînent la dégradation de la surface. Ces phénomènes peuvent être classés en 3 grandes catégories: la micro abrasion, la corrosion et l'adhésion. L'abrasion est due à une des pièces qui "lime" l'autre ou à un troisième corps plus dur que les deux pièces. L'adhésion (terme anglais *stick*) vient de la solubilité mutuelle des matériaux des pièces. La rupture adhésive des jonctions donne lieu à une usure douce (*slip*), la rupture cohésive à une usure sévère pouvant aboutir au grippage. En anglais, le terme *stick-slip* indique un régime intermédiaire où l'on obtient un mélange des deux régimes. La corrosion est due à des phénomènes chimiques et non au frottement, mais elle interagit avec ce dernier. La figure 9 montre un exemple de micrographie d'une zone de fretting avec glissement complet (*slip*) pour un contacts cuivre-cuivre. La figure 10 montre une cartographie type de la transition entre les divers modes pour l'acier.



Figure 9 Micrographie d'une plaque soumise au fretting, régime glissement (abrasion), glissement complet sur toute la trace (échantillon Cu-Cu, 50µm, 0.5N, 1Hz) [Gagn00]

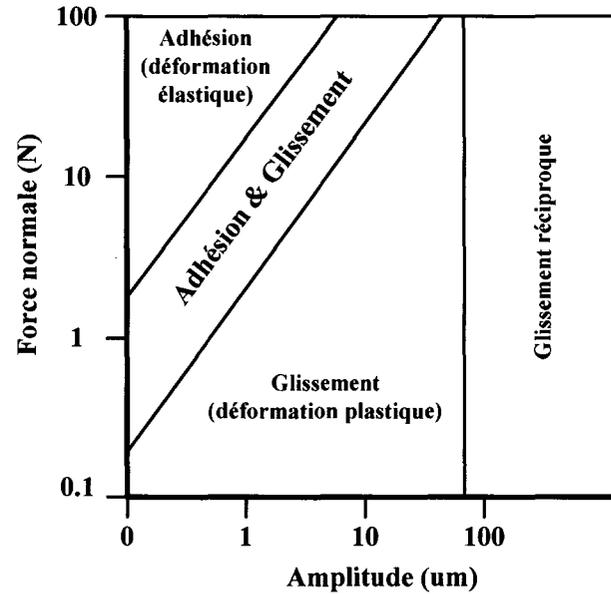
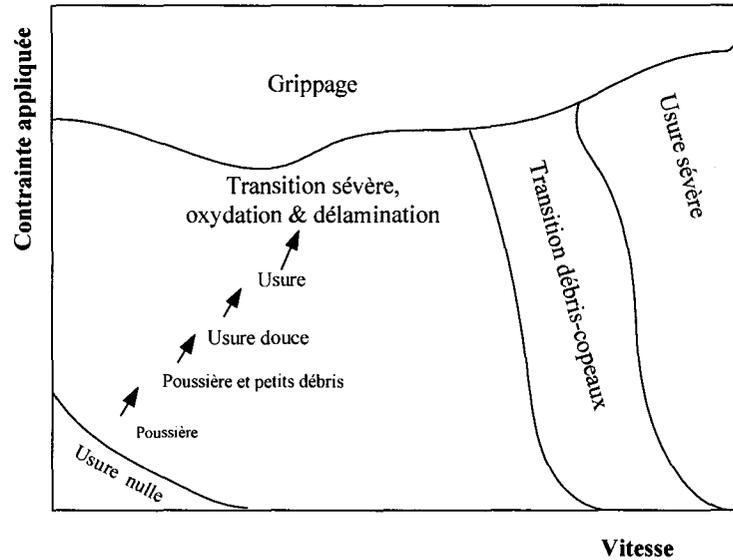


Figure 10 Carte d'usure, bille sur plaque, acier inoxydable [Robe04]

3.4.4 Cartes d'usure

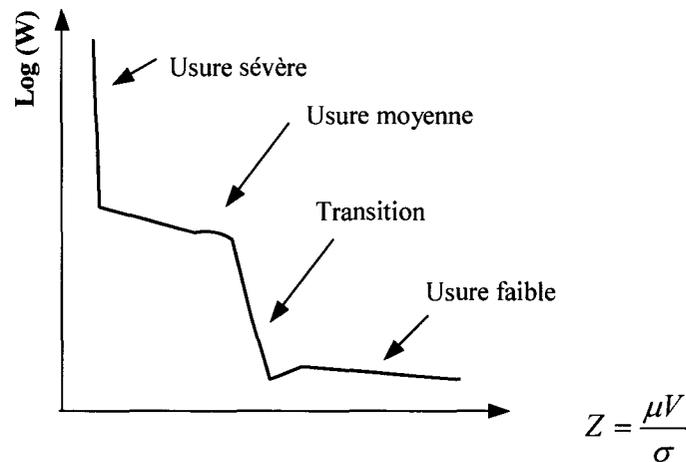
La visualisation des résultats du fretting par l'utilisation des cartes d'usure permet de décrire le phénomène en tenant compte de nombreux paramètres et permet de déduire les zones d'utilisation du matériau considéré. Les cartes d'usure peuvent se schématiser de multiples façons telles que les diagrammes P-V, où P est la charge appliquée et V la vitesse de glissement. La figure 11 montre une carte d'usure type où l'on représente par différentes régions le mode d'usure du matériau étudié.



· Figure 11 Carte d'usure type [adaptée de Fouvry00]

Selon la nature du couple, la zone d'usure moyenne est plus ou moins grande. Par exemple, les couples carbure/carbure et alumine/alumine s'usent plus vite que le couple alumine/alumine. Cette description, à l'aide du produit P-V, a été publiée il y a fort longtemps par Stribeck, dans le plan $W(Z)$ où μ est le coefficient de friction, V la vitesse et P la charge. Le taux d'usure W est exprimé en fonction du volume d'usure, de la distance parcourue et de la force de contact, ($\text{mm}^3/\text{m}\cdot\text{N}$). La notion d'usure a surtout été appliquée dans le cas du frottement lubrifié. On peut schématiser le taux d'usure tel que montré au graphe 5.

D'une façon générale, tout contact de faible amplitude génère une élévation de température locale qui évidemment est proportionnelle à la fréquence du mouvement et à la charge appliquée. Cette température peut dans une certaine mesure modifier les propriétés mécaniques et métallurgiques des matériaux en présence. Tel que schématisé à la figure 11, un phénomène d'oxydation peut alors être observé.

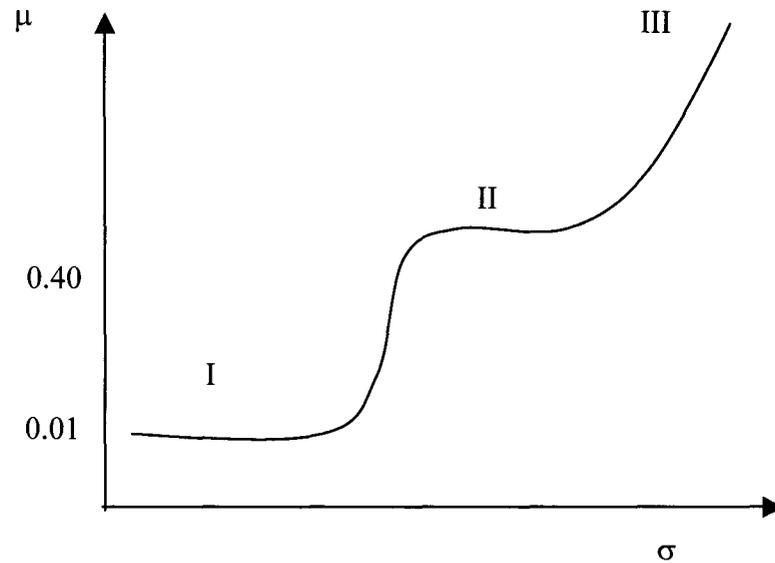


Grappe 5 Schématisation du taux d'usure

Une autre description est possible du taux d'usure, le graphe 6 montre le coefficient de friction en fonction de la contrainte appliquée pour le fer. La zone I correspond au cas où le frottement est lubrifié. Le coefficient de friction est alors très faible, de l'ordre de 0.01 ou moins et l'usure est très faible.

La zone II représente le cas de la lubrification solide. C'est à dire que les débris générés forment une couche de troisième corps qui sépare les deux surfaces et assurent le frottement. Souvent, le coefficient de friction observé, de l'ordre de 0,4 est généré par la couche de troisième corps lubrificateur. On suppose alors que le troisième corps est composé d'oxyde de fer joue un rôle pour justifier 0.4.

La zone III représente un arrachement de matière et l'usure est sévère. Il y a donc plusieurs descriptions possibles qui reposent soit sur la mécanique de rupture soit sur les phénomènes de dégradation de la surface. Très souvent les cartes d'usure illustrent cette description.



Graphe 6 Graphe du coefficient de friction en fonction de la contrainte appliquée pour l'acier

Il est opportun de choisir la mieux adaptée dans le cas du fretting. Peut-on utiliser des descriptions utiles en frottement basé sur la mécanique de rupture ou sur les phénomènes de dégradation? En particulier l'étude de la morphologie de la surface de frottement est souvent un bon indicateur de mécanisme de dégradation. L'étude du troisième corps permet donc de préciser les mécanismes.

3.4.5 Troisième corps

La plupart des auteurs s'accordent à souligner l'importance de l'oxydation dans le fretting. Au cours du frottement, il se crée une couche de troisième corps qui provient de l'interaction des deux partenaires et qui recouvre les deux surfaces. Cette couche est constituée de micro billes d'oxydes métalliques incorporés dans le métal provenant du partenaire le plus mou. Ce troisième corps n'est pas obligatoirement lubrifiant, pour qu'il le soit, il faut que les débris formés remplissent trois conditions essentielles :

- la couche de troisième corps ne doit pas se briser sous l'effet des contraintes de cisaillement mais doit se déformer. L'oxyde de fer remplit bien cette fonction par exemple;
- les débris doivent rester emprisonnés dans le contact. Pour ce faire, l'amplitude de sollicitation doit être suffisamment petite. Le pouvoir lubrifiant des débris dépend donc de leur forme et de leur nature. Les particules sphériques sont plus lubrifiantes que les particules anguleuses, les carbures de silicium et l'alumine par exemple;
- il faut également que la couche d'oxyde formée soit adhérente, c'est à dire que les particules glissent sur la surface du métal. Le caractère lubrifiant de ce troisième corps peut diminuer le taux d'usure du fretting.

Il existe une relation très forte entre la présence de particules d'usure dans la zone de contact et la rugosité de surface. Sur une surface rugueuse, les débris peuvent s'échapper des zones de contact pour se loger dans les creux de la surface. En général, ces débris ont des dimensions de l'ordre de 10 μm ou moins, et par conséquent s'oxydent instantanément s'ils sont métalliques. Il existe donc un lien entre la quantité de débris produits et l'amplitude du fretting. Les débris protègent les deux surfaces en contact : le MoS_2 et l'oxyde ferrique par exemple qui peuvent jouer un rôle de lubrifiant entre les deux surfaces. Ils peuvent aussi dans certain cas augmenter le taux d'usure quand les débris sont durs et abrasif, comme c'est le cas pour le SiC et SiO_2 .

3.5 Influence des matériaux

Les propriétés mécaniques des deux surfaces protagonistes sont également des critères importants du fretting. Si les surfaces sont très écrouies, alors la déformation plastique interviendra moins facilement que si elles ne contiennent qu'un très petit nombre de dislocations. La mesure de la dureté est donc un bon moyen de prévoir l'usure par fretting des deux surfaces en contact. D'autant plus que dans le cas où les matériaux sont

durcis non par écrouissage mais par durcissement de fabrication, des phénomènes de micro usinage peuvent se mettre en place. Puisque le caractère lubrifiant du troisième corps dépend des propriétés physiques des deux matériaux en contact, certains auteurs proposent une solution de revêtement dans le cas des matériaux abrasifs, donc susceptibles d'avoir un taux d'usure élevé.

Par exemple, Yuanshen a étudié le frottement à sec de matériaux frottant sur eux-mêmes avec un contact plan/plan (WC-12%Co, Cr₃C₂-25%NiCr, Al₂O₃-20%TiO₂ et Cr₂O₃). Le frottement a été effectué à basse puis à haute température. Les auteurs montrent qu'il y a deux mécanismes principaux de frottement: le *plastic tearing* et l'*adhesive tearing*, qui correspondent tous les deux à des hautes valeurs du coefficient de frottement et du taux d'usure. L'augmentation de la température entraîne aussi une augmentation du taux d'usure. Les auteurs soulignent que les propriétés de surface sont très influencées par le revêtement, en particulier le revêtement de WC ou de Cr₂O₃ semble mieux résister. Ils ont aussi montré que pour de mauvais finis de surface, l'adhésion est faible.

Ces essais ont montré que pour une bille d'acier 100C6 ou d'alumine, l'adhésion commence à l'interface TiN/acier (où TiN est le revêtement), suivi par un transfert du métal vers la céramique. L'usure de l'acier augmente en même temps que l'épaisseur du revêtement de TiN. L'adhésion peut également survenir lorsque TiN est en contact avec l'alumine. Il a en effet pu être montré que des transferts de TiN étaient aussi détectés sur l'alumine. L'usure du revêtement se fait également par un mécanisme de transfert. L'auteur montre aussi que l'adhésion diminue avec l'augmentation de la rugosité. Lorsque la bille en acier 100C6 frotte contre le revêtement de TiN, on assiste à un transfert de l'acier sur le revêtement. Avec une bille en alumine, la situation est inversée puisque TiN a été transféré sur la bille.

3.6 Conclusion

En résumé, la revue de littérature réalisée dans les publications propres au domaine des contacts électriques montre aussi des opportunités de contribution originales dans divers sujets.

Le principal objectif de cette thèse était d'investiguer le domaine de l'usure qui se trouve entre la frontière du fretting et de l'usure, soit l'analyse de la validité des lois de fretting et d'usure dans la zone entre $100\mu\text{m}$ et $1000\mu\text{m}$ pour des matériaux de contact électriques. Peu d'études se sont concentrées sur cette plage d'amplitude et celles-ci ont surtout concentrés sur la définition du mode de dégradation.

Peu ou pas d'auteurs se sont attardés à la contribution du passage du courant et de son effet sur le coefficient de friction et/ou la force de friction mesurée entre les deux surfaces en contact.

CHAPITRE 4

MONTAGES EXPÉRIMENTAUX

4.1 Introduction

Dans le cadre de nos travaux sur le fretting, nous avons travaillé à partir de deux montages expérimentaux de fretting, un premier à l'ÉTS (géométrie bille-plaque) et le second à l'IREQ (géométrie fil-plaque). Le montage de l'ÉTS a été construit de toute pièce et inspiré de celui de l'IREQ. Ce dernier a été conçu il y a quelques années et nous y avons modifié le générateur de mouvement de façon à le rendre plus performant. Ce montage a servi à réaliser plusieurs études sur le fretting des contacts électriques.

Ces deux montages servent donc à simuler l'effet du fretting sur des connections électriques. Ils comportent certaines différences qui seront expliquées dans le présent chapitre. Le montage de l'ÉTS (bille-plaque) permet l'essai simultané de 5 échantillons d'amplitude variable de 10 alors que celui de l'IREQ (fil-plaque) en permet 10. En littérature, on retrouve typiquement deux types de montage d'essais, des montages avec frottement d'un fil sur une plaque ou avec frottement d'une bille sur plaque. Nous verrons dans un premier temps les caractéristiques du montage de l'ÉTS dans le présent chapitre et le montage de l'IREQ sera présenté dans le chapitre suivant.

4.2 Montage de fretting bille-plaque versus fil-plaque

Le montage de fretting fil-plaque (IREQ) que nous avons utilisé est très performant au niveau du nombre d'échantillons qui sont traités simultanément. Il permet de travailler avec 10 échantillons à la fois qui peuvent avoir des forces de contacts différents et une amplitude de mouvement commune. Le montage bille-plaque se veut un complément au montage fil-plaque de par les mesures qui sont possibles de réaliser. Nous voulions

développer un montage qui permettrait d'étudier à la fois les aspects électriques de la dégradation des contacts par le fretting et aussi être en mesure d'obtenir de l'information sur les aspects de force et coefficient de friction. Les diverses caractéristiques des deux montages sont résumées au tableau I. La figure 12 montre le schéma simplifié du fonctionnement d'une station de mesure bille-plaque et la figure 13 montre le schéma simplifié du montage fil-plaque. Dans les deux cas, la géométrie des échantillons est très simple. Les principales difficultés liées au développement proviennent de l'instrumentation nécessaire à la réalisation des mesures ainsi que du mécanisme de génération du mouvement.

Tableau I

Détails des paramètres des montages bille-plaque et fil-plaque

	bille-plaque	fil-plaque
Nombre d'échantillons	5	10
Génération du Mouvement	Moteur pas à pas + transmission vis + bras de levier	Moteur DC + came excentrique + bras de levier
Mesure du déplacement	Individuel sur chacune des stations	Global pour le plateau
Fréquence (Hz)	0.25 à 5 Hz	0.05 à 2 Hz
Amplitude (μm)	5 à 800 ± 2	5 à 250 ± 2
Mesure de la force de contact	Oui	Non
Mesure de la force de friction	Oui	Non
Type d'échantillon	Bille sur plaque	Fil sur plaque

4.3 Détails du montage expérimental de fretting bille-plaque

Le schéma très simplifié de la figure 12 montre que le montage bille-plaque utilise des échantillons de type bille sur plaque, la bille étant fixe et la plaque mobile. Le déplacement relatif entre les deux est ajustable, de 5 à 800 μm . Le montage comporte 5

stations identiques qui sont toutes mues par un seul système qui génère le déplacement. L'amplitude du déplacement est cependant ajustable sur chacune des stations.

Pour le montage fil-plaque, les échantillons sont de type fil recourbé sur plaque et le système comporte 10 stations identiques qui sont mues par un seul système qui génère le déplacement (figure 14). Cette géométrie permet l'utilisation d'alliages sous forme de fils, ce qui est plus facile à obtenir que les billes. L'amplitude du déplacement est ajustable entre 10 à 250 μm mais identique pour toutes les stations. Les paramètres à mesurer dans le montage bille-plaque sont la force et le coefficient de friction, l'amplitude du déplacement ainsi que la résistance de contact. Certaines spécifications du montage ont été élaborées à partir de celle du montage fil-plaque qui a été utilisé pour plusieurs travaux sur la dégradation par le fretting des contacts électriques [Brau76, Brau77, Brau88, Brau89, Brau90, Gagn00, Gagn02-1, Gagn02-2, Gagn04].

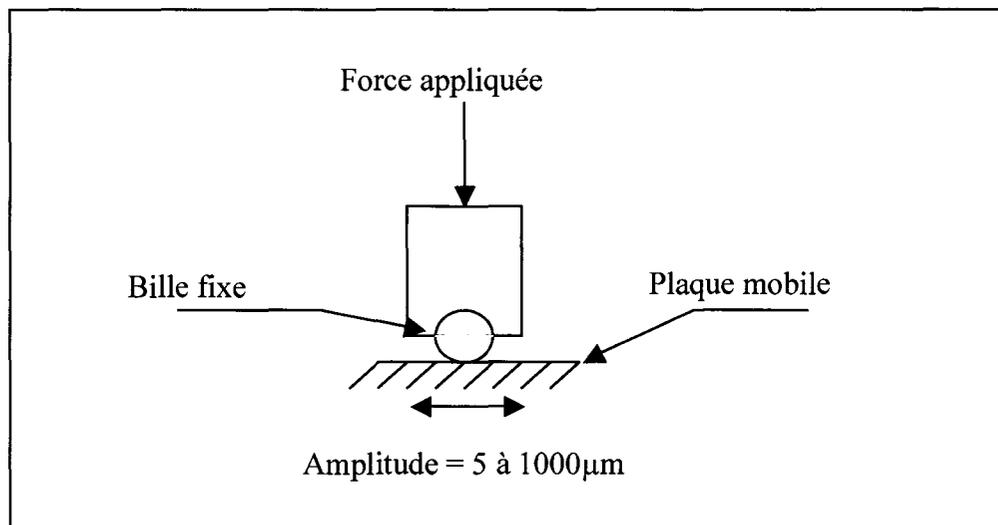


Figure 12 Schéma du fonctionnement du montage de fretting bille-plaque

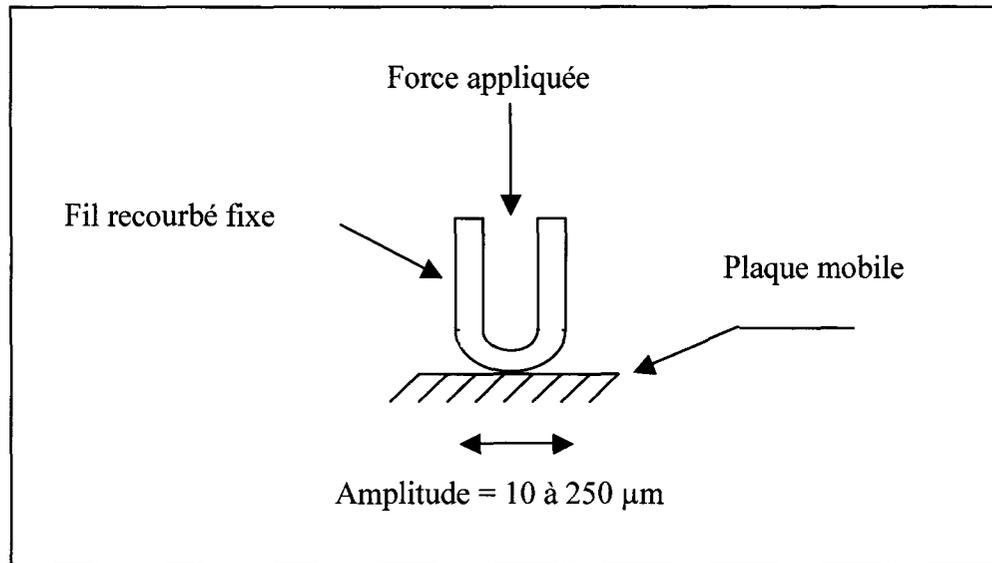


Figure 13 Schéma de fonctionnement du montage de fretting fil recourbé sur plaque

La figure 14 montre un schéma plus détaillé d'une station du montage bille-plaque. On y remarque que le porte-bille et le plateau mobile sont mécaniquement rattachés à de petites poutres instrumentées. La flexion de ces poutres permet d'en extraire la force de friction (porte-bille) et le déplacement (plateau mobile) à l'aide de jauges de contraintes.

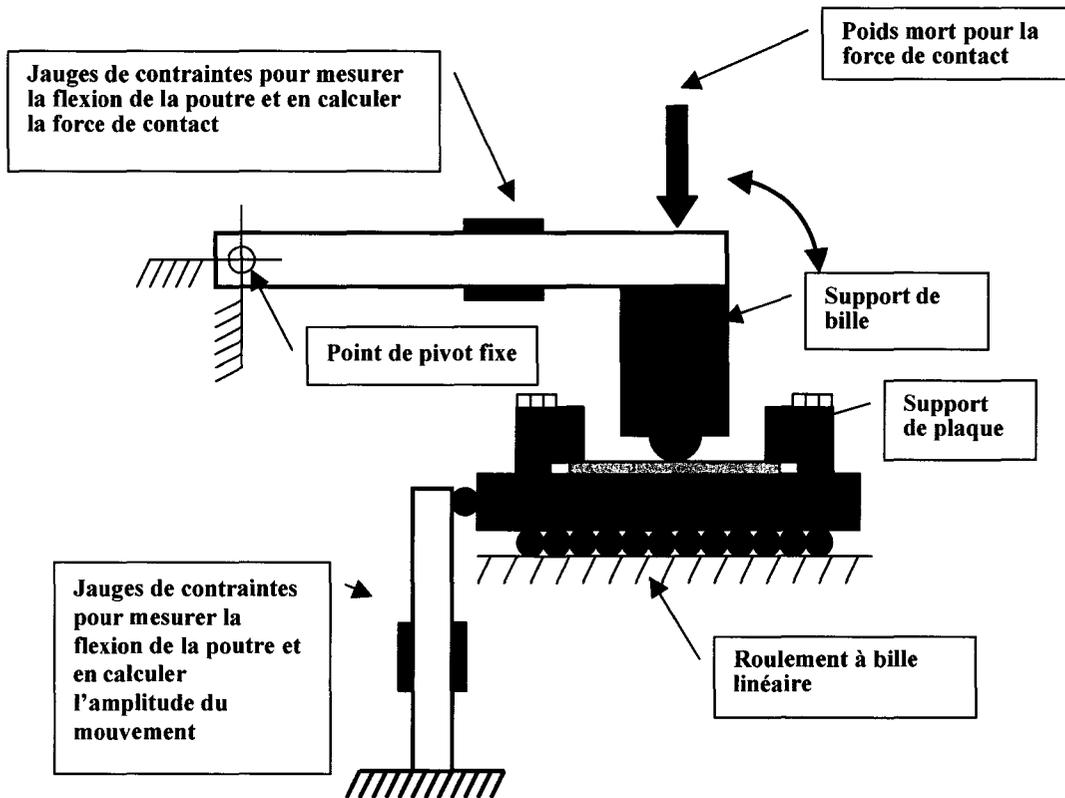


Figure 14 Schéma d'une station de mesure du montage de fretting bille-plaque

4.3.1 Mesure de la force et du coefficient de friction

Un des principaux objectifs du développement du montage bille-plaque était d'être en mesure de suivre l'évolution du coefficient de friction de chacun des contacts sur chacune des stations. Tel que recensé en revue de littérature, ceci est difficile à réaliser et est relativement inique pour un montage multi-échantillon. Tel que montré aux figures 14 et 15, la mesure de la force de friction se fait par l'intermédiaire de la mesure de la flexion de la poutre sur laquelle sont montées deux jauges de contraintes en configuration demi-pont. Le détail de la technique de mesure et du calcul de la force de friction est montré en détails à l'annexe 1. La friction vue par le contact lors du mouvement de la plaque provoque un très léger fléchissement de cette poutre et une

réaction des jauges de contraintes sur la poutre. La force de friction est donc calculée à partir de l'équation de flexion de la poutre.

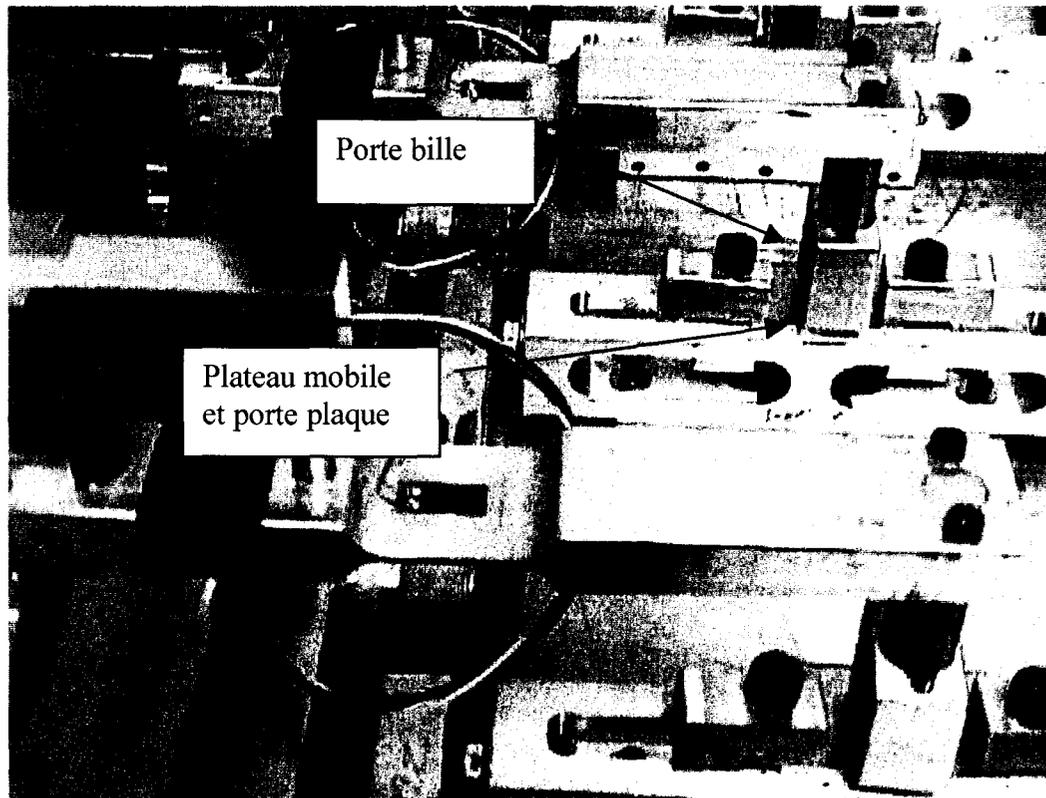


Figure 15 Photo montage de fretting bille-plaque

4.3.2 Mesure de l'amplitude du déplacement de chacune des stations

Tout comme la mesure de la force de friction, la mesure de l'amplitude de déplacement est très importante pour les mesures que nous tenons à réaliser avec le montage fil-plaque. La figure 16 montre le schéma de la mesure du mouvement de la plaque et la figure 17 montre le détail de la mesure de la force de friction. La technique de mesure et les calculs nécessaires de l'amplitude du déplacement qui en découlent sont aussi détaillés à l'annexe 1.

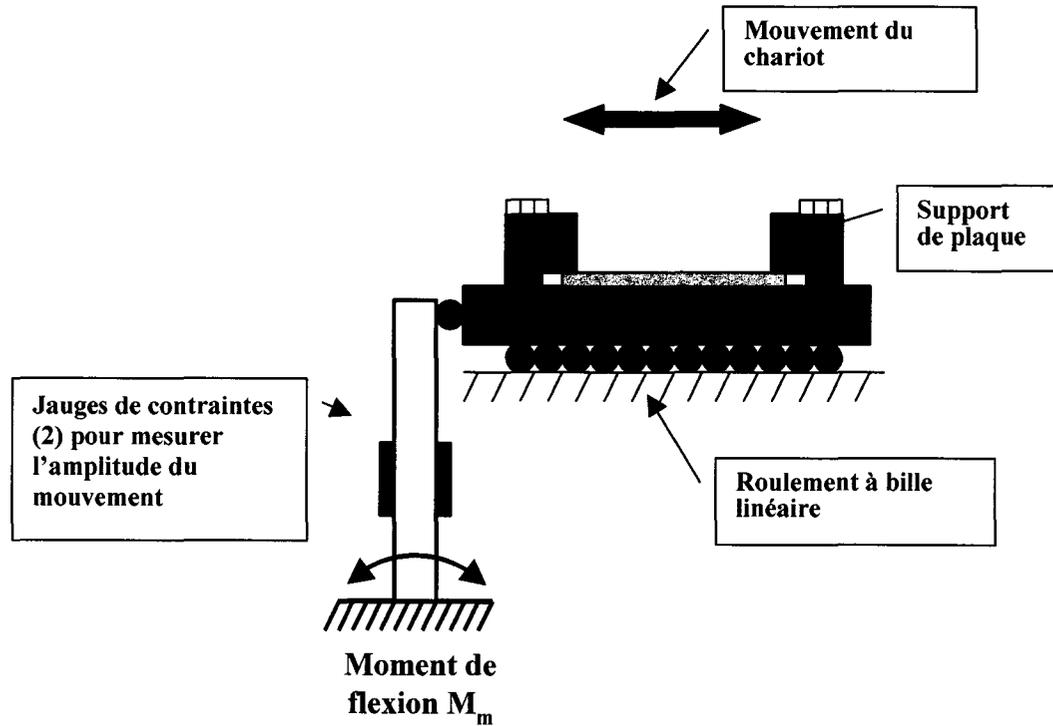


Figure 16 Détails de la mesure du déplacement montage bille-plaque

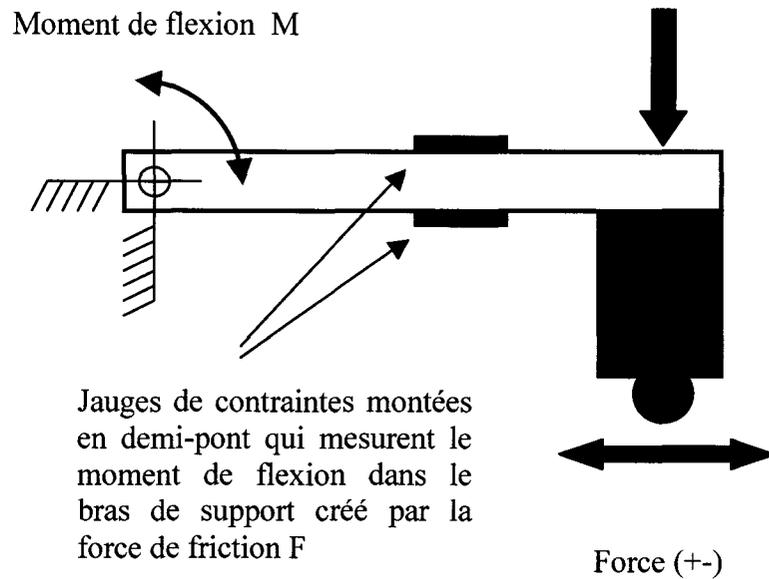


Figure 17 Détails de la mesure de la force de friction, montage bille-plaque

4.3.3 Génération du mouvement de fretting

Un des aspects complexe de la construction du montage bille-plaque a été de construire le mécanisme de génération du déplacement. Afin de bien reproduire les effets du fretting, il est requis de générer un mouvement de très faible amplitude avec une grande précision sur l'amplitude et la position de départ et d'arrêt. Les travaux réalisés par l'auteur sur le montage fil-plaque ont été mis à profit afin de concevoir un mécanisme de génération de mouvement fiable et très précis.

Typiquement, pour réaliser de tels déplacements de façon précise, on doit avoir recours à un mécanisme du type piézoélectrique ou par un moteur à dilatation thermique. La précision sur l'amplitude ainsi que sur le point de départ et d'arrêt du mouvement est très critique dans l'étude de l'usure de la zone de contact. Ces deux paramètres assurent une dynamique du transport des débris stable dans la zone de contact. Comme il a été montré par plusieurs auteurs, l'endroit où est prise la mesure de résistance de contact a un effet important sur les mesures [Mal00].

Dès que la mesure est prise à l'extérieur de la zone de contact, la valeur de la résistance peut être très différente de celle à l'intérieur de la zone. Ceci est dû au fait que dans la zone de contact, le frottement entre les deux surfaces crée une couche de débris et d'oxydes qui vont localement modifier la résistance de contact. Pour générer le mouvement de faible amplitude, nous avons choisi l'utilisation d'un moteur CC à vitesse variable muni d'une came excentrique qui force un mouvement linéaire de va et vient sur un système de bras de levier. Ce type de système a été utilisé sur le montage de l'IREQ avec de très bons résultats. L'utilisation d'un moteur électrique à courant continu et d'un variateur de vitesse permet de facilement varier la fréquence du mouvement.

La figure 18 montre le schéma de fonctionnement du système de génération du mouvement. Une came excentrique montée sur l'arbre du moteur CC à vitesse variable fait contact sur une extrémité d'un bras de levier. Un ressort de rappel assure un contact

constant entre la came et le bras de levier. La démultiplication du mouvement amenée par le bras de levier, fait en sorte que l'excentrique de la came est divisé par le rapport L_2/L_1 . Pour changer l'amplitude maximale du mouvement on peut donc modifier soit l'excentrique ou le rapport L_1/L_2 .

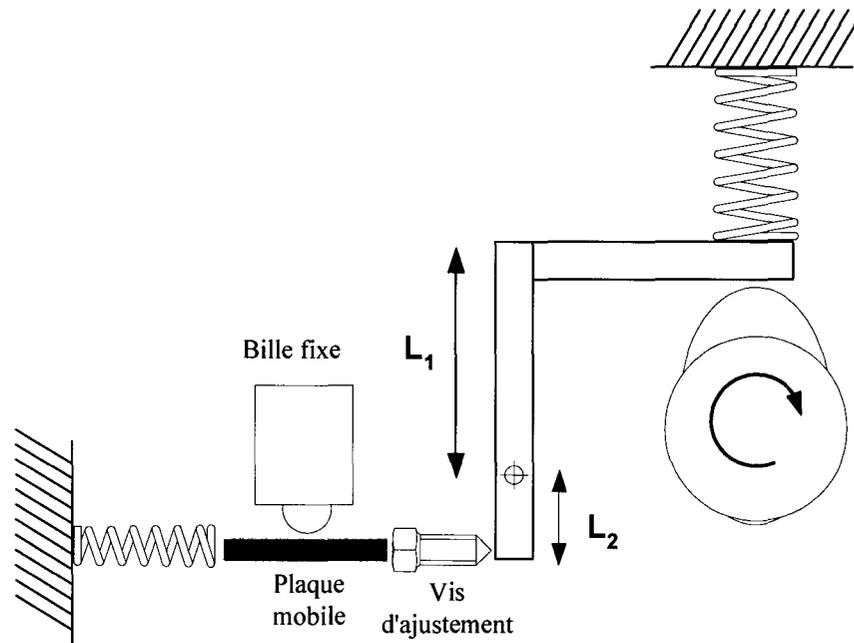


Figure 18 Génération du mouvement de fretting montage bille-plaque

4.3.4 Ajustement de l'amplitude du mouvement

Les 5 plateaux mobiles sont tous reliés au système de bras de levier par l'entremise d'une vis d'ajustement. Il est possible de contrôler l'amplitude de chacune des stations en ajustant le degré de contact entre la station et la came excentrique par l'entremise d'une vis d'ajustement (figure 18). Le fonctionnement de l'ajustement de l'amplitude du mouvement est montré à la figure 19. Ainsi, pour une amplitude faible (cas C et D), le chariot mobile ne fait contact avec la came excentrique que sur une portion seulement de la circonférence de la came. Lorsque le chariot fait contact avec toute la circonférence (cas A et B), le chariot va effectuer le plein amplitude du mouvement, ce qui correspond à la valeur de l'excentrique multiplié par le rapport du bras de levier L_1/L_2 .

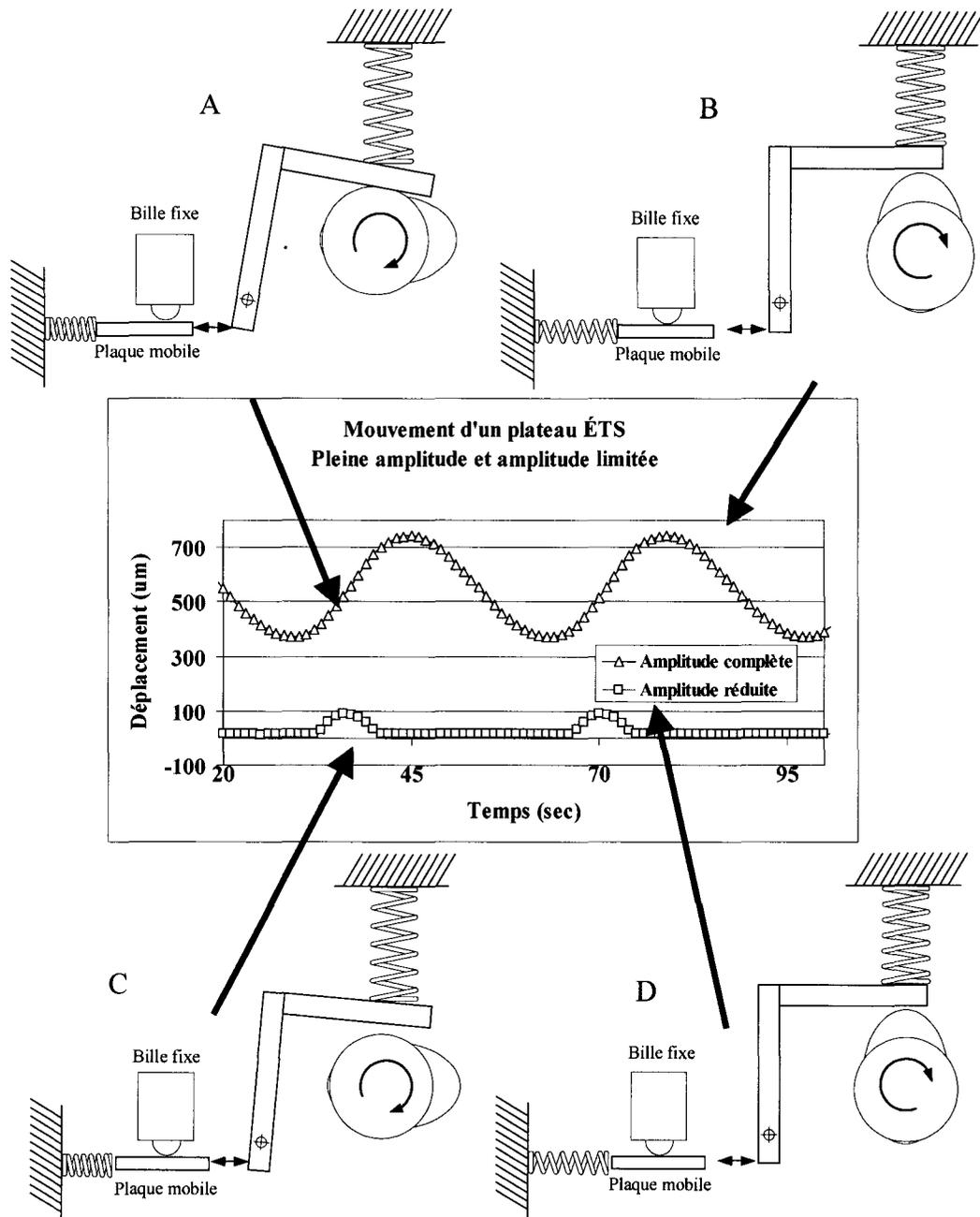


Figure 19 Relation entre le mouvement rotatif de la came et le déplacement des plaques sur le montage bille-plaque, A-B) amplitude complète C-D) amplitude réduite

4.3.5 Circuit de mesure de la dégradation des contacts électriques

Pour chacun des échantillons, il est possible de mesurer la valeur de la résistance de contact. La figure 20 montre le détail du circuit d'injection du courant de contact dans chacun des échantillons. Les échantillons sont tous alimentés par la même source de courant. On utilise une résistance de forte valeur montée en série avec chacun des échantillons afin de maintenir une tension électrique semblable dans chacune des branches du circuit. La tension électrique de contact de chacun des échantillons va varier dans le temps et provoquer une variation du courant dans le circuit si on n'utilise pas une résistance de forte valeur. La valeur de la résistance électrique de chacun des échantillons est enregistrée de la même façon que la force de contact et la valeur du déplacement de l'échantillon. La mesure de la résistance de contact est assurée par une carte voltmètre sur l'acquisiteur de données HP3497A. Les détails du programme et de l'acquisition des données sur le montage sont présentés à l'annexe 1. Un courant total de 250 mA est injecté dans les 5 branches du circuit ce qui ramène à 50 mA le courant dans chacune des branches.

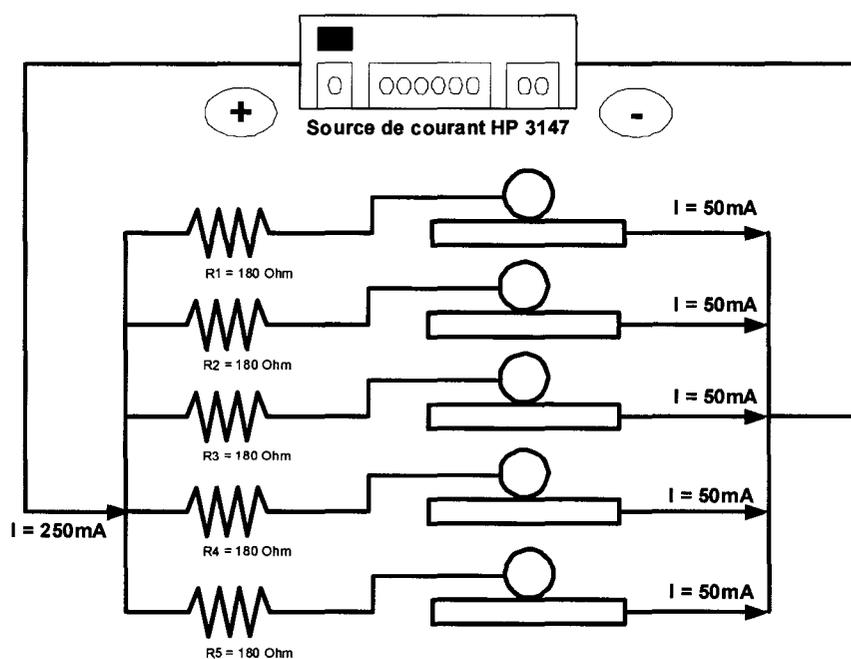


Figure 20 Circuit de mesure de la résistance de contact, montage bille-plaque

4.3.6 Acquisition des données d'essais

Pour sauvegarder les données des essais, un programme d'acquisition des données a été développé en langage iconique HPVee. Ce langage est similaire à Labview et commercialisé par HP. Le programme permet à l'utilisateur de spécifier certains paramètres tel que le nom et l'emplacement du fichier de sauvegarde des données et le délai entre les acquisitions des données. La figure 21 montre le schéma général, très simplifié du système d'acquisition des données. Un PC contrôle un acquiiseur de données HP3497 muni d'un voltmètre intégré, d'une carte de mesure de tensions électriques (20 canaux) et d'une carte de mesure de jauges de contraintes (10 canaux). Les commandes sont envoyées à l'acquisiteur de données par l'entremise d'un lien GPIB. Le graphe 7 montre le type de résultats obtenus avec le système d'acquisition des données. Le graphe 7A montre le graphe de l'amplitude du mouvement en fonction du temps pour un essai avec une bille de cuivre sur plaque de cuivre. L'amplitude du mouvement est de $80\ \mu\text{m}$, la fréquence de $1.0\ \text{Hz}$ et la force de contact de $0.72\ \text{N}$. Le graphe 7B, montre la force de contact pour ce même essai et le graphe 7C montre le graphe du coefficient de friction en fonction du temps obtenu par calcul.

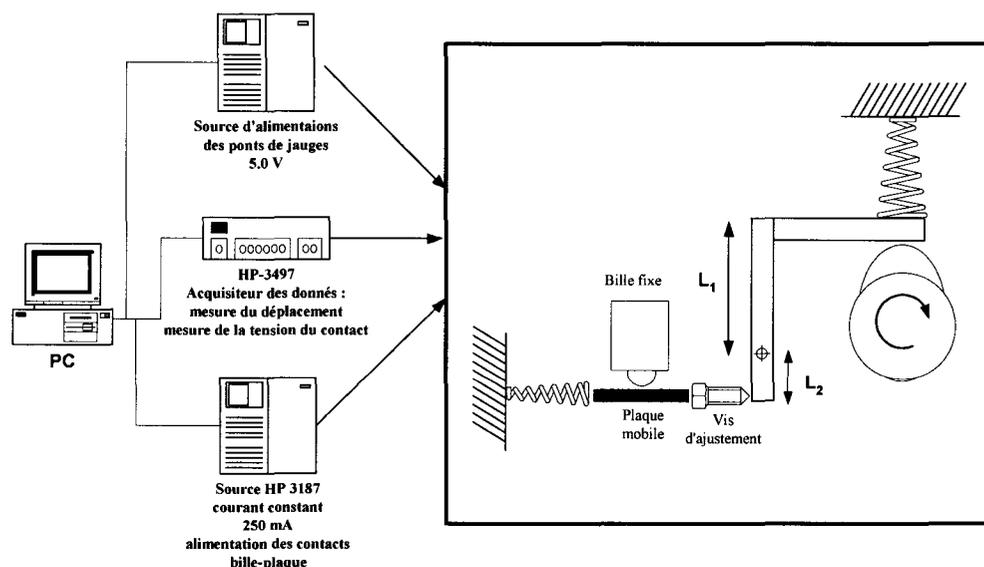
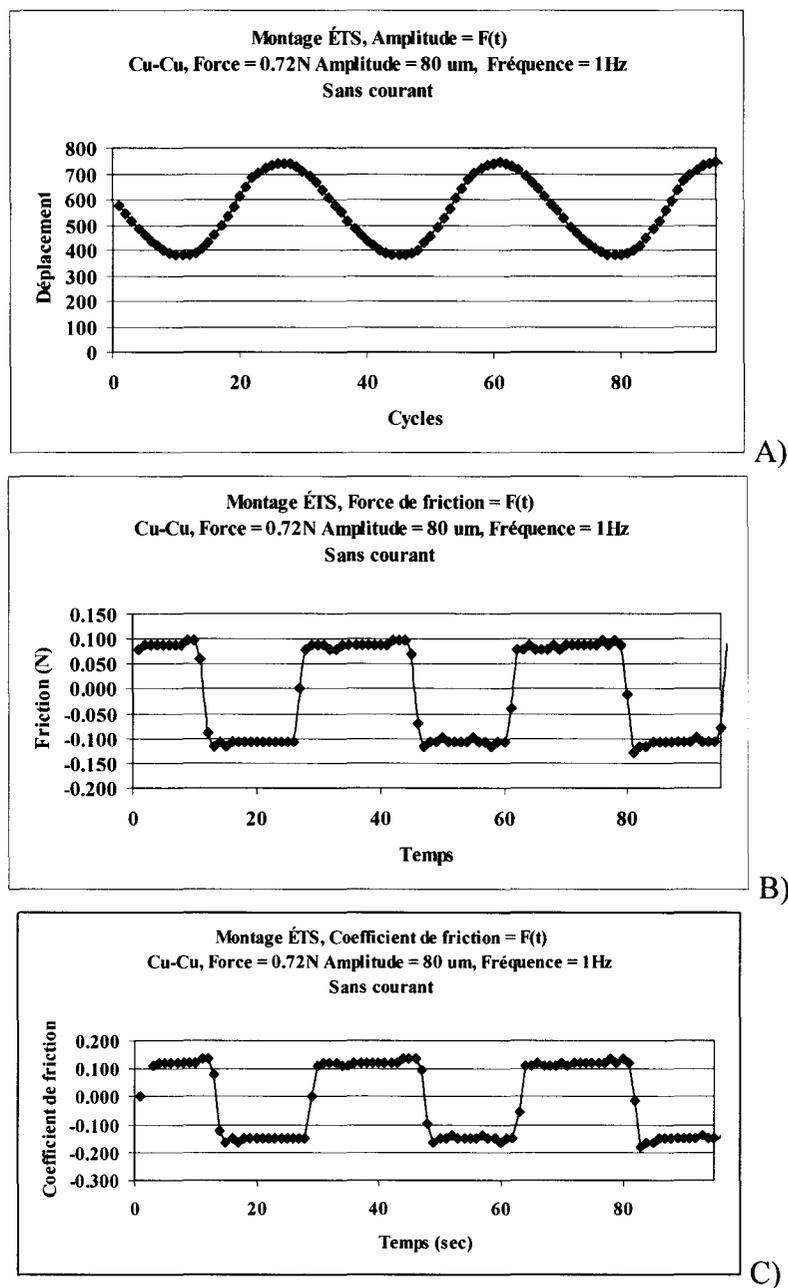


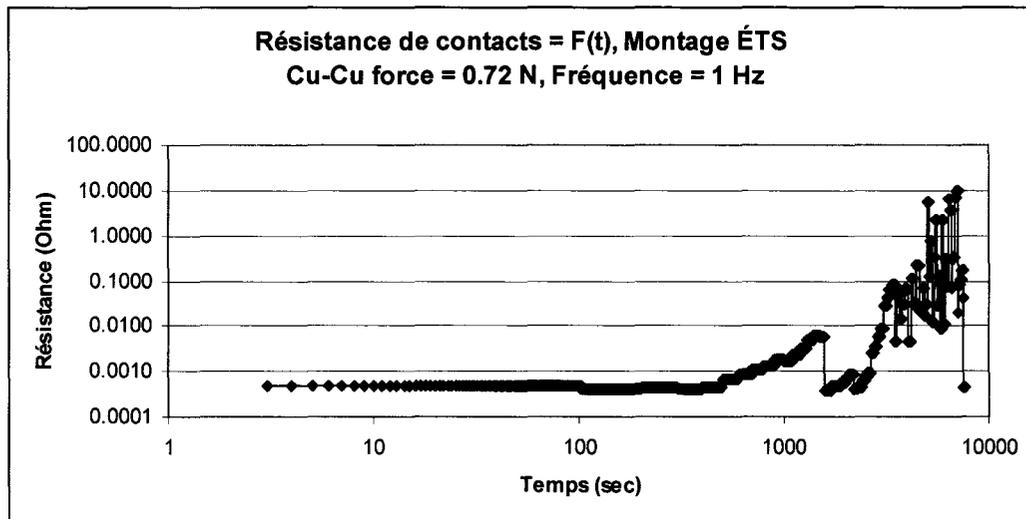
Figure 21 Système d'acquisition des données, montage bille-plaque



Graphe 7 Mesure de l'amplitude du mouvement (A), de la force de friction (B) et du coefficient de friction (C), montage bille-plaque

Tout comme pour le montage fil-plaque, nous avons instrumenté le montage bille-plaque de façon à être en mesure de prendre la valeur de la résistance de contact sur chacune des stations. Cette mesure est du type de mesure de résistance à quatre fils et permet

donc de mesurer seulement la variation de la résistance électrique du point de contact entre la bille et la plaque. Le graphe 8 montre un résultats type obtenu lors de l'essais de la figure précédente.



Graphe 8 Résultats de la valeur de la résistance électrique en fonction du temps montage bille-plaque, bille de cuivre sur plaque de cuivre, fréquence= 1 Hz, force de contact = 0.72N, courant = 50 mA

Le montage de fretting bille-plaque comporte 2 systèmes de mesure qui sont pris en charge par un programme écrit avec le logiciel de programmation HP-VEE :

- la mesure de la résistance de contact: ce système comprend le circuit d'alimentation de chacun des contacts qui est alimenté par la source de courant HP3615A et de lecture de la résistance de contact par la carte voltmètre de l'acquisiteur HP3497A;
- la mesure du déplacement du chariot et de la force de contact : ce système comprend la source de tension ANATEK 6080 qui alimente une carte de lecture de jauges de contraintes dans la fente #0 de l'acquisiteur HP3497A.

Outre la sauvegarde des données d'essai, le programme d'acquisition des données remplit aussi plusieurs tâches :

- permettre à l'utilisateur de sélectionner les paramètres de sauvegarde des données;
- sauvegarder les données traitées dans un format facilement accessible;
- permettre à l'utilisateur de visualiser le comportement de la force de contact dans le temps;
- effectuer la mise à 0 de la force de contact et de l'amplitude de déplacement pour chacune des stations avant les essais;
- mesurer la progression de la force de contact, de l'amplitude du mouvement et de la résistance électrique de contact pour chacun des échantillons.

Dans un premier temps l'utilisateur est appelé à choisir le nom du fichier dans lequel seront sauvegardés les résultats et le délai de sauvegarde des données. Lors de cette opération, le programme va définir les variables d'opération suivantes :

- nom et emplacement du fichier de sauvegarde des données;
- temps de départ de l'essai;
- écriture des informations du titre du fichier de sauvegarde;
- période de temps entre les sauvegardes.

4.3.7 Mesure du taux d'usure d'un échantillon, exemple de calcul

Un des principaux objectifs de cette thèse est de déterminer le taux d'usure et la relation avec le comportement du coefficient de friction pendant les essais de fretting à diverses amplitudes. Il est donc nécessaire de contrôler quantitativement l'usure de chacun des échantillons après les essais. Dans un premier temps, les dimensions physiques de la trace de fretting sont observées et mesurées au microscope optique. La figure 22 montre le schéma des mesures qui sont prises sur chacun des échantillons. Les dimensions sont par la suite utilisées dans le calcul suivant pour extraire le taux d'usure (Archard) :

$$W = \text{Vol perdu} / (F_n * D)$$

4.1

où

F_n = Force normale appliquée sur la bille (N)

D = Distance parcourue = $N * \text{amplitude}$ du mouvement (mm) où

N = Nombre de cycles

W est donc le coefficient du taux d'usure et il est exprimé en mm^3/Nm . On peut aussi remplacer la distance parcourue par la valeur $s = v * t$ où v est la valeur moyenne de la vitesse de déplacement et t est le temps.

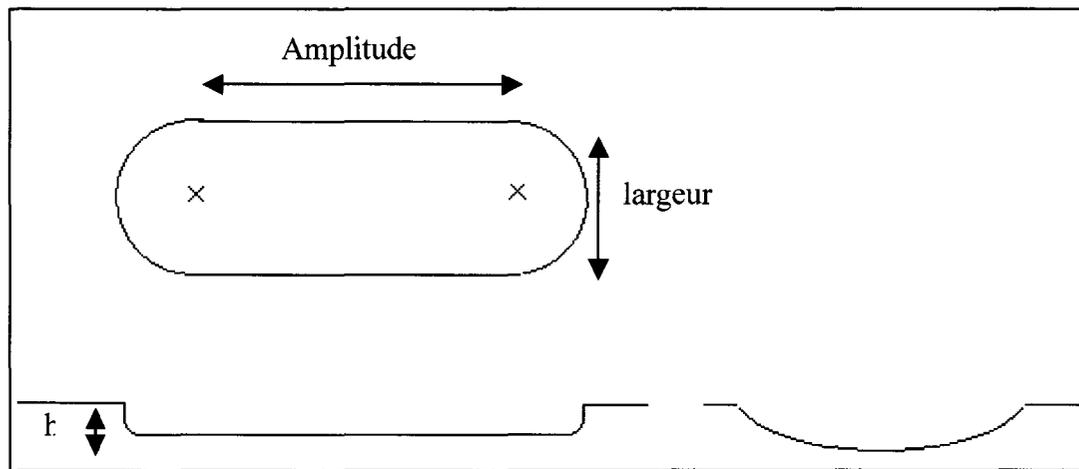


Figure 22 Schéma de la géométrie pour la mesure du taux d'usure

Le volume de matière perdu est alors calculé avec la relation suivante :

$$V (\text{mm}^3) = \pi * h^2 * (R - h/3) + [R^2 * \alpha - l R * \cos(\alpha)] * (\text{amplitude}) \quad (4.2)$$

Par la suite, chacun des échantillons est observé à l'aide d'un microscope électronique à balayage équipé d'un analyseur de rayons-X. Dans ce genre d'essai, deux stades d'usure sont habituellement présents: le rodage et le frottement stable.

4.3.8 Plan d'expérience fretting bille-plaque

Le plan d'expérience pour les essais réalisés sur le montage de l'ÉTS est montré aux tableaux II (sans courant électrique) et tableau III (avec courant électrique). Des séries d'essais impliquant divers matériaux de contact ont donc été réalisés avec et sans courant électrique. Dans tous les cas, la fréquence du mouvement était de 1Hz.

Tableau II

Paramètres d'essai pour couples billes plaques essais sans courant
électrique fréquence = 1Hz

Matériel bille	Matériel plaque	Force de contact (N)	Durée de l'essai (sec)
Al ₂ O ₃	Inox 316L	0,72	8288
Al ₂ O ₃	Inox 316L	0,98 sur stations 1,2,3	10759
Cuivre	Inox 316L	0,72	8471
Laiton 7030	Inox 316L	0,72	6995
Cuivre	Aluminium 6061	0,72	72735
Laiton 7030	Aluminium 6061	0,72	7561
Aluminium 6061	Aluminium 6061	0.72	9019
Acier 52100	Aluminium 6061	0.72	7663
Laiton 7030	Laiton 7030	0.72	6314
Cuivre	Laiton 7030	0.72	7383
Alu 6061	Laiton 7030	0.72	6599
Al ₂ O ₃	Laiton 7030	0.72	6728
Cuivre	Cuivre	0.72	7256
Al ₂ O ₃	Cuivre	0.72	7330
Laiton 7030	Cuivre	0.72	7097
52100	Cuivre	0.72	6912

Tableau III

Paramètres d'essai pour couples billes plaques
Essais avec courant électrique fréquence = 1Hz

Matériau bille	Matériau plaque	Force de contact (N)	Durée de l'essai (sec)
Acier 52100	Inox. 316L	0.72	8248
Aluminium 6061	Inox. 316L	0.72	10170
Aluminium 6061	Cuivre	0.72	18900
Laiton 7030	Cuivre	0.72	57600
Acier 52100	Cuivre	0.72	5400
Cuivre	Cuivre	0.72	12000
Aluminium 6061	Aluminium 6061	0.72	10800
Aluminium 7030	Aluminium 6061	0.72	7500
Cuivre	Aluminium 6061	0.72	14400
Acier 52100	Aluminium 6061	0.72	11700
Aluminium 6061	Laiton 7030	0.72	18000
Cuivre	Laiton 7030	0.72	15000
Laiton 7030	Laiton 7030	0.72	23400
Cuivre	Cuivre	0.72	7911
Laiton 7030	Aluminium 6061	0.72	10080

4.4 Essais de fretting fil-plaque

À l'IREQ, divers essais de fretting et de dégradation de contacts électriques ont été réalisés dans le cadre de cette thèse. Les montages de l'IREQ ont servi à étudier les aspects électriques de la dégradation par le fretting des contacts électriques, alors que le montage de l'ÉTS a été plus conçu pour étudier les aspects de la mécanique du contact. Les objectifs attendus avec le montage fil-plaque sont les suivants :

- vérifier l'influence du type de courant (CA et CC) sur des contacts cuivre-cuivre sous fretting;
- analyse du comportement sous fretting et par vieillissement thermique de certains lubrifiants pour des applications potentielles de contacts électriques à haute température;
- essais de fretting (CC) et de vieillissement thermique par courant et par conduction sur de nouveaux alliages sans plomb.

La principale différence avec le montage de fretting bille plaque est que le montage de fretting fil-plaque permet l'étude simultanée de 10 échantillons fil sur plaque à la fois. Au lieu d'une bille, on utilise donc un fil recourbé sur une forme de 5 mm de diamètre. Ce montage a été initialement développé pour étudier les aspects de la dégradation du signal électrique d'un contact, il ne permet pas de mesurer la force de friction. Aussi, le contrôle de l'amplitude du mouvement est fait de façon globale, c'est à dire que l'amplitude du mouvement est la même sur tous les échantillons. Le choix de la géométrie fil sur plaque comporte cependant un avantage au niveau de la fabrication des échantillons puisqu'il est moins coûteux d'obtenir des alliages sous forme de fil que sous forme de bille. La géométrie bille sur plaque est plus commune dans le monde de la tribologie alors que la géométrie fil sur plaque est plus utilisée dans le domaine des contacts électriques. Les échantillons sont donc des plaques 2.5 X 1.25 cm (partie fixe) et les fils sont des fils recourbés de grosseur 12 AWG (0.0808" ou 2.052mm diamètre).

4.4.1 Contrôle du mouvement de fretting fil-plaque

Une des principales modifications qui a été apportée au montage fil-plaque dans le cadre de cette thèse est le passage d'un moteur à came excentrique à celui d'un moteur pas à pas pour la génération du mouvement de fretting. Cette modification permet pour ce montage un contrôle plus fin du déplacement puisque les 10 stations sont soumises à la même amplitude de déplacement. Nous avons gardé le système de bras de levier et le mouvement se fait maintenant par l'entremise d'un moteur pas à pas couplé à une transmission linéaire. Ceci assure une très grande précision du mouvement du plateau mobile sur lequel sont maintenus fixe les 10 plaques de fretting. La figure 23 montre le schéma de fonctionnement du système.

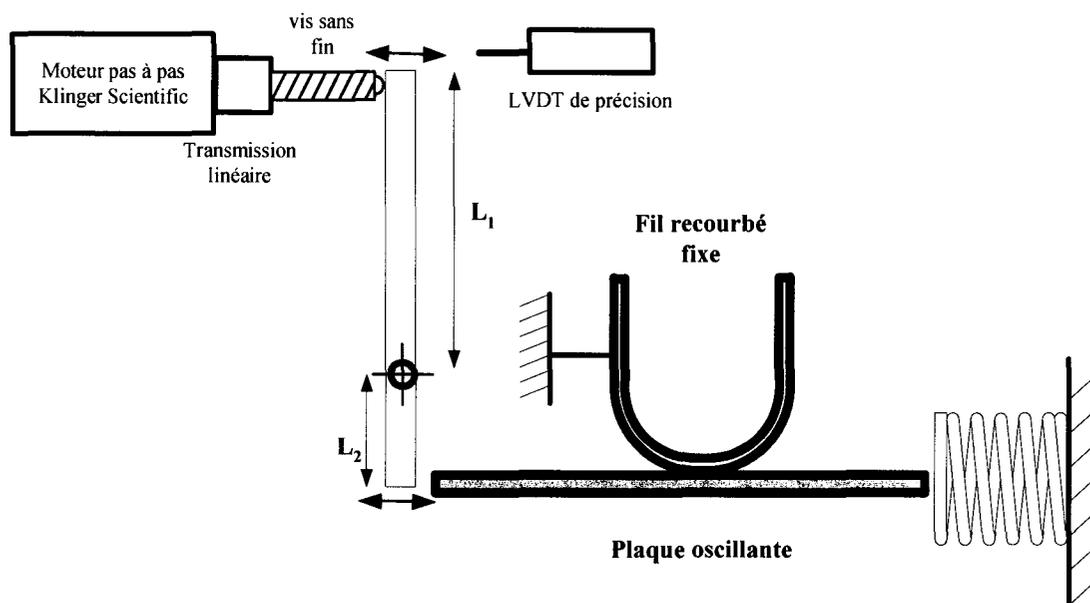


Figure 23 Schéma du montage de fretting fil-plaque

Le moteur pas à pas possède une résolution de $1/360$ tour sur le positionnement et la transmission donne un ratio de déplacement de la vis sans fin de $2.54 \mu\text{m}/1.8^\circ$. Un système de bras de levier à la sortie de la transmission fait en sorte que le déplacement est réduit par un ratio de 4:1. La figure 24 montre une photo du détail de la fixation du fil dans le porte-fil. Le porte-fil sert en même temps de point de contact puisque tout

comme pour le montage ÉTS, nous mesurons la valeur de la résistance électrique du point de contact du fil sur la plaque. Le contrôle de la position du contact est géré par un programme dans le contrôleur du moteur pas à pas. La figure 25 montre le schéma de la logique pour ce programme. La communication avec le contrôleur du moteur pas à pas se fait par l'entremise d'un lien HPIB. La figure 26 montre une photo du système de génération du mouvement.

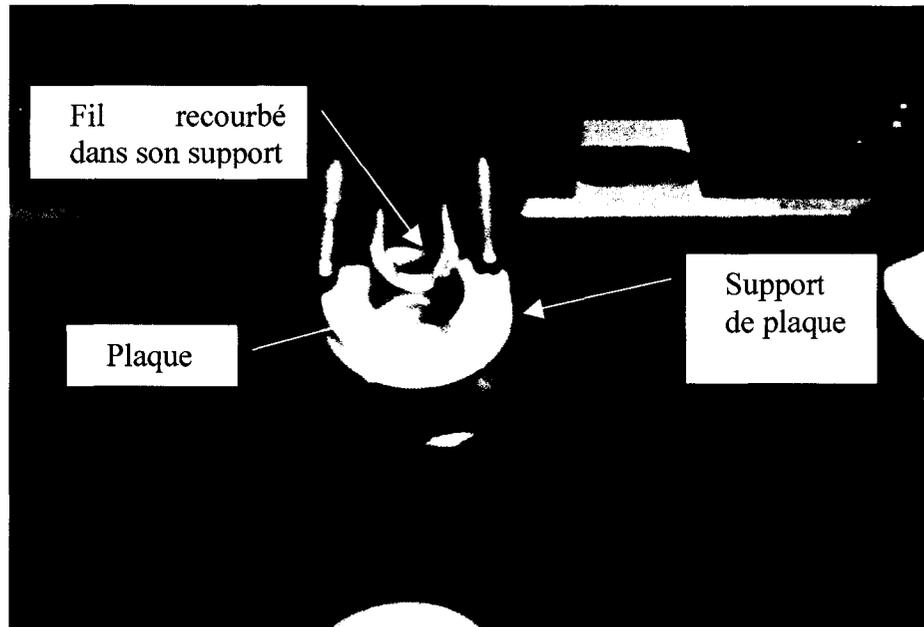


Figure 24 Échantillon de fretting fil sur plaque

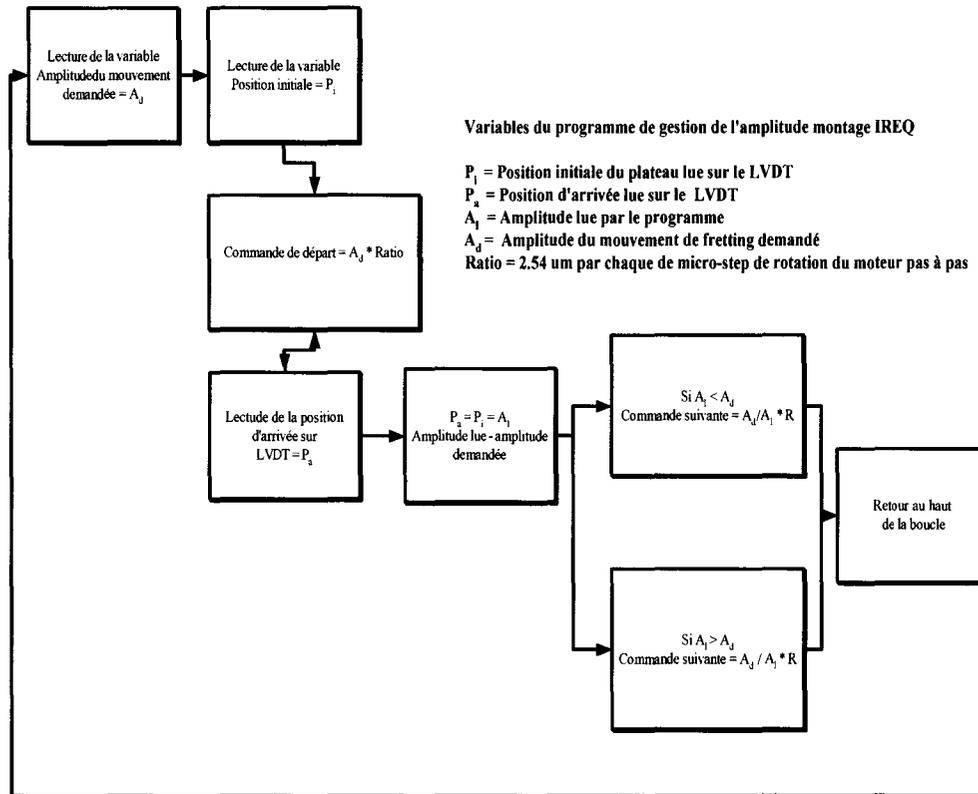


Figure 25 Schéma du contrôle du mouvement plateau de fretting fil-plaque

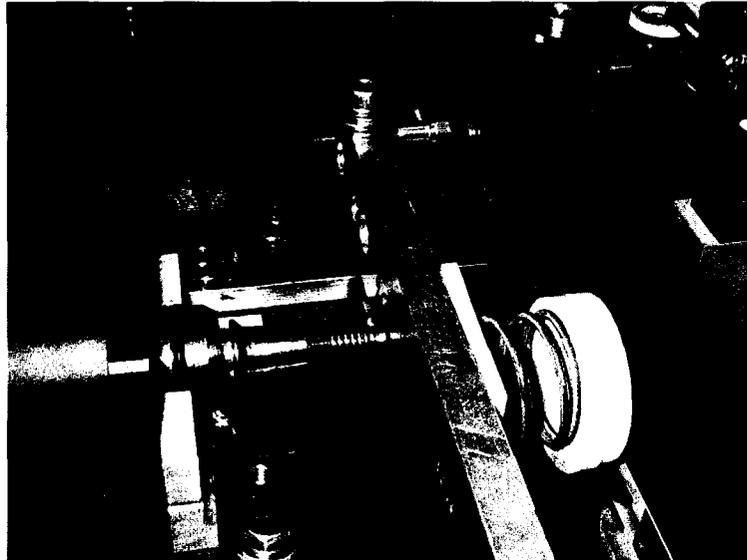


Figure 26 Système de bras de levier entre le moteur pas à pas et le plateau mobile

4.4.2 Mesures de la résistance de contact

Une des particularités du montage de fretting fil-plaque est qu'il est possible d'injecter dans le contact du courant soit CA ou soit CC. Ceci demande une instrumentation spécifique puisque l'on ne peut analyser le signal avec une carte d'acquisition de tension standard. Pour mesurer le courant au contact lorsque l'on utilise un courant CA, un oscilloscope est utilisé pour mesurer la tension CA aux bornes du contact. En mode CC, l'acquisiteur HP3497 est alors utilisé pour mesurer la tension aux bornes du contact. Du point de vue de l'instrumentation et de la programmation, la mesure avec le courant alternatif est beaucoup plus laborieuse que celle avec le courant CC. Les essais sont donc réalisés sur une station à la fois. La figure 27 montre le schéma du montage et des instruments de mesure utilisés à cet effet.

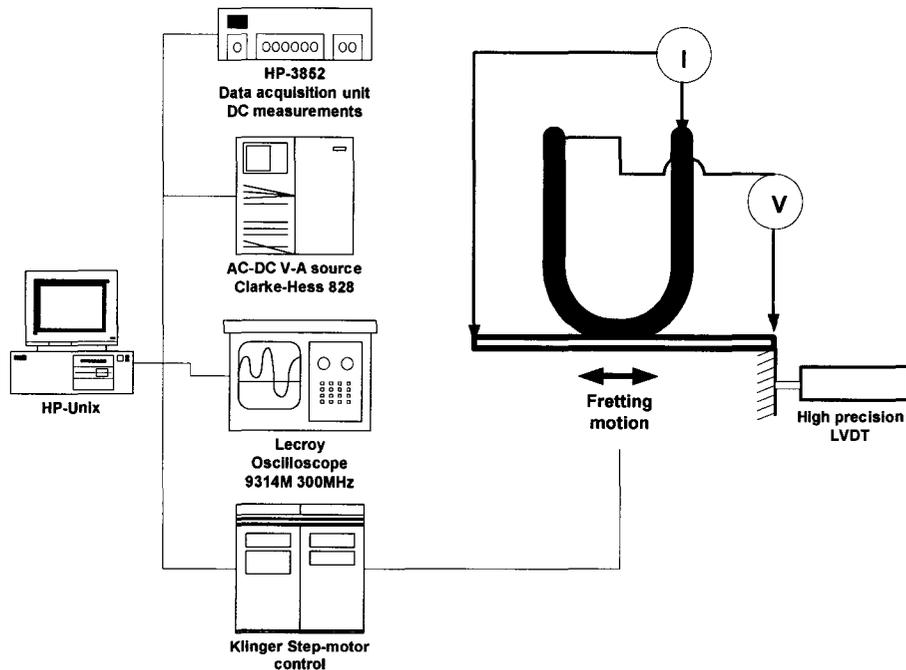


Figure 27 Fretting avec courant CA-CC fil-plaque

4.5 Essais de fretting avec courants CA et CC, préparation des échantillons

Pour l'étude de l'effet du type de courant sur le fretting, les échantillons utilisés sont des plaquettes de cuivre (2.5 cm X 1.25 cm) de grade électrolytique et des fils de cuivre de même nuance de format 12 AWG (American Wire Gage). Ces plaquettes sont fabriquées à partir de feuilles laminées. Avant les essais, tous les fils et plaquettes sont nettoyés avec un mélange de fréon et de méthanol (50/50). L'amplitude du mouvement de fretting était de 100 μm avec une charge de 400 grf (3.92N) et la fréquence de 1 Hz. Un courant de 50 mA (CA ou CC) est injecté dans le circuit. La valeur de la résistance de contact est calculée à partir de la tension électrique mesurée par l'acquisiteur de données (essais CC) ou par l'oscilloscope (CA). Dans les deux cas, la source de courant fonctionne en mode de courant constant. La valeur de la tension électrique lorsque le circuit est ouvert est d'environ 10.0 volts. Les valeurs de la résistance du contact ont été prises pendant l'essai lorsque le contact est mobile et à l'arrêt.

4.6 Essais sur les lubrifiants haute température

Il existe divers types de lubrifiants, couches métallique mince (1), fluides organiques (2), graisses (3), et lubrifiants solides (4). Dans les contacts électriques les lubrifiants sont utilisés principalement pour limiter l'apport d'oxygène dans la zone du contact et aussi pour réduire l'usure mécanique causée par le frottement et le fretting. La réduction de la corrosion et de l'oxydation sont d'autres bénéfices associés à l'utilisation des lubrifiants [Slade99].

Pour les essais réalisés sur les lubrifiants à contact électrique haute température, 5 composés ont été choisis sur la base de leur composition chimique et spécifications du manufacturier (température maximale d'utilisation). Ils sont tous à base de perfluoroalkylpolyéther (PFPE) sauf un qui est à base de Téflon. Il a été montré en littérature que le PFPE possède une grande stabilité thermique à des températures supérieures à 250 °C [Slade99]. La plupart de ces composés ne sont pas a priori utilisés

dans les contacts électriques. Ils sont cependant formulés de façon à résister à la dégradation provoquée par la haute température à augmenter l'adhésion aux surfaces ainsi qu'un taux d'usure faible. Tous ces composés ont été soumis à 4 types d'essais :

- essais de fretting avec courant CC;
- essais de cyclage thermique à fort courant;
- mesures de thermo-gravimétrie;
- exposition prolongée à haute température;

Le tableau IV montre les composés et certaines de leurs propriétés qui ont fait partie de notre étude.

Tableau IV

Lubrifiants haute température sélectionnés pour cette étude

Composé	Fabriquant	Plage de Température (°C)	de Composition	Viscosité @ 40°C (cSt)	Additifs
Uniflor 8511	Nye Lubricants	-50 / +225	PFPE	65	Aucun
Uniflor 8512	Nye Lubricants	-50 / + 225	PFPE	65	Aucun
Uniflor 8622	Nye Lubricants	-15 / + 250	PFPE	510	Aucun
Superlube grease	Superlube	-43 /+ 232	Teflon	N/D	Aucune
Krytox 246	GPL Dupont	-20 / +300	PFPE	N/D	Cu

4.6.1 Essais de fretting, lubrifiants haute température

Pour les essais de lubrifiants à haute température, les essais de fretting ont donc été réalisés sur des échantillons fil-plaque de cuivre sur cuivre et étain sur cuivre. Les conditions de l'essai étaient: fréquence = 1Hz avec alternance entre 100 cycles de déplacement avec amplitude de 25 microns et 100 cycles de 100 μm , force de contact de 100 grf (0.98N), 500 grf (4.91N) et 700 grf (6.87N). L'alternance de l'amplitude de mouvement permet une meilleure répartition du lubrifiant, de façon à augmenter l'effet de recouvrement de la surface. Tout comme pour les essais avec courant alternatif et continu, la température et l'humidité relative étaient maintenues à 21-23 °C et 30-33 %RH. Dans la zone de contact, nous avons appliqué une mince couche du composé à évaluer soit environ 200 à 300 μm . Les échantillons sont ensuite laissés jusqu'à ce que le signal de la résistance de contacts ait atteint la valeur de tension du circuit électrique ouvert.

4.7 Essais de fretting, évaluation des alliages sans plomb

Pour la partie visant à étudier le comportement des alliages sans plomb, nous avons initialement sélectionné 7 alliages pour les essais. On retrouve présentement plusieurs alliages sans plomb dont la majorité ont une forte concentration en étain et argent [AIM04, Lead04-1, Lead04-2]. Nous avons fait une présélection des alliages à étudier en fonction de la température de fusion et de la composition chimique. L'argent et l'étain sont des métaux qui sont relativement importants dans le domaine des contacts électriques. Nous avons choisi trois alliages avec différentes compositions des deux et un alliage avec faible température de fusion avec une composition d'étain et de bismuth. Les alliages sélectionnés l'ont aussi été fait en tenant compte de leur température de fusion de façon à avoir une bonne représentation entre les alliages à température de fusion élevée et faible.

Selon la composition de l'alliage, la température de fusion peut varier entre 118 °C et 356 °C. Les alliages sélectionnés sont alors été soumis à des essais d'enrobage sur des plaques de cuivre de fretting. Pour réaliser des essais de fretting fil-plaque, il est plus facile de commander l'alliage sous forme de fil (12 AWG) et ensuite d'enrober des plaques de cuivre en les trempant dans un bain d'alliage liquide. Les essais d'enrobage ont montré que seulement 4 d'entre eux permettaient d'obtenir lors de l'enrobage, des épaisseurs constantes et suffisamment épaisseurs (+20 µm) pour les évaluer sous fretting. Les alliages sans plomb retenus pour les essais sont montrés au tableau V.

Avant d'être trempées, les plaques de cuivre ont été nettoyées avec un solvant/dégraissant pour être ensuite trempées dans un bain d'alliage liquide dont la température était maintenue à 50°C au-dessus de la température de fusion. Selon l'alliage, l'épaisseur de métal déposé sur la barre obtenu de cette façon varie entre 20-50 µm. Des essais de fretting ont par la suite ont été réalisés sur ces plaques avec les paramètres suivants: Fréquence 0.5Hz, courant = 50mA CC, force de contact = 0.24N, 0.98N, 2.45N et 4.90 N. Ces paramètres ont été sélectionnés de façon à permettre une comparaison avec des essais réalisés avec des alliages classiques.

Tableau V

Propriétés spécifiques des alliages sans plomb évalués

Alliage	Température de fusion (°C)	Micro-dureté HV (10 grf)	Résistivité électrique (µOhm/cm)
Sn-Ag2.5-Cu.8-Sb0.5	217	17.6	13.8
Sn-Ag3.8/4-Cu0.5-0.7	217	15.2	12.4
Sn-Cu0.7	227	12.9	11.4
Sn 48-Bi58	138	17.2	30.0

4.8 Dégradation des surfaces boulonnées de contact par cyclage thermique

Tel que discuté dans l'introduction du présent chapitre, dans le cadre de cette thèse, nous avons réalisé des essais de dégradation par vieillissement thermique de deux natures; par chauffage à l'aide d'un courant CC et par conduction thermique dans un four.

La technique de dégradation des interfaces de contact par cyclage de courant a été largement utilisée par Braunovic et d'autres auteurs dans l'évaluation de la fiabilité des contacts boulonnés et comprimés. Elle a servi à étudier la dégradation de divers matériaux et de lubrifiants à contact électrique [Brau86, Brau88, Brau92, Brau99]. Plusieurs producteurs d'électricité et des fabricants de raccords électriques utilisent ce type d'essai normalisé (CSA C-57, IEC et ANSI C119.4).

L'essai de dégradation thermique accéléré produit un échauffement général très élevé de toute la connexion et aussi une sur-température des points de contacts ("*a-spots*"). Cette élévation de la température favorise l'action des mécanismes de dégradation tel que la relaxation de contrainte, l'oxydation, le fretting et la formation des couches intermétalliques [Slade99]. De plus, certains de ces mécanismes requièrent une température minimale spécifique afin de démarrer. Ces essais ont été réalisés à l'IREQ sur le montage développé à cet effet.

Typiquement, les raccords électriques à évaluer sont montées en série dans une boucle de courant et une source CC de forte capacité (2000 A). La figure 28 montre le schéma de la boucle de courant construite à cet effet. Cette boucle est contrôlée par un programme écrit en langage HPVee sur plate-forme Unix qui suit les paramètres de l'essai et l'acquisition des données de température et de résistance de contact de chacune des jonctions. Un contrôleur de type PID a été développé par l'auteur en langage HPVee pour permettre de stabiliser la valeur de courant rapidement. Par mesure de sécurité, des instructions spécifiques sont incluses afin de couper le courant advenant la dégradation rapide d'une des jonctions ou la défaillance d'un thermocouple servant à mesurer la

température des jonctions. Un chauffage rapide par fort courant pendant 5 minutes fait monter la température de la jonction à la température désirée. Par la suite, le courant est coupé pour permettre à la boucle de se refroidir pendant 15 minutes. Cette séquence est reproduite en continue jusqu'à ce que le programme détecte que la température est trop élevée et que l'essai doit être arrêté par mesure de sécurité ou que l'utilisateur demande d'arrêter l'essai. Typiquement, ce type d'essai peut durer des jours sinon des semaines. Selon les types de raccords qui sont soumis à l'essai, un certain ajustement du courant est nécessaire au début de l'essai afin de déterminer le courant requis pour atteindre la température voulue dans le temps désiré. Le graphe 9 montre le profil dans le temps du courant injecté dans une jonction lors d'un essai de courant type. On y remarque que l'échauffement est très rapide et que la température redescend graduellement après la coupure du courant.

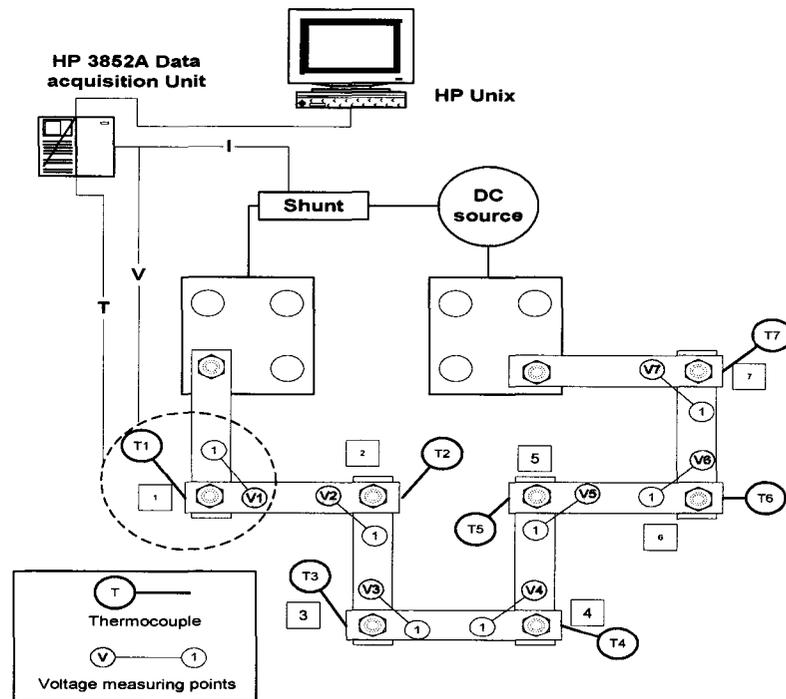
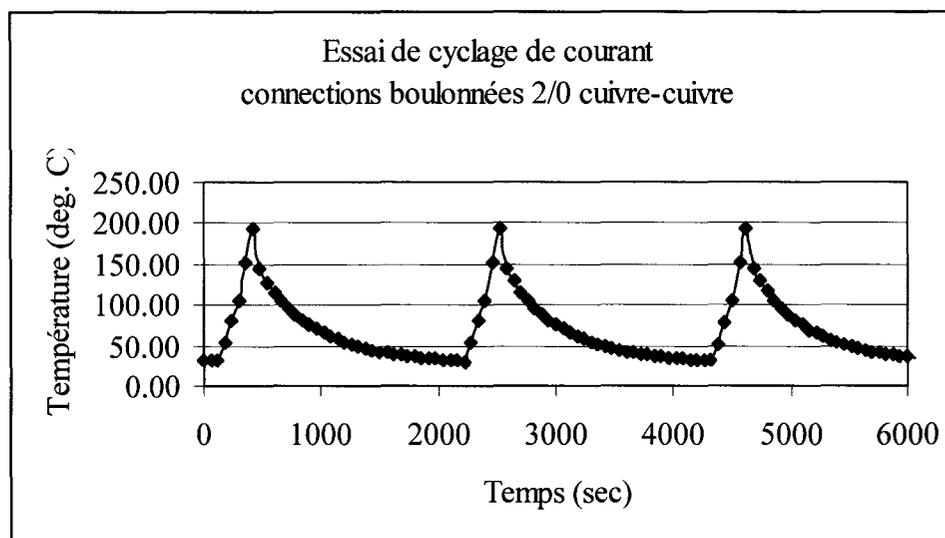


Figure 28 Montage de vieillissement thermique des jonctions boulonnées avec graisses haute température



Graph 9 Cycle type d'essai de cyclage thermique [Gagn02]

4.8.1 Évaluation des lubrifiants haute température et alliages sans plomb par cyclage thermique

Dans le cadre de cette thèse, des essais de cyclage thermique ont été réalisés sur des raccords boulonnés de barres omnibus dont les interfaces étaient enduites des lubrifiants montrés au tableau IV. Le même type d'essai par cyclage thermique a aussi été réalisé sur des raccords boulonnés avec des barres omnibus de cuivre et d'aluminium dont les bouts ont été enrobés avec les alliages montrés au tableau V. La technique d'enrobage est la même que celle détaillée à la section 4.5 pour les plaques de fretting.

Pour les essais de dégradation des lubrifiants haute température, une boucle de courant a été construite à partir de barres omnibus de dimension de 25 mm X 6 mm X 200 mm qui sont boulonnées en série et raccordées aux bornes d'une source de courant CC de 2000 A. La section des ces barres est fabriquée de sorte que les connections boulonnées soient les mêmes que celui utilisés sur les jonctions des conducteurs de type 2/0 AWG (9.266 mm). L'essai a été réalisé avec des barres omnibus de cuivre dans un premier temps et ensuite avec des barres de même dimension mais en aluminium 6061.

Pour ces essais, les barres sont chauffées rapidement pendant 5 minutes afin de faire monter la température de la jonction à 200°C. La séquence de chauffage-refroidissement est tel que décrite à la section précédente. Tous les joints boulonnés ont été serré de la même manière avec le même couple de serrage (20 Nm). Tous les joints sont aussi munis de rondelles Belleville afin de minimiser l'effet de la relaxation des contraintes. Tous les paramètres montrés à la figure 28, (T1 à T7 et V1 à V7) sont sauvegardés à toutes les minutes durant l'essai.

4.8.2 Lubrifiants haute température, cyclage thermique par conduction

Afin de comparer l'effet du type de chauffage, un circuit de raccords de construction identique à celui de la section précédente a été laissé dans une chambre environnementale et chauffé par radiation à 200°C pour la même période de temps que celle chauffée électriquement. Les barres dans la chambre environnementale sont donc chauffées par radiation thermique alors que la deuxième série de barres est chauffée par effet Joule.

4.8.3 Alliages sans plomb, cyclage thermique

Tel que souligné au chapitre 1, les problèmes liés à la toxicité du plomb dans l'environnement font en sorte que le plomb est en voie de disparaître des assemblages de connexion électrique dans l'industrie. En plus d'évaluer le comportement sous fretting des alliages du tableau V, nous les avons soumis à des essais de cyclage thermique par effet Joule et par radiation. Ceci afin d'étudier la croissance des phases intermétalliques et de comparer l'effet du type de chauffage sur la nature des couches intermétalliques.

Une boucle de courant a été construite à partir de barres omnibus de cuivre de dimension 25 mm X 6 mm X 200 mm qui sont boulonnées en série et raccordées aux bornes d'une source de courant CC de 2000 A. Ces barres sont identiques à celle utilisées pour les essais de dégradation des graisses haute température (section 4.8).

Celles-ci ont été nettoyées avec un solvant/dégraissant avant d'être trempées dans un bain d'alliage liquide (tableau V) dont la température était maintenue à 50°C au dessus de la température de fusion. Selon l'alliage, l'épaisseur de métal déposé sur la barre obtenu de cette façon varie entre 20-50 µm. Les barres omnibus qui étaient enrobées avec les alliages Sn-Ag2.5-Cu0.8-Sb0.5, Sn-Ag3.8-4-Cu0.5-0.7 et Sn-Cu0.7 (température de fusion \cong 215°C) ont été chauffées à 150°C pendant 25 jours. Les barres avec l'alliage Sn42-Bi58 ont pour leur part été chauffées à 100 °C pour aussi 25 jours. Des barres qui n'ont pas été chauffées ont servi de groupe de contrôle pour vérifier l'effet du chauffage thermique et électrique. Tous les spécimens ont par la suite été préparés pour que l'interface cuivre-alliage soit observée au microscope optique, à balayage et à l'EDX pour en analyser la composition.

4.9 Lubrifiants haute température, analyse par thermogravimétrie (TGA)

La thermo-gravimétrie est un outil utilisé pour évaluer la dégradation par dégazage des composés. Le poids d'un échantillon du composé à étudier est mesuré à différentes températures de celui-ci. Cette évaluation permet d'obtenir des informations sur la stabilité thermique et la composition chimique des lubrifiants haute température que nous avons évalué sous fretting et cyclage thermique. Un échantillon de chacun des composés a été analysé dans l'appareil Perkins Elmer TGA 7. L'échantillon est chauffé à un rythme de 10°C par minute jusqu'à une température maximale de 1250 °C. Pour chacun des lubrifiants, un échantillon de 10 mg a été analysé.

4.9.1 Exposition prolongée à haute température pour les lubrifiants

Le dernier essai auquel ont été soumis les lubrifiants, est l'exposition prolongée à 200°C, dans une chambre environnementale. Une mince couche de chacun des lubrifiants a été appliquée sur des plaques d'aluminium. Celles-ci ont été laissées dans la chambre environnementale Sun pendant 48 heures. Les plaques ont été photographiées avant

l'essai et après 24 et 48 heures. Cet essai a pour but de déterminer si des changements dans l'aspect visuel se produisent avec la température.

4.10 Mesures de conductivité électrique des alliages sans plomb

Suite aux vieillissement thermique et électrique des barres omnibus de cuivre recouvertes des alliages sans plomb, des mesures de résistivité électrique de surface ont été réalisées sur les barres. Ces mesures ont pour but de vérifier si le vieillissement thermique et/ou électrique a une influence sur la création des couches intermétalliques pour ces alliages [Smits58].

L'appareil utilisé est le DMO 350 qui est un micro-ohmmètre muni d'une pointe de lecture qui permet de réaliser la mesure de résistivité selon la méthode à quatre fils. Cet appareil possède une résolution de $0.01 \mu\Omega$ et permet de détecter les changements de résistance entre la couche d'alliage sans plomb et dans le revêtement de la barre omnibus. Tel que montré à la figure 29, la distance entre les électrodes de 1 mm permet ce genre de mesure près de la surface. La profondeur de la pénétration du courant dans le matériel est déterminée par la distance entre les électrodes et se limite à environ 1.5 fois la distance entre les électrodes [Hain89].

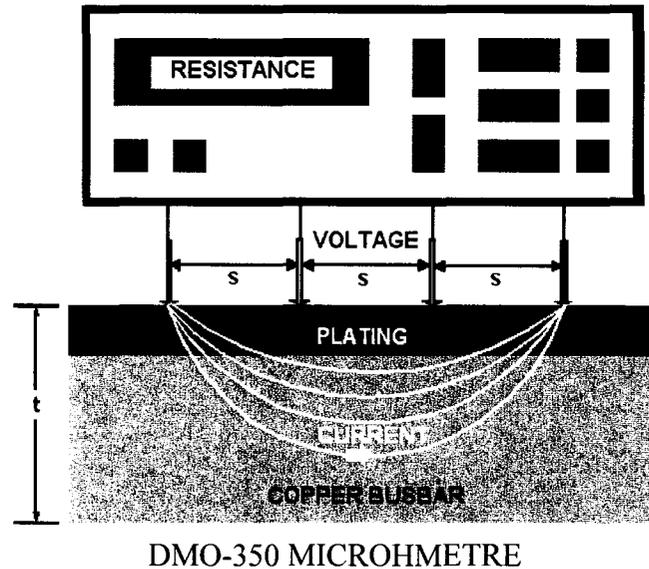


Figure 29 Schéma simplifié de la mesure de résistance à quatre fils réalisée avec l'appareil DMO-350 [Brau04]

4.11 Conclusion

En résumé, il a été démontré avec le montage bille-plaque qu'il est possible avec une instrumentation très simple de mesurer la résistance de contact ainsi que la force de friction sur un contact bille-plaque de faible dimension. De plus, le montage permet de régler l'amplitude du mouvement indépendamment sur chacune des stations.

Les variables indépendantes de la machine sont donc le couple bille/plaque, l'effort normal appliqué au couple, et le temps de fretting imposé. Il existe une seule variable dépendante de la machine : la fréquence de sollicitation (choisie en fonction de la vitesse du moteur). Cette liste ne tient pas compte de la possibilité du passage d'un courant électrique. Ainsi si l'on étudie en même temps l'effet du passage d'un courant électrique, on doit doubler le nombre d'essais. À partir des essais de validation qui ont été réalisés sur le montage et du plan d'expérience mis sur pied, il sera possible de réaliser les mesures suivantes :

- déterminer l'influence de l'amplitude et de la présence du courant sur le taux d'usure des différents couples soumis aux essais de fretting;
- analyser par le changement d'amplitude si les lois du frottement ou du glissement s'appliquent en fonction de l'amplitude parcourue;
- calculer le taux d'usure en fonction de l'effort normal;
- calculer le taux d'usure en fonction de l'amplitude;
- effectuer une comparaison entre les résultats obtenus avec le montage bille-plaque et le montage fil-plaque.

Nous avons expliqué dans ce chapitre que plusieurs montages d'essai ont été utilisés à l'IREQ pour étudier des problématiques liées à la dégradation des contacts électriques. Ces essais ont pour but d'étudier dans un premier temps, un aspect fondamental de la dégradation des contacts électriques sous fretting, soit quelle est l'influence du type de courant (CC ou CA) sur le comportement d'un contact cuivre-cuivre fil sur plaque.

De plus, afin de répondre à de nouvelles problématiques dont fait face le domaine de la dégradation des contacts électriques, deux autres sujets ont été retenus et étudiés: réaliser des essais de comparaison du vieillissement thermique par conduction versus par chauffage électrique de certains nouveaux alliages sans plomb et aussi du lubrifiant à contact électriques pour les raccords à haute température. La figure 30 schématise tous les essais réalisés dans le cadre de cette thèse.

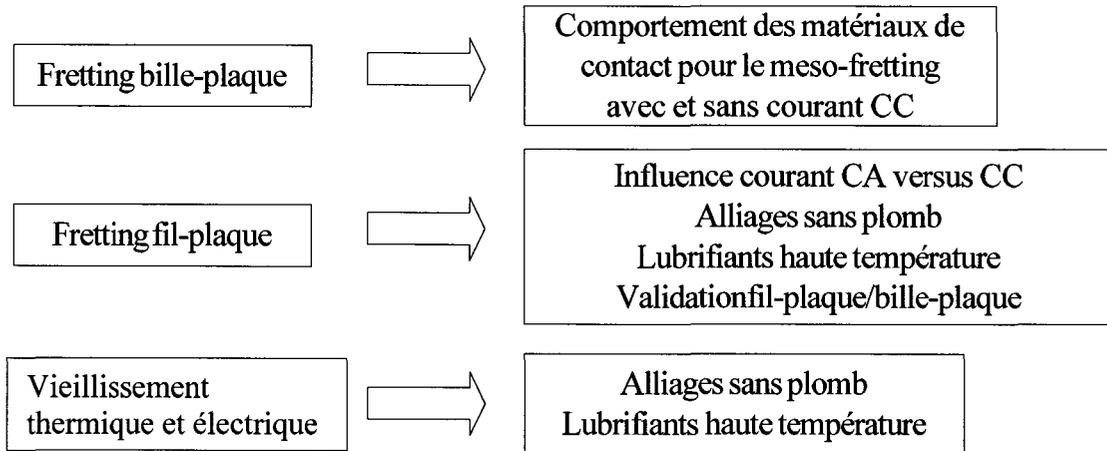


Figure 30 Résumé des essais réalisés

CHAPITRE 5

RÉSULTATS

5.1 Introduction

Ce chapitre résume les principaux résultats obtenus tant avec les montages de fretting que les montages de dégradation thermique des contacts. Les résultats des essais ayant trait aux objectifs de l'étude de la tribologie du meso-fretting seront présentés dans un premier temps. Viennent ensuite les résultats obtenus lors des essais de dégradation thermique, des effets observés dans l'analyse de l'influence du type de courant et des résultats obtenus avec les alliages sans-plomb et les lubrifiants haute température. À la dernière section, nous avons regroupé les principales conclusions et les points principaux de l'originalité de nos contributions.

5.2 Fretting et meso-fretting sans courant électrique

La plupart des échantillons de fretting qui ont été analysés tant à l'ÉTS qu'à l'IREQ ont été observés au microscope optique et au microscope à balayage électronique. Ces observations des traces de fretting ont principalement 3 buts :

- mesurer le taux d'usure selon la méthode décrite à la section 3.7;
- obtenir des informations sur le mode de dégradation de la surface, tels que le délaminage, la présence des fissures, taille et morphologie des débris, etc.;
- réaliser des analyses au rayon-X pour déterminer la nature des oxydes et des débris.

Après chacun des essais, les traces sont donc observées au microscope, une attention particulière doit être apportée à la manipulation des échantillons à cette étape. Dans

certains cas, les débris et oxydes présents sur surface sont très légers et peuvent facilement être déplacés lors du transport entre le montage et le microscope. Pour cette raison, les échantillons produits ont du être observés sur place aussi bien à l'IREQ qu'à l'ÉTS. Lors des mesures effectuées à l'aide du microscope optique à l'ÉTS, le taux d'usure des billes en alumine, en acier, en aluminium et en laiton est toujours négligeable et n'a pu être détecté. Seule les billes en cuivre et de laiton présentaient un taux d'usure mesurable. Pour calculer le volume enlevé, nous avons donc tenu compte de cette constatation expérimentale. Comme nous l'avons déjà remarqué lors de l'introduction, la dégradation par fretting s'effectue selon deux modes principaux :

- l'initiation et la propagation de fissures où la mécanique de rupture joue un rôle important. Ce stade est surtout observé en glissement partiel;
- la formation de débris, quant à elle est surtout observée dans les zones de glissement total.

5.2.1 Cas du 52100 sur 316L

Pour le cas spécifique de l'acier 52100 sur l'acier inoxydable 316L, nous avons constaté que l'essentiel de la destruction du contact se fait par la production de fines particules dans le cas des billes en acier, en laiton et en aluminium. Tous ces matériaux moins durs que l'acier 316L. Le phénomène élémentaire est donc la formation de petites particules métalliques de quelques μm de diamètre. La figure 31 montre le type de particules formées en fonction de l'amplitude du mouvement de fretting. Pour de faibles amplitudes de déplacement ces petites particules forment une fine poudre qui s'évacue difficilement de la zone de frottement (fig. 31A).

Lorsque l'amplitude de mouvement augmente, ces fines particules s'agglomèrent pour former des débris de taille moyenne (fig. 31B) qui deviennent de plus en plus grands au fur et à mesure que l'amplitude augmente. Le mouvement de la bille laisse deux types de

débris. D'une part ceux qui sont formés en bout de piste et ceux sur le côté (fig. 31C). Dans les 2 positions (frontales ou latérales), des gros débris sont formés par agglomération de particules fines, de l'ordre de quelques μm . La présence de forces de Van Des Waals explique très probablement l'existence de ces "copeaux". Les photos montrées aux figures 32 et 32 expliquent ce mécanisme. La présence de fins débris d'oxyde est mise en évidence sur la photo 32 (amplitude = $100\ \mu\text{m}$) tandis que la figure 33 montre la formation de plaques de débris pour des grandes amplitudes ($900\ \mu\text{m}$).

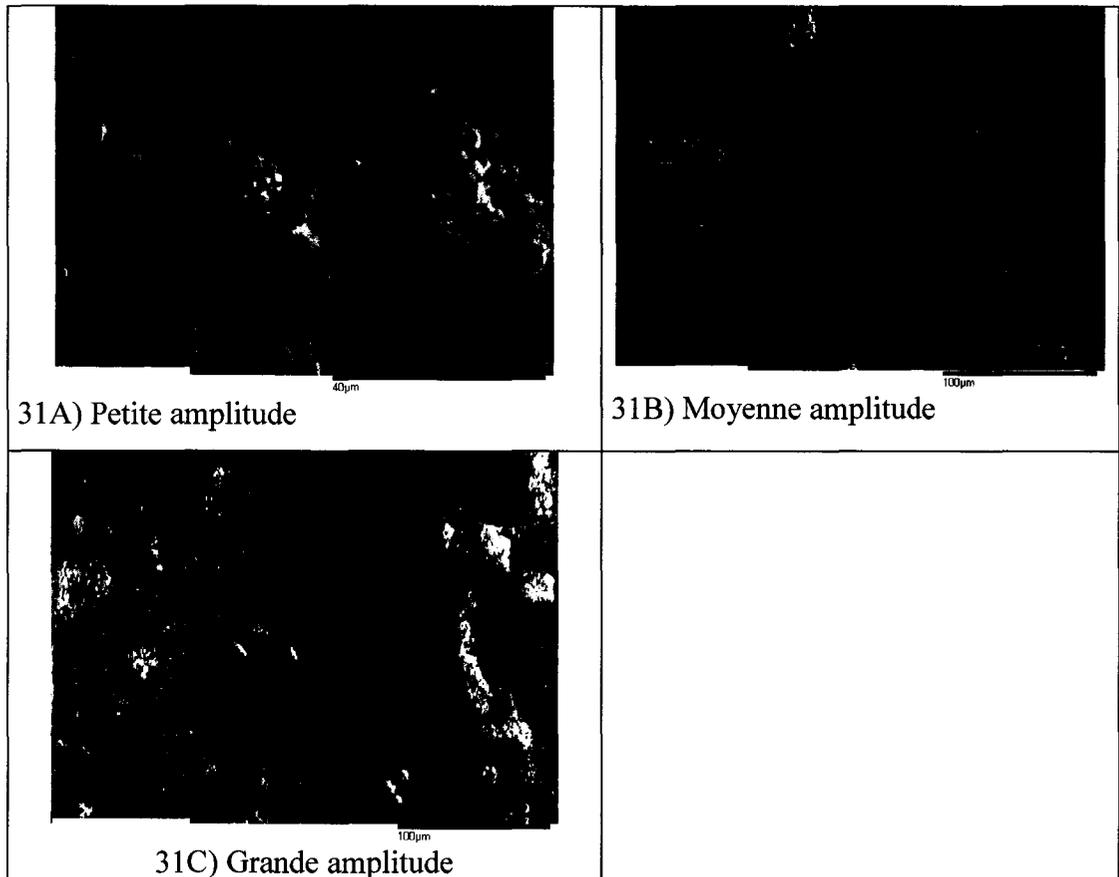


Figure 31 Essais de fretting, ETS, bille d'acier 52100 sur plaque 316L



Figure 32 Essai avec bille 52100 plaque 316L, force = 0.72N, amplitude = 100µm, sans courant



Figure 33 Essai avec bille 52100 plaque 316L, force = 0.72N, fréquence = 1 Hz, sans courant, amplitude = 900µm

De même qu'on a pu noter une différence de création de débris pour diverses amplitudes pour l'acier 52100 sur l'acier inoxydable 316L. On note une différence d'usure également. Les photos ci-dessous représentent la trace observée pour différents paliers d'amplitude (figure 34). Toutes ces photos ont été prises pour un nombre de cycles constant de 5489.

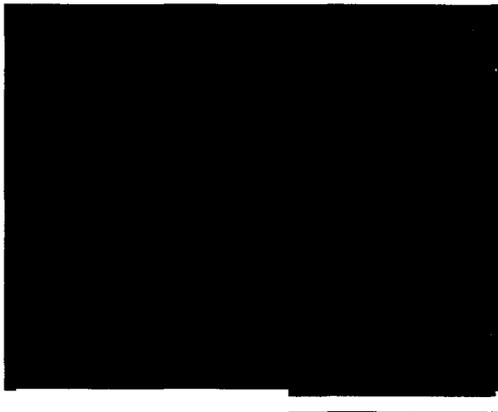


Photo A : bille 52100 plaque 316L
0.72 N-sans courant
Amplitude = 600µm

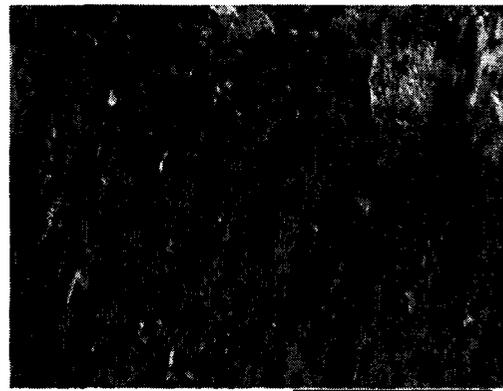


Photo B : bille 52100 plaque 316L,
0.72 N-sans courant
Amplitude = 100µm

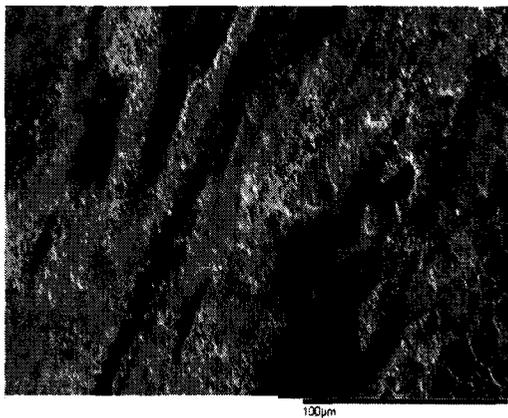


Photo C : bille 52100 plaque 316L
Amplitude = 600µm



Photo 9 : bille 52100 plaque 316L,
Amplitude = 100µm

Figure 34 Traces observées pour différents paliers d'amplitude 52100 sur 316L
fréquence : 1 Hz et force de contact: 0.72N

Il y a une grande différence du mécanisme d'usure suivant l'amplitude. Pour l'amplitude de 600 μm , on obtient une couche micro-alliée bien établie qui recouvre toute la surface. Par contre, quand on augmente le nombre de cycles, on remarque une différence notable du type d'usure. Le contact change de nature en fonction de l'amplitude du mouvement. En effet, lorsque l'amplitude est grande, le contact ne peut être considéré comme ponctuel. Le rapport R est alors très grand.

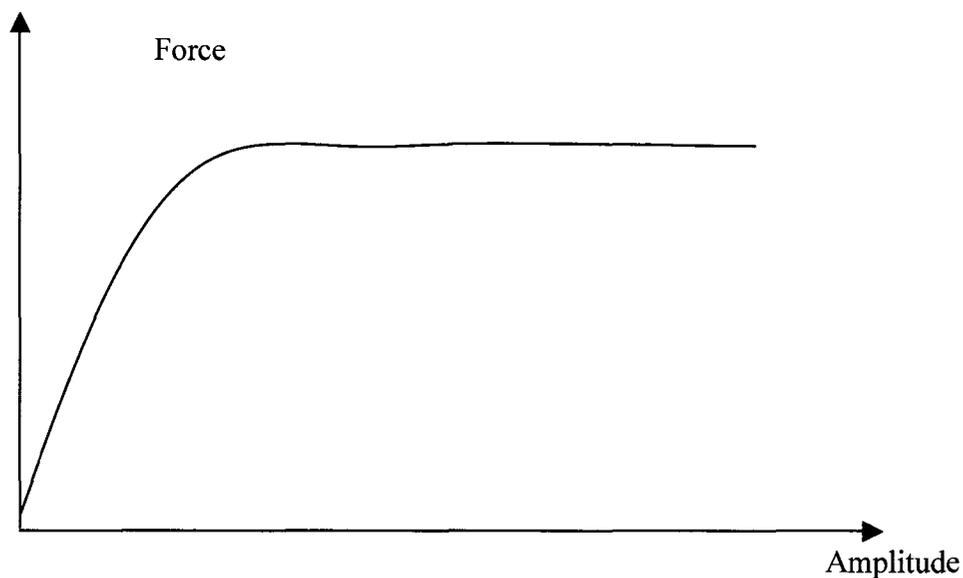
$$R = \frac{\textit{amplitude}}{\textit{diamètre du contact}} \quad (5.1)$$

La nature des débris évolue avec l'amplitude du mouvement passant de fines particules à une couche continue formées de particules compactées (figure 34). La forme des débris d'usure renseigne sur le mécanisme de frottement. Plus le débris est fin, plus le fretting est prédominant. Au fur et à mesure que l'amplitude augmente, on observe une agglomération de fines particules. Pour des taux d'usure plus élevés, il y a production de gros copeaux. Pour des amplitudes de déplacement supérieures à 300 μm il y a formation d'une couche de micro alliage sur la surface. Cette couche est composée d'un amalgame de particules oxydées et non-oxydées qui forment une couche solidaire. Cette couche micro-alliée assure le frottement. L'essentiel du glissement se produit à l'intérieur de cette couche de surface. Lorsque l'amplitude diminue, la couche de troisième corps devient de plus en plus faible. Pour de faibles amplitudes de l'ordre de 40 μm ou moins, la surface est recouverte par une couche mono-particule de fins oxydes.

5.2.2 Effet de la force tangentielle

Pour les grandes amplitudes, il existe un effort en dessous duquel le taux d'usure est très important. En effet, il faut un effort minimum pour créer des débris par arrachement. En dessous de cet effort, ces gros débris sont inexistantes et donc ne peuvent lubrifier le contact. Ces copeaux à caractère lubrifiant provoquent donc par leur absence un

mécanisme de dégradation très rapide, sans doute très proche de la zone III dans le mécanisme de rupture décrit au graphe 6. La zone élastique déformée est supérieure à $10\ \mu\text{m}$, cela signifie que les particules sont créées à partir d'un matériau totalement écroui. Elles sont donc extrêmement dures. L'évolution de la force tangentielle est grossièrement indiquée au graphe 10. La force tangentielle augmente avec l'amplitude de glissement.



Graphe 10 Évolution de force tangentielle avec l'amplitude du glissement

Selon Mindlin [Mindl49], le micro-glissement s'amorce à la périphérie du contact. Cette zone de micro glissement peut être considérée comme un anneau de rayon intérieur c et de rayon extérieur a . Lorsque $c < r < a$, il y a glissement avec frottement. En revanche, lorsque $r < c$, l'hypothèse de non-glissement domine. La surface de glissement en fretting peut être décomposée en deux domaines appelés *collée* et *glissement*. Au centre du contact, on observe une zone constante dite collée (*stick*). Elle est entourée d'une zone où le glissement est important (*slip*).

Pour de plus amples amplitudes, la zone collée centrale disparaît et le frottement se retrouve en glissement total. Tel que montré à la figure 35, on y note trois différentes morphologies de surface, dans un premier temps, on note de très fins débris en périphérie de la trace. Sur la surface, on retrouve deux types de zones soit des endroits où l'on a une couches de fines particules oxydées (zones blanchâtres), et ailleurs où ces particules forment une couche micro alliée qui est collée sur la surface (zones grises). La figure 36 illustre le mécanisme de fabrication des débris en fonction de l'amplitude du déplacement.

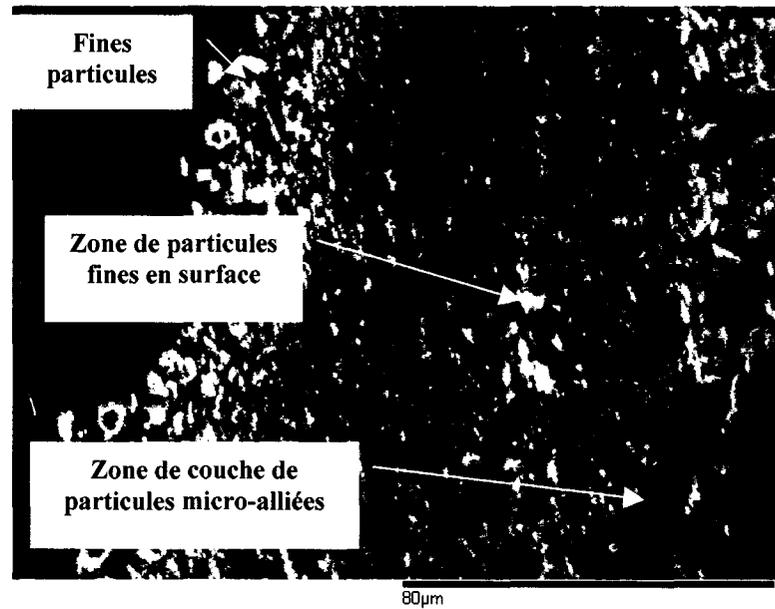


Figure 35 Zone micro alliée très fine, acier inoxydable, 52100 sur 316L, 450 µm sans courant

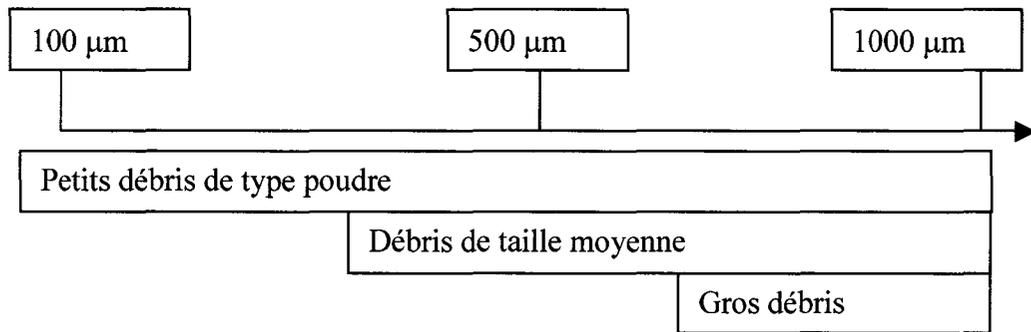


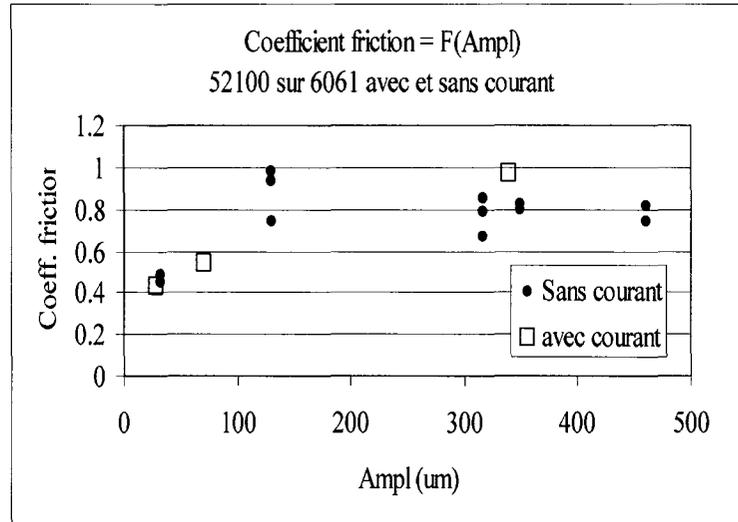
Figure 36 Transition des mécanismes en matière de débris

5.2.3 Effet de l'amplitude et du courant sur le coefficient de friction moyen

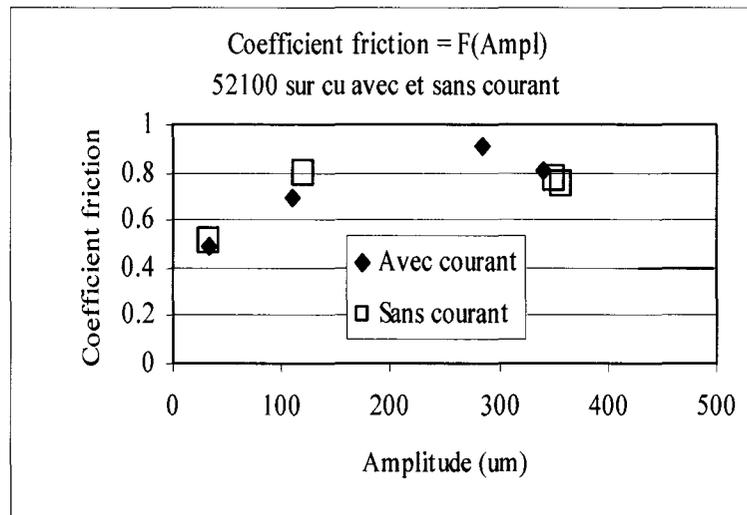
Les résultats de la mesure de la force de friction ont été analysés pour la plupart des essais réalisés à l'ÉTS. Nous en avons extrait une valeur du coefficient de friction moyen pour la durée de chacun des essais. Les graphes 11 à 15 montrent une partie des résultats obtenus lors de cette analyse. On y montre la variation du coefficient de friction moyen en fonction de l'amplitude du mouvement de fretting pour la plage d'amplitudes étudiée pour les différents matériaux étudiés. On note au graphe 11 (acier 52100 sur l'aluminium), que le coefficient de friction se situe entre 0,6 et 0,8 pour tous les essais avec et sans courant dans la plage d'amplitude entre 100 et 500 μm .

En dessous de 100 μm , les valeurs sont comprises entre 0,4 et 0,6. Ce résultat est à peu près identique au cas aluminium-aluminium (6061) montré au graphe 13. Pour l'acier 52100 sur le cuivre, on remarque aussi un coefficient de frottement plus faible à basse amplitude (<100 μm) mais aussi à une valeur d'amplitude approchant 500 μm (graphe 12). Nous avons aussi analysé l'effet du courant sur le coefficient de friction. Dans la plupart des cas, sauf pour l'acier 52100 sur le cuivre (graphe 12) et l'aluminium 6061 sur l'aluminium 6061 (graphe 13), les valeurs de coefficients de friction moyen sont relativement différents avec et sans contact électrique. On note même des valeurs de

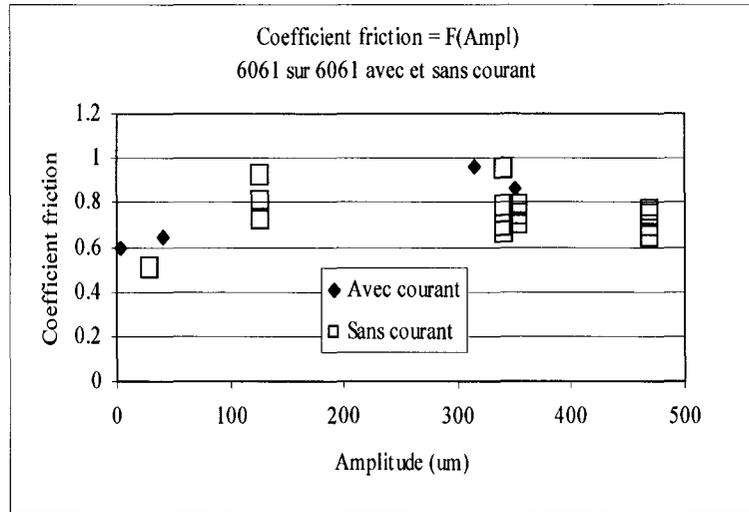
coefficient de friction beaucoup plus faibles pour toute la plage des amplitudes dans le cas du cuivre sur le cuivre (graphe 15).



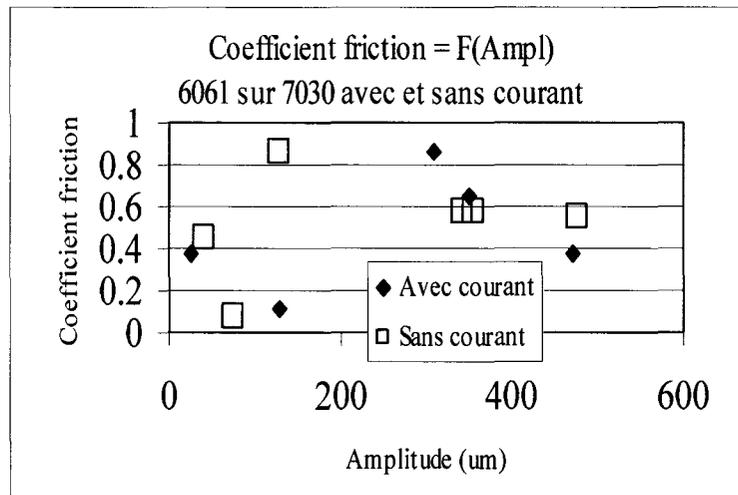
Grappe 11 Graphe montrant le coefficient de friction = $F(\text{ampl})$, avec et sans courant électrique, acier 52100 sur aluminium 6061



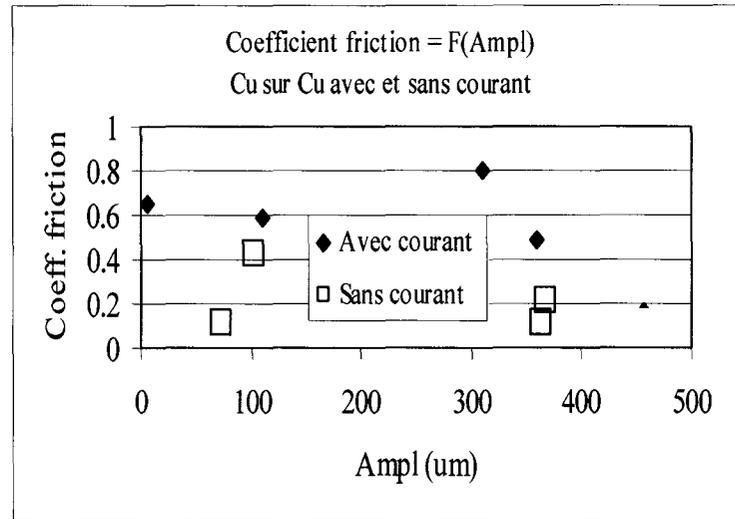
Grappe 12 Graphe montrant le coefficient de friction = $F(\text{ampl})$, acier 52100 sur cuivre avec et sans courant électrique



Grphe 13 Grphe montrant le coefficient de friction = F(ampl), aluminium 6061 sur aluminium 6061 avec et sans courant électrique



Grphe 14 Grphe montrant le coefficient de friction = F(ampl), aluminium 6061 sur laiton (7030) avec et sans courant électrique

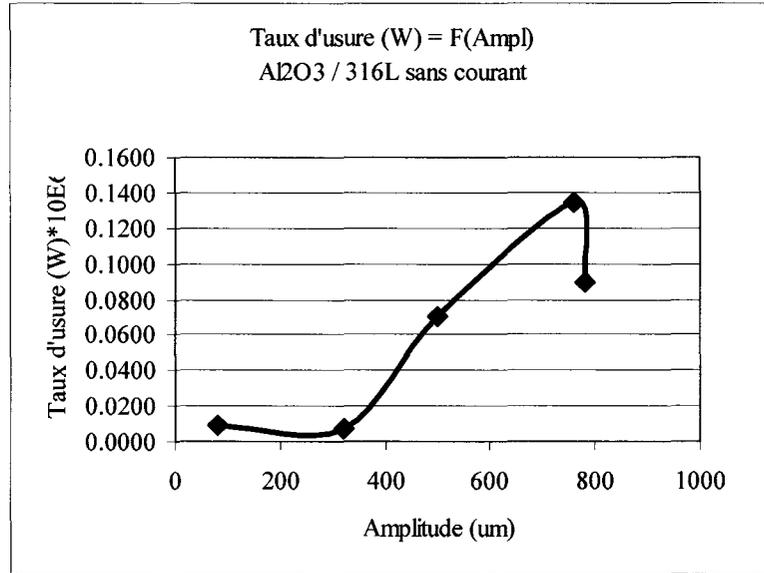


Graphe 15 Graphe montrant le coefficient de friction = F(ampl), cuivre sur cuivre avec et sans courant électrique

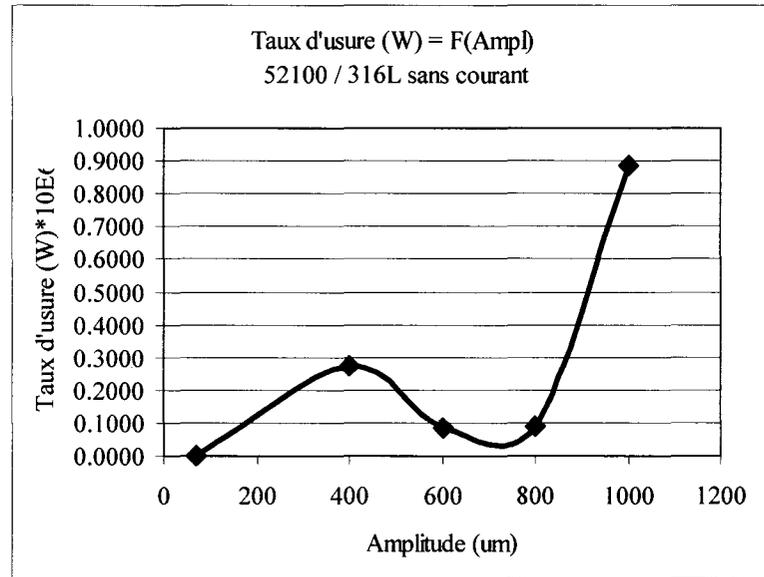
5.2.4 Effet de l'amplitude du mouvement sur le taux d'usure, sans courant

Les échantillons soumis au fretting à l'ÉTS, ont aussi été analysés en fonction de la relation entre le taux d'usure mesuré au microscope et l'amplitude du mouvement de fretting pour chacun des matériaux. Les graphes 16 à 23 montrent les courbes obtenues du taux d'usure en fonction de l'amplitude de fretting pour les divers matériaux lors des essais sans courant.

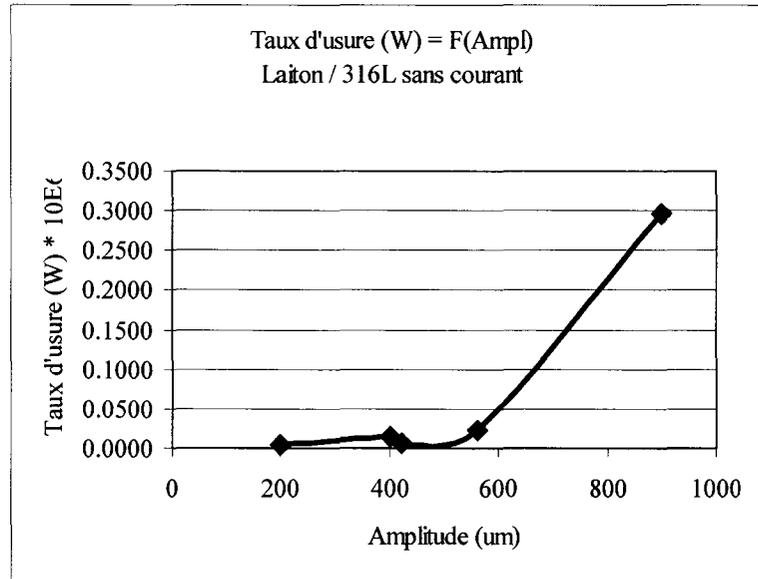
On note pour certains couples comme l'acier 52100 sur l'acier inox 316L (graphe 17), l' Al_2O_3 sur l'aluminium 7030 (graphe 22), une légère hausse du taux d'usure suivi d'une réduction avant de subir une remontée rapide à des amplitudes supérieures à 600 μm . Ils ont donc pour la majorité des couples, un taux d'usure différent dans la zone du meso-fretting. Le taux d'usure dans cette zone est souvent plus faible que dans la zone du fretting. Le début et la fin de cette zone semble être cependant propre à chacun des couples.



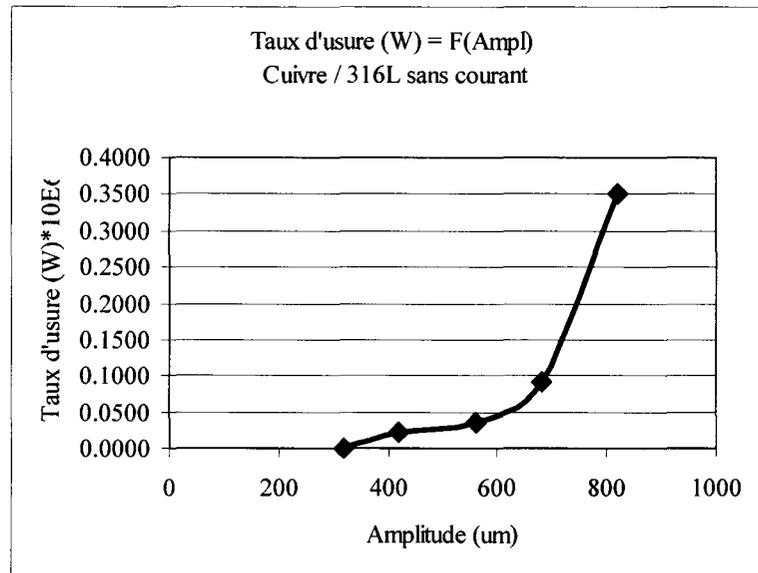
Graphe 16 Mesure du taux d'usure (W) en fonction de l'amplitude du mouvement de fretting pour le couple bille-plaque Al₂O₃ sur acier inox 316L



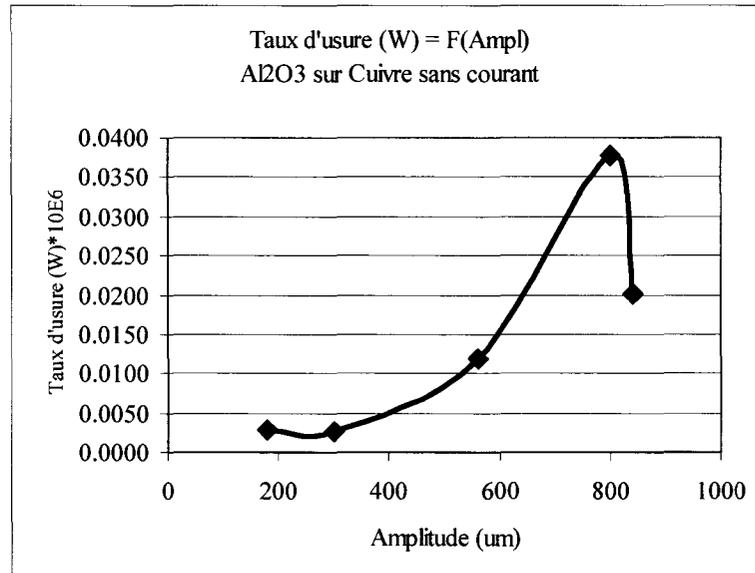
Graphe 17 Mesure du taux d'usure (W) en fonction de l'amplitude du mouvement de fretting pour le couple bille-plaque acier 52100 sur acier inox 316L



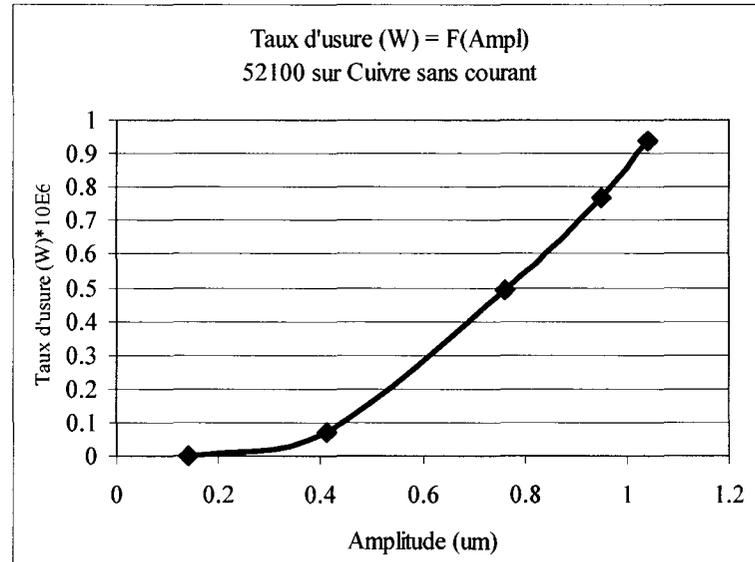
Grphe 18 Mesure du taux d'usure (W) en fonction de l'amplitude du mouvement de fretting pour le couple bille-plaque laiton sur acier inox 316L



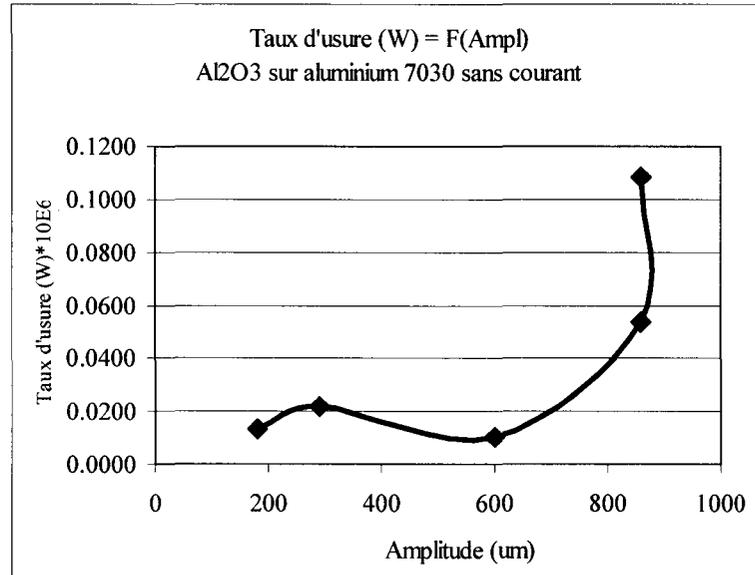
Grphe 19 Taux d'usure en (W) en fonction de l'amplitude du mouvement bille cuivre sur plaque 316L sans courant



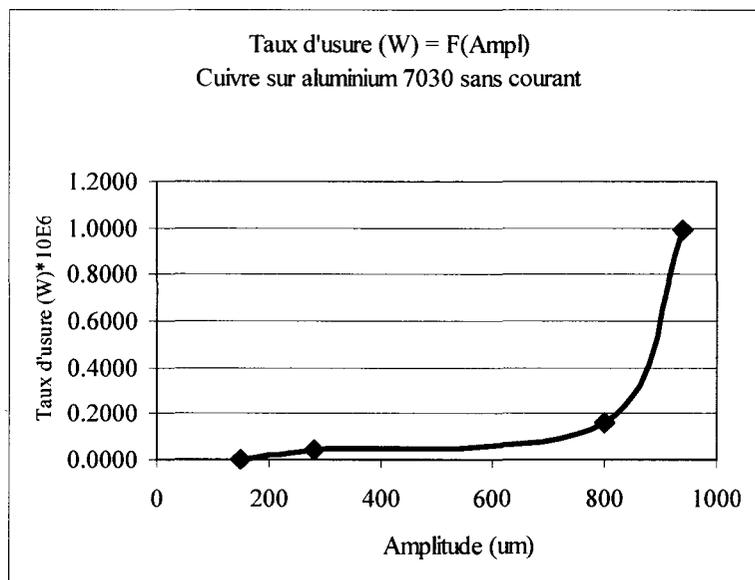
Graphe 20 Taux d'usure en (W) en fonction de l'amplitude du mouvement bille Al₂O₃ sur plaque cuivre sans courant



Graphe 21 Taux d'usure en (W) en fonction de l'amplitude du mouvement bille 52100 sur plaque de cuivre sans courant



Graphe 22 Taux d'usure en (W) en fonction de l'amplitude du mouvement bille Al₂O₃ sur plaque d'aluminium 7030 sans courant



Graphe 23 Taux d'usure en (W) en fonction de l'amplitude du mouvement bille cuivre sur plaque aluminium 7030 sans courant

Nous avons montré que le coefficient de friction est indépendant du débattement, et qu'il est de l'ordre de 0,4 pour l'acier, 0.3 pour l'alumine, 0.5 pour le laiton, 0.15 pour l'aluminium et 0.3 pour le cuivre 0.6. Ce résultat appelle plusieurs commentaires :

Il est généralement admis, que le coefficient de friction augmente avec l'amplitude jusqu'à atteindre une valeur dite stationnaire. En général, il est indépendant de la vitesse sauf pour les valeurs statiques. On explique ce comportement par l'accroissement de la zone de glissement lorsque l'amplitude augmente. Dans le cas de nos résultats, la constance du coefficient de friction s'explique très probablement par le caractère commun de la couche de troisième corps entre toutes les expériences: la présence d'oxyde de fer, d'oxyde de nickel et d'oxyde de chrome à faible amplitude, la surface se recouvre d'une couche de troisième corps avec production de petites particules d'oxydes. Au fur et à mesure que l'amplitude augmente, il y a formation d'une couche de troisième corps qui devient très rapidement constante.

Dans le cas de l'acier, la surface se recouvre de particules de céramique formées à partir des éléments du métal, c'est à dire Fe, Ni, Cr. Parfois, on évoque l'effet Kramer qui correspond à l'émission d'électrons à cause de la perturbation mécanique de la surface. Certains auteurs tels que Hu, [Hu00] impliquent l'effet Reussel où du peroxyde d'hydrogène est formé en présence d'oxygène et de vapeur d'eau. Cet hydroxyde d'hydrogène conduit à la formation d'hydroxyde de fer (FeOH).

La formation d'hématite a été observée sur tous nos échantillons par sa couleur très caractéristique. La couche de surface est encore un sujet de recherche. Quelques auteurs supposent que cette couche d'oxyde de surface est amorphe et forme ce qu'on pourrait appeler une glaçure qui réduit l'usure et élimine pratiquement toute initiation de fissure. Dans le cas de nos expériences, nous n'avons pas été jusqu'à rupture telle que définie par ces auteurs, c'est à dire l'apparition de fissures ou de micro fissures. La différence entre les expériences de M. Nakasawa [Naka94] et les nôtres se trouve dans le

coefficient de friction, c'est à dire dans l'amplitude de la force appliquée. Les contraintes sont de l'ordre de 40 MPa, ce qui génère des coefficients de friction très élevés, de l'ordre de 0.8 par opposition à nos expériences. Les contraintes appliquées au cours de nos expériences sont de l'ordre de 2 MPa.

Le mode de destruction est donc presque exclusivement la formation de ces fines particules. Une discussion a souvent été notée sur la composition de la surface qui est, à cause des hautes températures locales, de la martensite ou de l'austénite durcie. La structure peut être aussi bien amorphe que cristalline. Les écarts de stœchiométrie sont dus aux hauts taux de refroidissement. Le passage du fretting au frottement se fait pour une amplitude plus ou moins constante de 200 microns pour tous les couples observés. Cette constatation vérifie les affirmations de Mindlin [Mindl49]. Cet auteur a calculé l'amplitude de mouvement par l'équation 5.2.

$$\delta_t = \frac{3}{8} * \frac{\mu F_z}{a} * \frac{2-\nu}{G} \quad (5.2)$$

Où F_z est la force verticale, μ le coefficient de friction, a le rayon de la zone de contact, ν le coefficient de Poisson et G le module de cisaillement. La transition δ_t correspond à un changement de mécanisme dans le frottement, il y a disparition de production de copeaux. Le fretting peut donc se définir comme étant la zone où il n'y a que production de fins débris. D'autre part, la tribo-surface change également d'aspect. Dans la zone où le frottement est important, il y a formation d'une couche micro-alliée. Ce mécanisme d'usure a été montré par Masounave [Masou76].

5.2.5 Cas du cuivre sans courant

La courbe représentant le taux d'usure en fonction de l'amplitude dans le cas d'une bille en cuivre montre qu'on ne peut à priori pas prévoir l'usure d'une bille pour une amplitude donnée. La figure 37 montre l'aspect de la zone de contact pour diverses amplitudes de frottement. On y remarque la présence de la couche micro-alliée et on remarque qu'à forte amplitude, cette couche se fissure pour produire des débris de très petite taille (fig 37D).

Les photos prises de l'usure de la plaque en acier montrent qu'effectivement elle est négligeable comparée à celle de l'usure des autres plaques. Le cuivre étant moins dur que l'acier, l'usure de la bille est plus prononcée et la dégradation observée sur la bille ressemble à celle des plaques dans les autres couples d'essai. Dans le cas du cuivre, c'est donc la plaque en acier 316 qui joue le rôle d'outil de coupe.

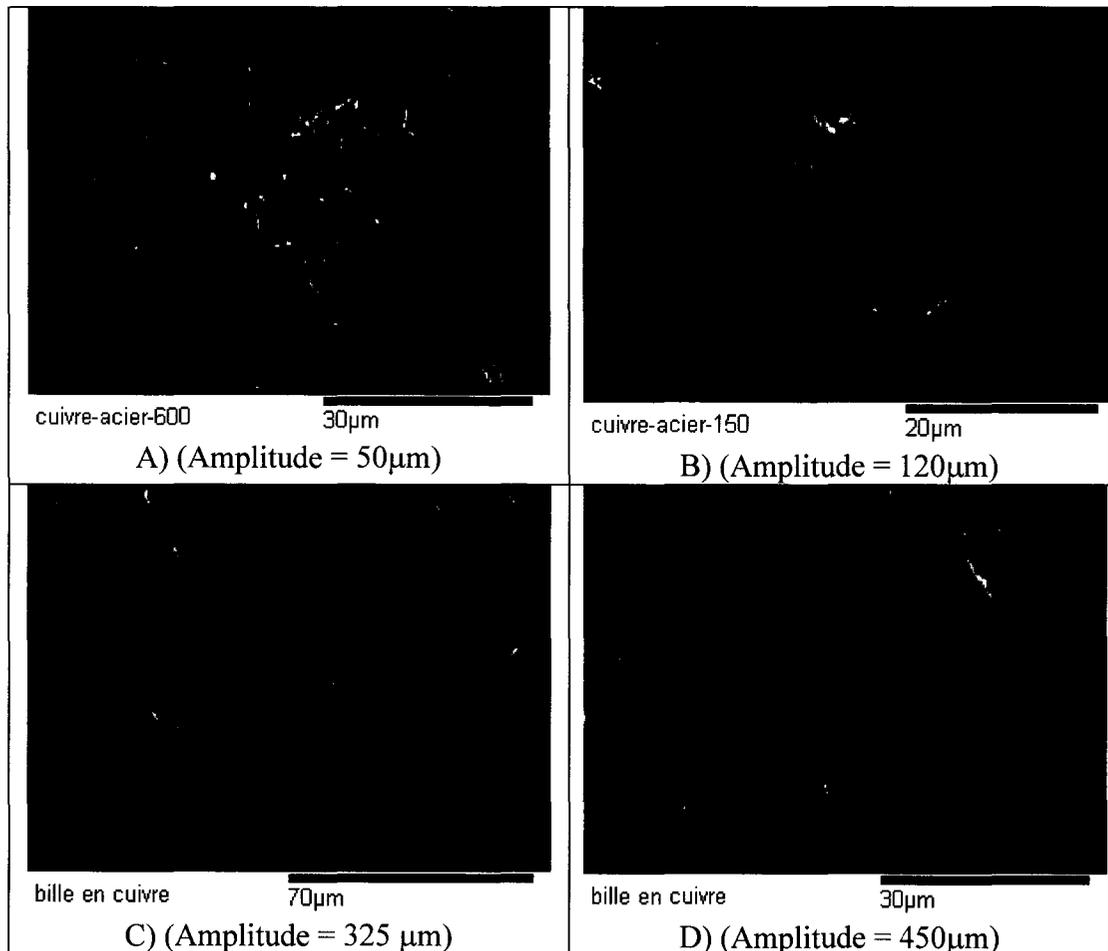


Figure 37 Effet de l'amplitude sur le contact cuivre-acier

5.3 Fretting et meso-fretting avec courant électrique (CC)

Les échantillons soumis au fretting sur le montage bille-plaque, ont aussi été analysés en fonction de la mesure de la force de friction et de la mesure simultanée de résistance de contact électrique. Les graphes 24 et 25 montrent des résultats types obtenus lors de ces mesures avec courant (graphe 24) et sans courant (graphe 25) sur un contact cuivre-cuivre. E graphe 24 montre la valeur de la résistance de contact (graphe 24A), de la force de friction (graphe 24B) et de l'amplitude du mouvement (graphe 24C) en fonction

du temps. À noter que l'on ne montre qu'une partie des résultats dans le temps. L'acquisition des données se faisait à intervalle régulier, et non en continu. On y note à la graph 24 que la résistance de contact se comporte tel que prévu, soit qu'elle est stable au début et la dégradation débute autour de $t = 500$ sec.

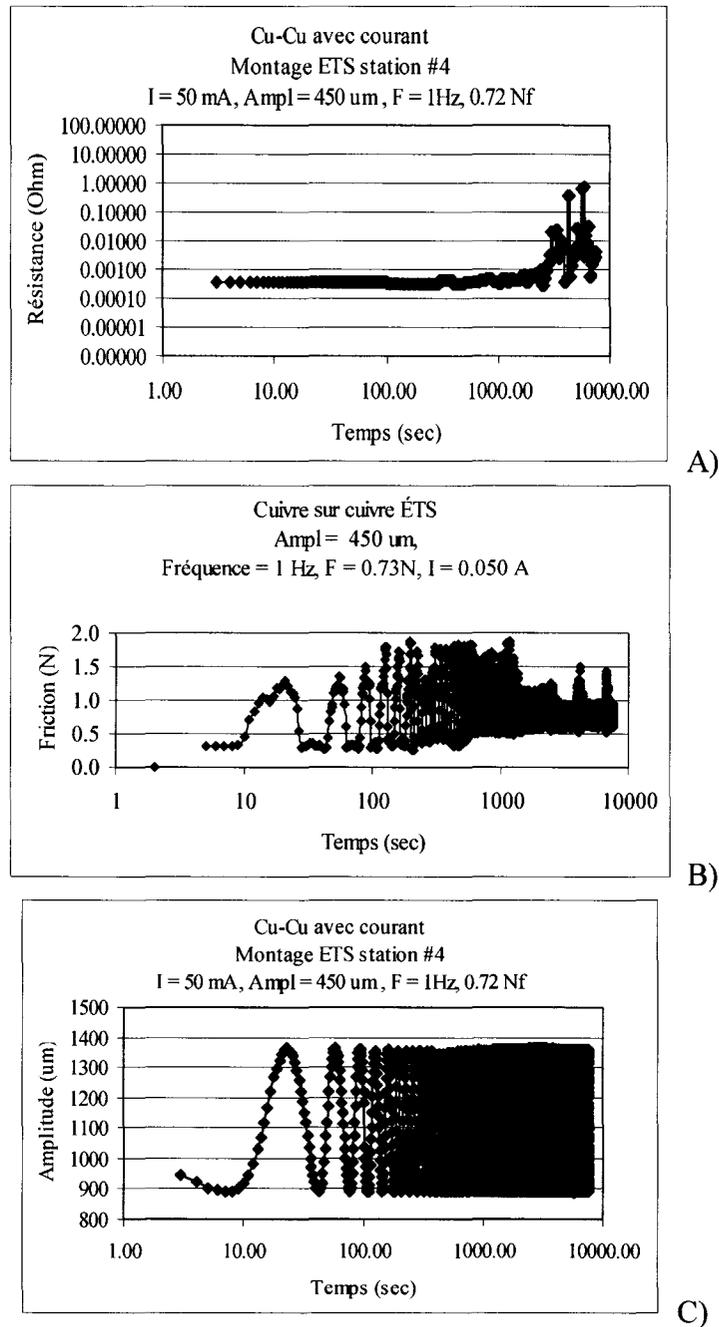
Après le début de la dégradation, elle subit une hausse rapide de la dégradation à partir de $t = 2000$ sec. On note aussi que l'amplitude du mouvement de fretting est restée très stable. Ceci montre que le montage est très rigide et qu'il permet la mesure de très faibles forces de friction. Le graph 25 montre la différence obtenue avec un essai de cuivre sur cuivre sans courant et une amplitude de fretting similaire à l'essai précédent, soit $450 \mu\text{m}$. On y remarque que la force de friction n'a subit au cours de l'essai qu'une diminution d'environ 15% de sa valeur initiale, comparativement à l'essai avec courant, où la valeur de la force de friction a subit une diminution de 65% par moment. Cette réduction de la force de friction n'a été observée que pour le couple cuivre sur cuivre. On note aussi une variation de la force de friction coïncidente avec la variation de la résistance de contact pour les couples aluminium-laiton, cuivre-laiton et aluminium-cuivre. Cet effet est aussi très marqué pour le couple laiton-laiton. Pour tous ces couples, la force de friction augmente à mesure que la résistance de contact augmente.

Arnell [Arnell01] a mesuré la force et le coefficient de friction pour des contacts d'argent lubrifiés à l'aide d'un revêtement d'iode d'argent. Ils a montré une élévation importante du coefficient de friction avec la baisse de la résistance de contact lors de la phase initiale du fretting.

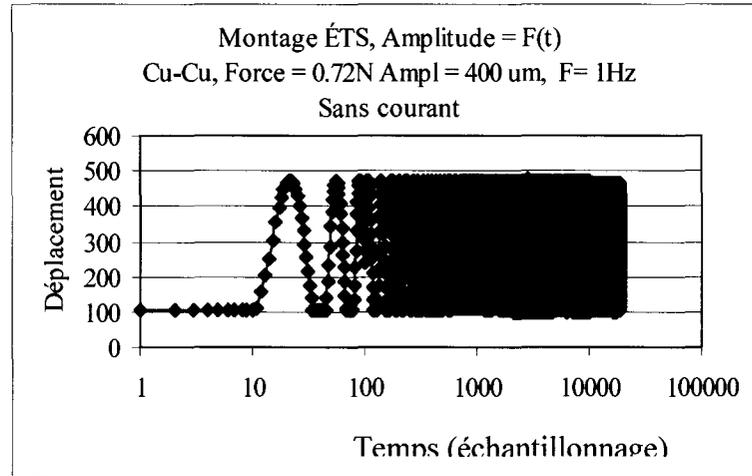
Takehiko [Take80] a pour sa part montré une légère hausse du coefficient de friction associée à une baisse de la résistance de contact dans le stade initial de fretting des contacts palladium-palladium. Il a aussi montré que le coefficient de friction de l'or sur le palladium varie en fonction de l'épaisseur de la couche d'or (0.01 à $3 \mu\text{m}$) déposée sur le palladium. Rudolphi [Rudol96, Rudol97] a montré que pour les contacts de cuivre

recouverts d'argent, le fretting peut se diviser en 3 modes de dégradation selon l'amplitude de déplacement: le glissement complet (Ampl. = 100 μm), la soudure temporaire (Ampl. = 40 μm) et la soudure permanente (Ampl. = 20 μm). Ils ont montré que pour ces matériaux, la force de friction et la résistance de contact ont des valeurs distinctes pour chacun des régimes. Ils ont cependant utilisé des forces de contact très grande, de l'ordre de 20 à 60 N.

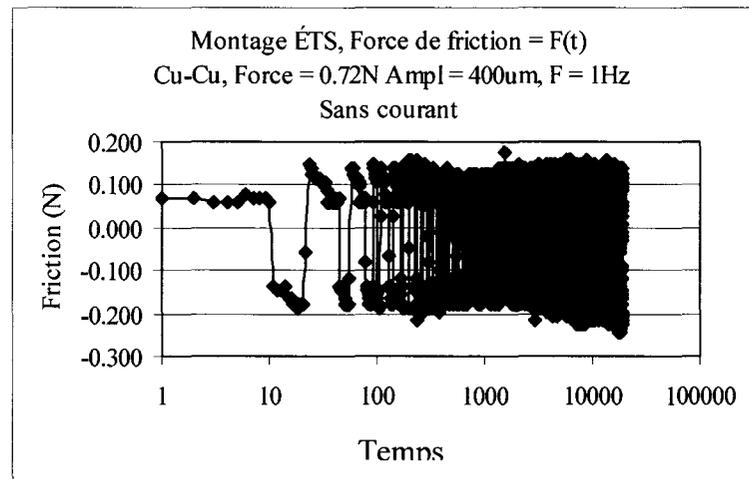
Noël [Noël01, Noël99] utilise un montage dédié à l'étude du fretting avec lequel il est possible de mesurer la résistance de contact et le coefficient de friction. Ils ont utilisé ce montage pour comparer l'efficacité de divers lubrifiants à contact et rapportent le lien direct entre une force de friction faible et constante et une faible dégradation de la surface. Pour sa part, Gabel, [Gabel01] a développé un montage avec lequel il mesure la dégradation de la résistance de contact et la force de friction pour des amplitudes de 1100 μm . Ils ont observé que pour des contacts, de nickel plaqué d'or, il n'a pas été possible d'établir un lien clair entre la résistance de contact et le passage du coefficient de friction à une valeur supérieure à 0.4, tel que rapporté par Antler [Antler87].



Graphe 24 Mesure de la résistance de contact (A), de la force de friction (B) et de l'amplitude du mouvement (C), essai de bille sur plaque cuivre-cuivre avec courant, $\text{ampl} = 450 \text{ }\mu\text{m}$



A)



B)

Graphe 25 Mesure de l'amplitude du mouvement (A) et de la force de friction (B), essai de bille sur plaque cuivre-cuivre sans courant, ampl = 400 μ m

Tous les résultats des mesures de force de friction et de résistance de contact sont regroupés à l'annexe 2. On y présente tous les graphes de la résistance électrique de contact (essais avec et sans courant) et de la force de friction pour les essais bille sur plaque. Nous en avons extrait quelques informations qui sont présentées aux tableaux VI et VII. Nous y présentons en fonction des couples, de l'amplitude du mouvement et de la présence ou non d'un courant si la force de friction a subi une variation pendant l'essai

(hausse ou baisse) et si cette variation coïncide avec une variation de la résistance de contact électrique.

Tableau VI

Résultats de la mesure de la friction essais avec courant bille-plaque

Matériaux	Amplitude (μm)	↑ Friction pendant l'essai	↑ ou ↓ friction lors de ↑ résistance
6061-6061			
	40	N	N
	100	N	N
	325	O	O
52100-cuivre			
	40	N	N
	100	N	N
	325	N	N
	450	N	N
	375	N	N
6061-7030			
	40	N	N
	100	O	O
	325	O	O
	450	O	O
	375	O	O
6061-cuivre			
	40	N	N
	100	O	O
	325	O	O
	450	O	O
	375	N	N
7030-6061			
	40	O	O
	100	O	O
	325	O	N
	450	N	N
	375	O	O
7030-6061 Série #2			
	40	N	N
	100	O	O
	325	O	O
	450	O	O
	375	O	O

Tableau VI

Résultats de la mesure de la friction essais avec courant bille-plaque (suite)

Matériaux	Amplitude (μm)	↑ Friction pendant l'essai	↑ ou ↓ friction lors de ↑ résistance
7030-7030			
	40	O	O
	100	O	O
	325	O	O
	450	O	O
	375	O	N
7030-cuivre			
	40	N	N
	100	N	N
	325	N	N
	450	O	O
	375	N	N
Laiton-6061			
	30	N	N
	70	N	O
	450	O	O
	350	N	N
52100-cuivre			
	40	N	N
	100	O	O
	325	N	N
	450	N	N
	375	N	N
Cuivre-6061			
	50	N	N
	80	N	O
	325	O	O
	450	O	O
	375	O	O

Tableau VI

Résultats de la mesure de la friction essais avec courant bille-plaque (suite)

Matériaux	Amplitude (μm)	↑ Friction pendant l'essai	↑ ou ↓ friction lors de ↑ résistance
Cuivre-7030			
	40	O	N
	100	O	O
	325	O	O
	450	O	O
	375	O	N
Cuivre-cuivre			
	50	O	N
	100	O	O
	325	O	O
	450	O	O
	375	O	O

Tableau VII

Résultats de la mesure de la friction essais sans courant bille-plaque

Matériaux	Amplitude (μm)	↑ friction pendant l'essai
6061-laiton		
	50	N
	75	O
	350	O
	450	N
	325	O
Al₂O₃-laiton		
	40	N
	80	O
	350	O
	450	N
	325	O
Cuivre-316L		
	40	O
	80	O
	350	O
	450	O
	325	N
Al₂O₃-316L		
	40	O
	80	O
	350	O
	450	O
	325	O
6061-6061		
	40	N
	80	O
	350	O
	450	N
	325	N

Tableau VII

Résultats de la mesure de la friction essais sans courant bille-plaque (suite)

Matériaux	Amplitude (μm)	↑ Friction pendant l'essai
7030-6061		
	50	O
	75	O
	350	N
	450	N
	325	N
7030-Cuivre		
	40	N
	80	N
	350	O
	450	N
	325	O
52100-316L		
	40	O
	80	O
	350	O
	450	N
	325	N
52100-316L		
	40	O
	80	O
	350	O
	450	O
	325	O
52100-Cuivre		
	40	O
	80	O
	350	O
	450	O
	325	N/V
Cuivre-6061		
	40	N
	80	O
	350	O
	450	N
	325	N

5.4 Validation des lubrifiants haute température

Nous allons maintenant présenter les résultats des essais réalisés sur l'étude du comportement des lubrifiants haute température.

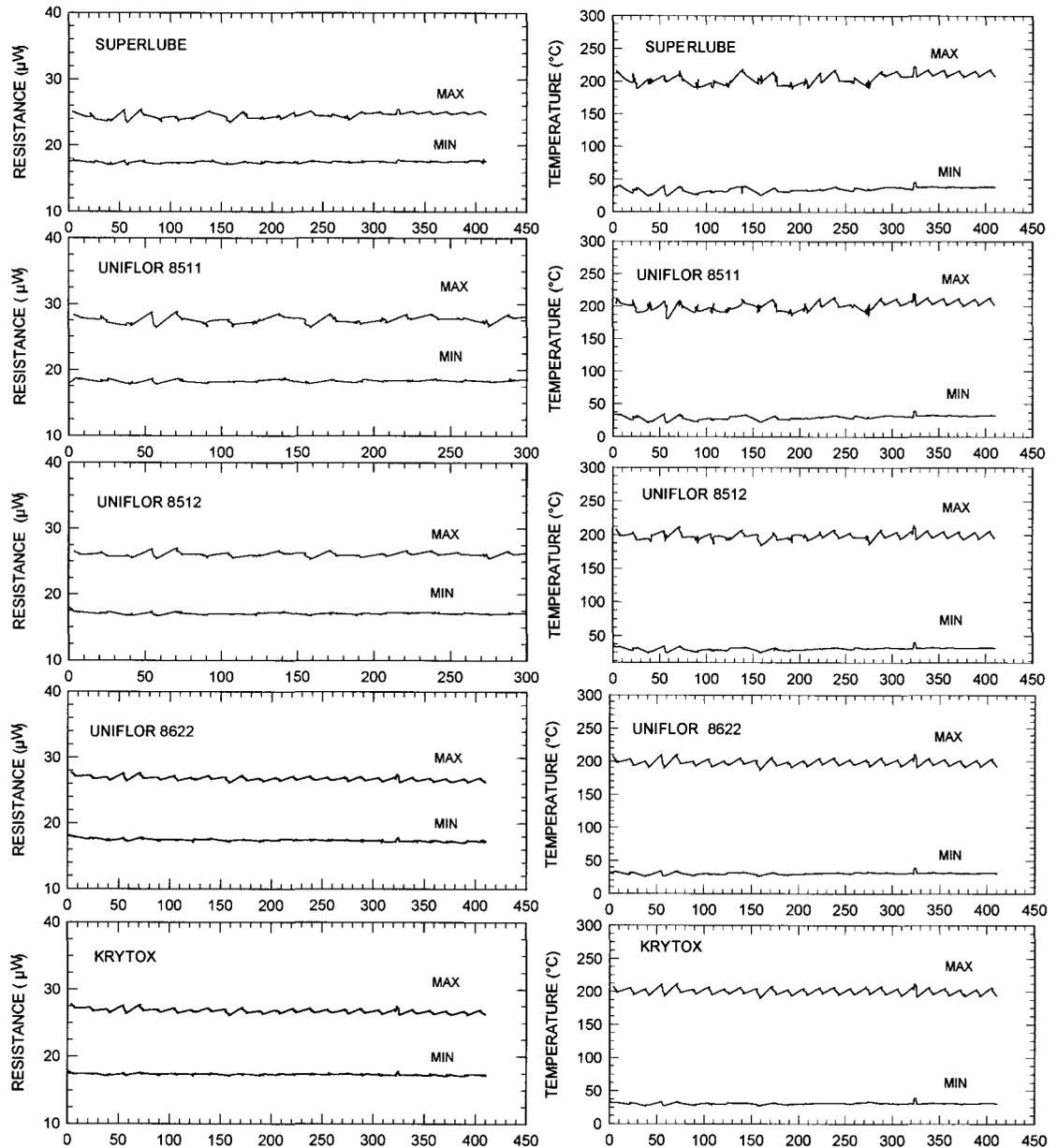
5.4.1 Cyclage de courant

Le graphe 26 montre un exemple des résultats obtenus lors des essais de fatigue thermique par cyclage à fort courant des raccords boulonnés lubrifiés avec les composés décrits à la section 4.4. On y montre le graphe de la résistance de contact ainsi que la température des raccords en fonction du temps pour l'essai avec les barres omnibus d'aluminium. Sur chacun des graphes est indiqué le type de lubrifiant utilisé sur le raccord. Les valeurs indiquées par MIN et MAX représentent en fait les valeurs de la résistance électrique de chacun des raccords à la fin du cycle de chauffage (MAX) et à la fin du refroidissement (MIN).

Ces résultats sont très surprenants, puisqu'ils montrent que la température et la résistance de contact de tous les raccords sont restés relativement stables pendant la durée de l'essai et ce pour tous les lubrifiants. Ceci est intéressant puisque l'essai a duré pendant plus de 400 cycles. Étant donné la température relativement élevée, les barres omnibus de cuivre ont même subi une importante décoloration. Nous avons aussi noté quelque peu de décoloration et de craquelage des lubrifiants en dehors de la zone du contact.

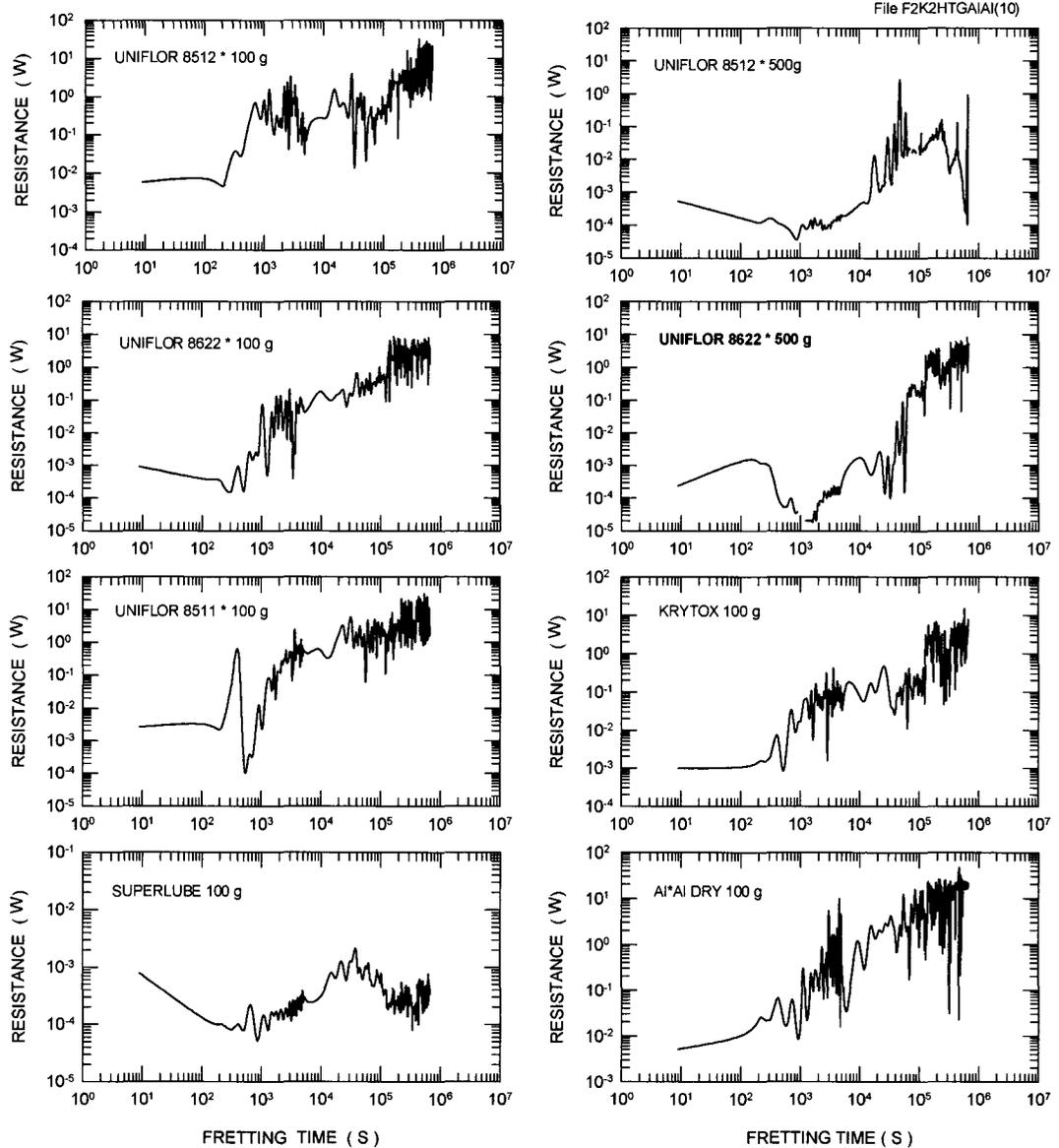
5.4.2 Fretting

Les graphes 27 et 28 montrent les résultats obtenus lors des essais de fretting avec courant CC sur des échantillons cuivre-cuivre et aluminium-aluminium enduits des lubrifiants haute température. On y présente aussi les résultats obtenus avec les couples non lubrifiés à titre de référence.

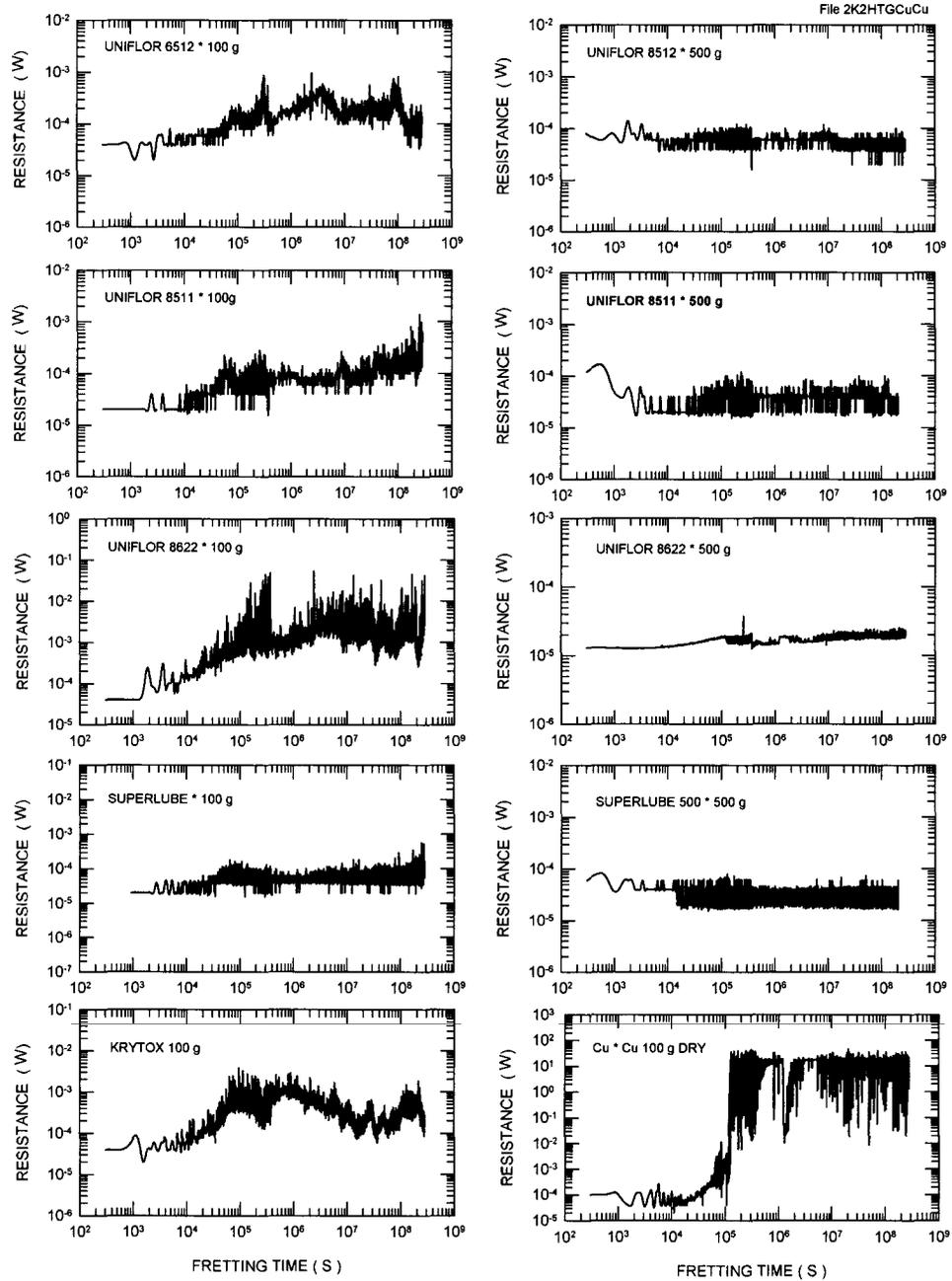


CURRENT CYCLING TEST ALUMINUM-ALUMINUM

Graphe 26 Effet du cyclage du courant sur la résistance de contact et la température des raccords boulonnés enduits des différents lubrifiants haute température, barres omnibus d'aluminium [Gagn02]



Graphe 27 Variation de la résistance de contact, échantillons aluminium-aluminium lubrifiés, fil sur plaque avec le temps, conditions des essais: force de contact = 100 grf (0.98N) et 500 grf (4.9N), fréquence 1Hz, amplitude de déplacement $25\mu\text{m}/100\mu\text{m}$, courant 50 mA CC [Gagn02-1]



Graph 28 Variation de la résistance de contact cuivre-cuivre avec lubrifiants, fil sur plaque en fonction du temps, conditions des essais: force de contact : 100 grf (0.98N) et 500 grf (4.9N), fréquence 1Hz, amplitude de déplacement $25\mu\text{m}/100\mu\text{m}$, courant 50 mA CC [Gagn02-1]

Pour les couples aluminium sur aluminium, les résultats montrent que la résistance de contact pour les couples lubrifiés et non lubrifiés est la même après le même nombre de cycles de fretting à l'exception, du couple lubrifié avec le *Superlube*. Celui-ci montre une résistance de contact qui est restée passablement plus faible qu'avec les autres. Pour les contacts cuivre sur cuivre, les résultats sont très différents. Tous les couples lubrifiés ont montré une résistance électrique améliorée par rapport au couple non lubrifié. Ceux qui sont demeurés les plus stables et avec la résistance la plus faible sont le *Superlube* (100grf and 500 grf), Uniflor 8511(500grf), Uniflor 8512 (500grf) et Uniflor 8622 (500grf). Pour ce qui est du couple cuivre sur étain, les résultats montrent que tous les lubrifiants donnent de bon résultats.

5.4.3 Thermogravimétrie

Les résultats de l'analyse par thermogravimétrie sur les lubrifiants haute température sont montrés au graphe 29 et résumés au tableau VIII. On y remarque que la plupart des composés sont relativement stables en dessous de 200 °C, alors que l'*Uniflor 8622* montre la plus haute stabilité avec un début de dégazage à tout près de 400 °C.

Tableau VIII

Résultats de l'analyse par thermogravimétrie lubrifiants haute température [Gagn02-1]

Composé	Température du début de dégradation (°C)
Uniflor 8511	257,3
Uniflor 8512	243,3
Uniflor 8622	396,9
Superlube	306,0
Krytox GPL 246	351,0

5.4.4 Exposition à haute température

Les lubrifiants haute température ont tous été soumis à une exposition à 200 °C pendant 48 heures dans une chambre environnementale. La figure 38 montre les résultats de cet essai. On y montre une série de photographies prises avant et après l'exposition pour chacun des lubrifiants. Quelques uns des lubrifiants montrent un assèchement caractérisé par un craquelage de la surface et aussi de la décoloration. L'*Uniflor* 8511 montre moins de signe de dégradation alors que l'*Uniflor* 8512 et l'*Uniflor* 8622 ne montrent que peu de signes de craquelage et/ou décoloration.

Le *Krytox GPL-246* ne montre pas de craquelage mais une importante décoloration. Le degré de craquelage observé lors de cet essai semble être en accord avec le résultat de l'essai de thermo-gravimétrie (graphe 29). Les composés montrant le plus haut degré de craquelage sont ceux qui ont la température de décomposition la plus faible lors de l'essai de thermogravimétrie.

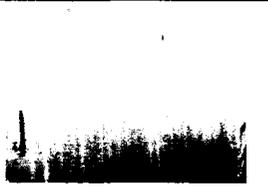
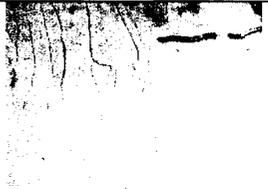
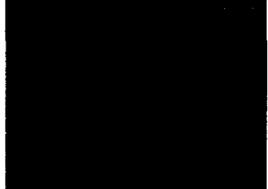
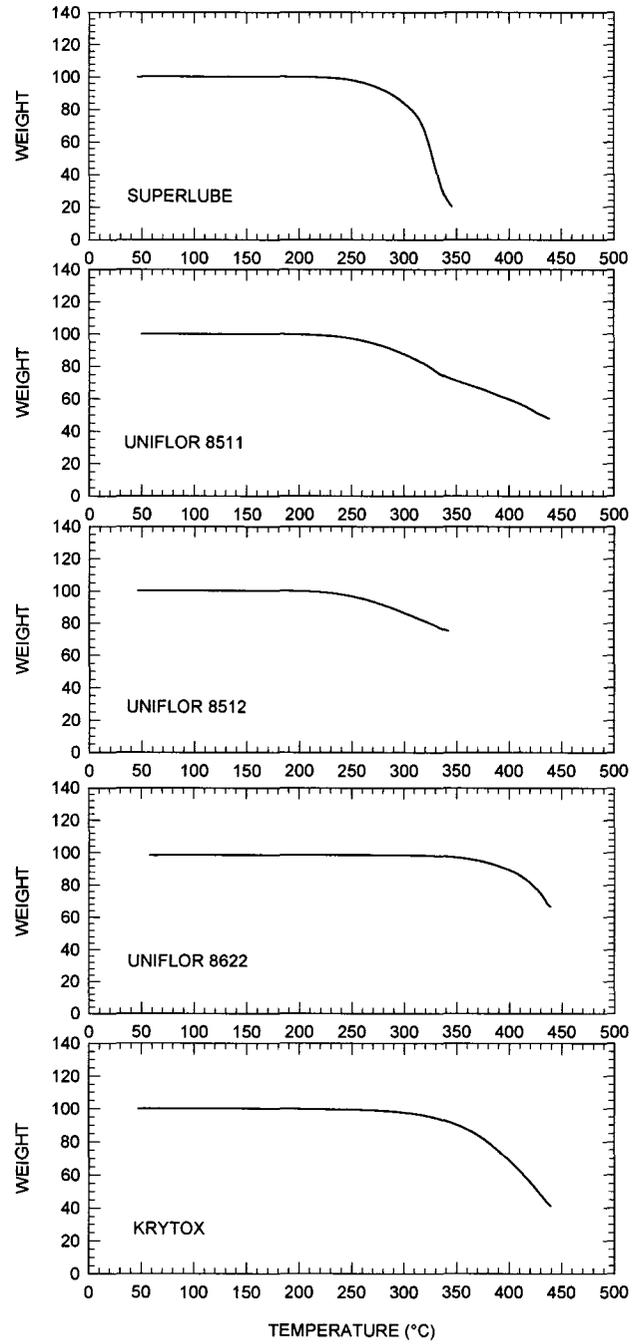
	
Superlube	Superlube-48hrs@200°C
	
Uniflor 8511	8511-48hrs@200°C
	
Uniflor 8512	8512-48hrs@200°C
	
Uniflor 8622	8622-48hrs@200°C
	
Krytox GPL 246	Krytox-48hrs@200°C

Figure 38 Résultats de l'exposition continue à 200°C des lubrifiants haute température pendant 48 heures (grossissement = 5X) [Gagn02-1]



Graphe 29 Résultats de l'analyse par thermo-gravimétrie des lubrifiants haute température, vitesse de chauffage : 10°C/min [Gagn02-1]

5.4.5 Résumé lubrifiants haute température

Les résultats des essais ont montré que la plupart des lubrifiants évalués donnent tous de bons résultats lors des essais de fatigue thermique par courant sur les contacts boulonnés de cuivre et d'aluminium. Il est possible que le nombre de cycles de fatigue n'ait pas été suffisamment élevé pour provoquer la dégradation. Les résultats des essais de fretting ont montré que les lubrifiants se comportent différemment selon le matériel et la force de contact. Pour le cuivre et l'étain, ils ont tous réussi à limiter de façon importante les effets du fretting. Dans le cas de l'aluminium cependant, les essais ont montré que les lubrifiants sont moins aptes à limiter la dégradation par le fretting. Il est possible qu'avec l'aluminium, les lubrifiants sont moins en mesure de rester dans la zone du contact et à maintenir une protection de la surface fraîchement exposée après le déplacement des surfaces.

De plus, il est possible qu'avec l'aluminium, la résistance en cisaillement des lubrifiants analysés en présence des oxydes et des débris n'est pas suffisante. La résistance au cisaillement ne figurait pas parmi les critères de sélection initiaux de ces lubrifiants. Il est cependant connu qu'une force de cisaillement faible des lubrifiants de contact est essentielle pour maintenir résistance de contact faible. Un seul de ces composés comporte des particules conductrices. Il est cependant trop tôt pour dire si ces particules ont eut un effet bénéfique dans nos essais. Les résultats des essais par thermogravimétrie (TGA) et l'exposition prolongée en chambre environnementale demeurent une bonne évaluation de la capacité de ces lubrifiants à haute température. Il a été démontré que même une exposition relativement courte à 200 °C provoque des changements importants pour quelques uns de ces composés. En conclusion, certains de ces lubrifiants ont des capacités pour opération à haute température, mais seulement pour les contacts cuivre sur cuivre. Des analyses supplémentaires seront nécessaires pour déterminer si le mécanisme de dégradation observé s'apparente à celui des lubrifiants utilisés présentement.

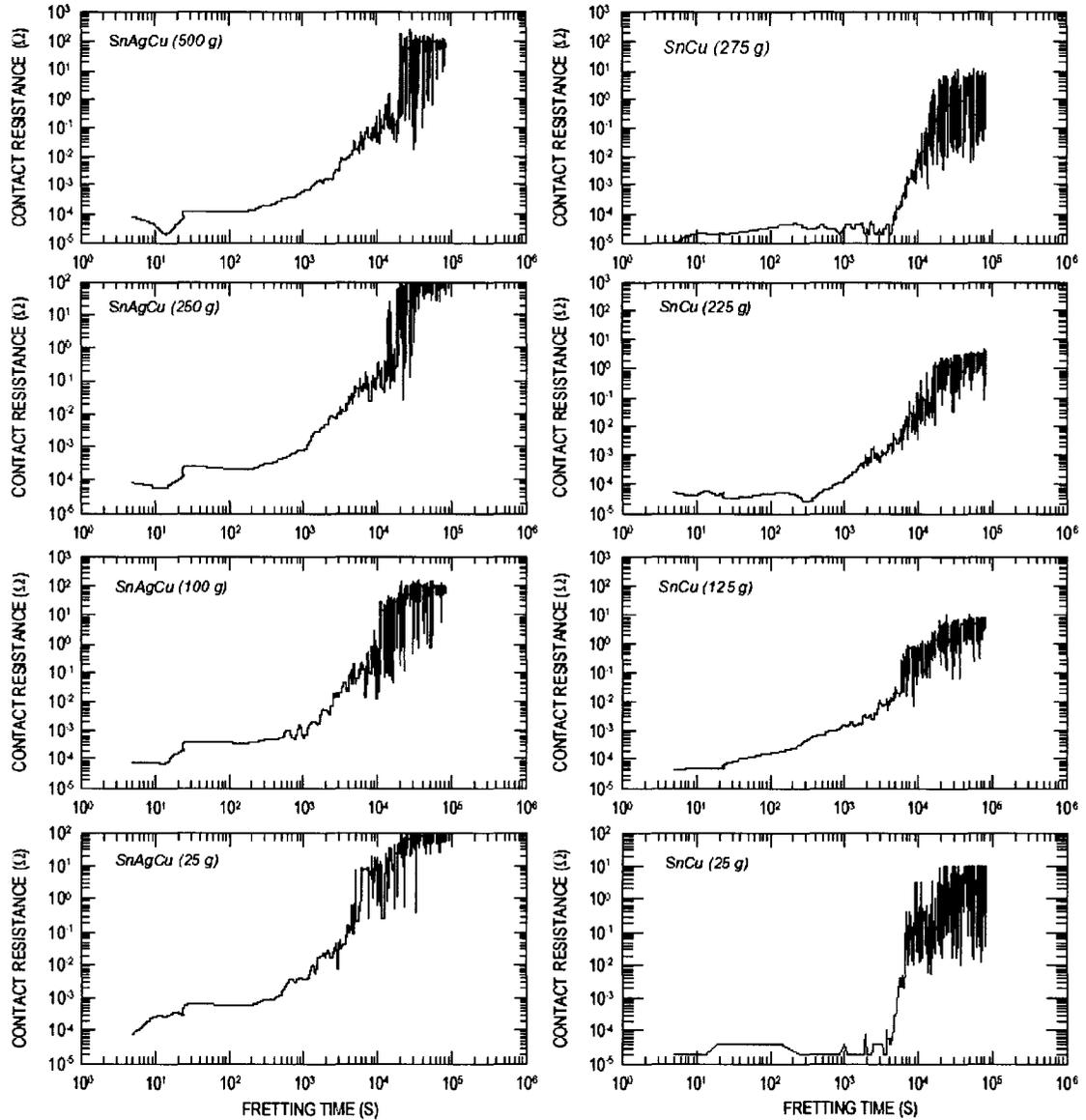
5.5 Alliages sans plomb

Tel que discuté à la section 4.5, nous avons réalisé des essais de caractérisation et de fretting sur des alliages sans plomb destinés à des applications de contact électrique.

5.5.1 Influence du fretting

Nous avons réalisé des essais de fretting sur des échantillons fil sur plaque pour les alliages sans plomb énumérés au tableau V. Une partie des résultats de ces essais est montré au graphe 30. Les résultats montre que tous les alliages sont très affectés par le fretting. La résistance de contact de tous les couples montre une augmentation caractérisée par 3 stades. Dans le premier stade qui dure entre 500 et 1000 cycles de fretting, la résistance de contact est stable. Dans le second stade entre 1000 et 10000 cycles, la résistance de contact de tous les couples analysés montre une augmentation de l'ordre de 3 à 4 fois la valeur initiale et se situe toujours dans le domaine du mOhm. Lors du troisième stade, la résistance de contact est caractérisée par des fluctuations importantes de plusieurs ordres de grandeur.

La figure 39 montre des exemples des types de mécanismes de dégradation de la surface observés sur les traces de fretting pour ces alliages. Les dommages les plus sévères ont été notés sur l'alliage SnCu qui montre beaucoup de traces de délaminage et de fissuration. Celui qui semble le moins endommagé est le SnAgCuPb bien qu'il montre aussi la présence de signes d'abrasion et de délaminage.



Graph 30 Résultats des essais de fretting, résistance du contact en fonction du temps et de la force de contact pour les alliages sans plomb SnAgCu et SnCu, amplitude : 100 μ m et fréquence : 0.5Hz. [Gagn04]

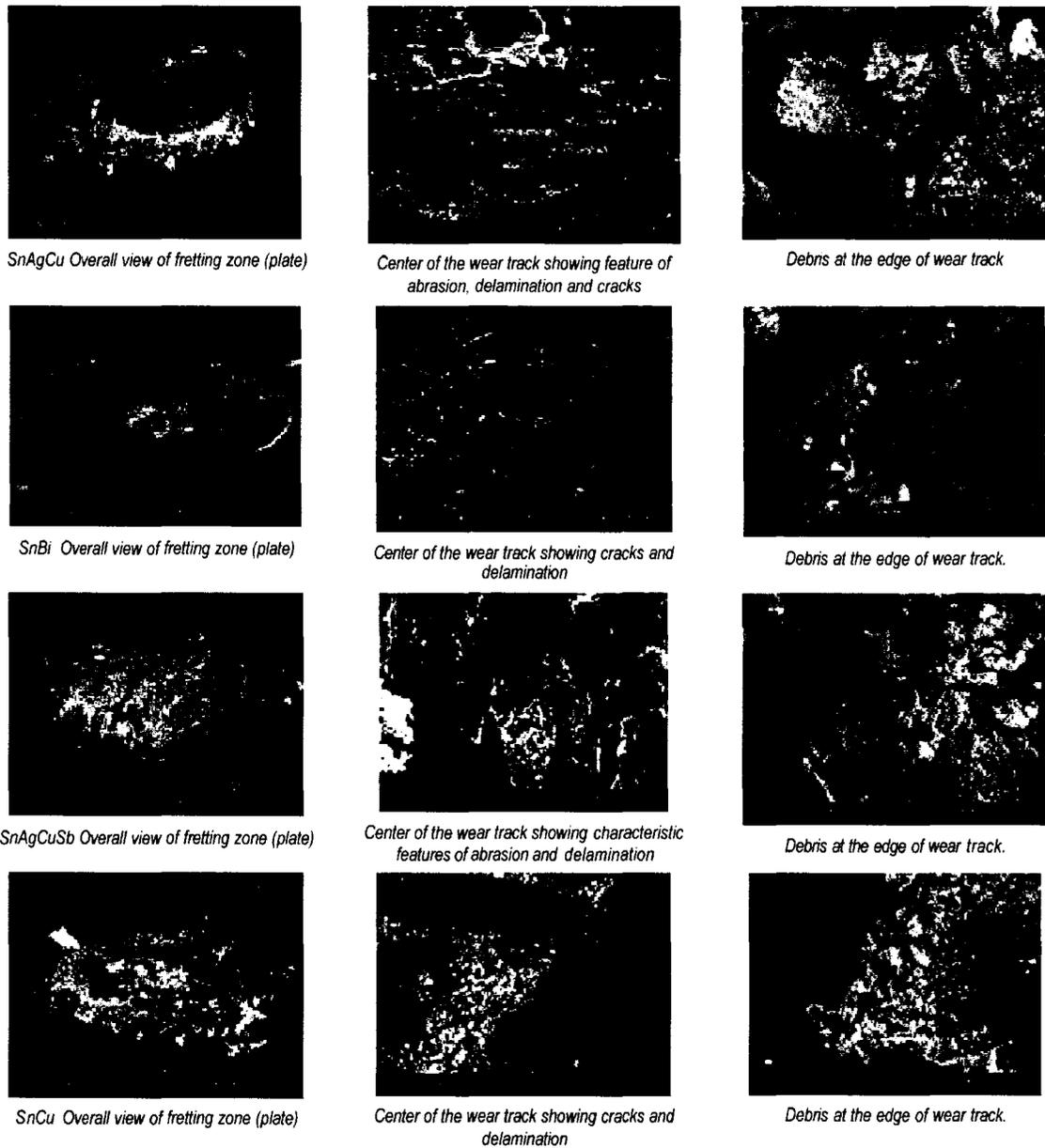


Figure 39 Résultats des essais de fretting, analyses des surfaces au microscope à balayage en fonction du temps et de la force de contact pour les alliages sans plomb SnAgCu, SnBi, SnAgCuSb et SnCu, amplitude : 100 μm et fréquence : 0.5Hz.[Gagn04]

5.5.2 Résistance électrique de l'interface

Les résultats des mesures de résistance de surface (section 4.4.6) sont montrés au tableau XII. Chacune des valeurs obtenues ont été calculées à partir de la valeur moyenne de 10 mesures. À titre comparatif, nous y présentons également les résultats de mesures réalisées sur des échantillons de composition connu en aluminium (6061), en nickel et en argent. Les valeurs de résistivité mesurées sur ces matériaux sont en accord avec ce qui est généralement attendu de ces matériaux.

Le tableau XII montre que la présence de l'alliage sans plomb modifie considérablement la conductivité électrique de la surface et cet effet semble plus prononcé avec les échantillons qui ont été chauffés électriquement. Les différents alliages lorsque déposés par trempage sur les barres de cuivre font en sorte que la valeur globale du contact de la barre de cuivre est augmentée de l'ordre de 2 à 3 % par rapport à une barre non recouverte. Il a aussi été mesuré que même avec des compositions relativement différentes la résistance des barres recouvertes ne diffère que de très peu les unes par rapport aux autres. Pour ces alliages, la composition n'a donc pas beaucoup d'influence sur la résistivité du contact lorsque celui-ci en est recouvert. Cependant, lorsque les barres ont été vieillis thermiquement, les résultats sont très différents. La différence ne se manifeste pas seulement par rapport aux barres non-vieillies mais aussi selon le type de vieillissement. Les échantillons enrobés avec l'alliage SnAgCu, ont montré la plus grande variation de résistance alors que celles traitées avec les alliages SnAgCuSb and SnCu ont montré le moins de changement.

Un autre point important dans les résultats est que les échantillon vieillis électriquement montrent une augmentation de résistance plus importante que pour les échantillons vieillis par conduction thermique. Il semble que les phases intermétalliques des échantillons vieillis électriquement sont dans l'ensemble plus résistives que celles formées par conduction thermique.

Tableau IX

Résistance électrique des alliages sans plomb sur les barres omnibus de cuivre avant et après vieillissement thermique par courant et par conduction [Brau04]

Échantillon vieillis par chauffage avec courant électrique CC				
	SnAgCu	SnBi	SnAgCuSb	SnCu
R_{moyenne} ($\mu\Omega$)	2.98	2.93	2.85	2.88
Dév Std. .	0.21	0.20	0.12	0.09
95% Conf.	0.15	0.14	0.09	0.06
Min	2.57	2.64	2.71	2.71
Max	3.17	3.19	3.09	3.01
ΔR ($\mu\Omega$)	0.30	0.25	0.24	0.20
ΔR (%)	10.99	8.87	6.16	7.19
Échantillons vieillis par conduction thermique				
R_{moyenne} ($\mu\Omega$)	2.83	2.81	2.79	2.78
Dév Std.	0.31	0.17	0.13	0.26
95% Conf.	0.22	0.12	0.09	27.8
Min	2.51	2.65	2.71	2.47
Max	3.53	3.26	3.14	3.20
ΔR ($\mu\Omega$)	0.15	0.13	0.11	0.10
ΔR (%)	5.57	4.85	3.91	3.69
État initial de l'alliage				
R_{moyenne} ($\mu\Omega$)	2.73	2.76	2.76	2.71
Dév Std.	0.11	0.12	0.19	0.14
95% Conf.	0.05	0.06	0.09	0.07
Min	2.53	2.58	2.53	2.56
Max	2.94	2.98	3.03	3.01
ΔR ($\mu\Omega$)	0.05	0.08	0.08	0.03
ΔR (%)	1.87	3.01	2.97	1.25
Mesures de référence				
	Cu ETP	Ni	Al-6061	Ag
R_{moyenne} ($\mu\Omega$)	2.68	9.99	5.57	2.48
Dév Std..	0.06	0.26	0.20	0.15
95% Conf.	0.04	0.19	0.14	0.11
Min	2.57	9.62	5.18	2.20
Max	2.77	10.43	5.81	2.66
ρ ($\mu\Omega$ cm)	1.68	6.27	3.50	1.56

5.5.3 Phases intermétalliques

L'épaisseur des phases intermétalliques a été mesurée au microscope électronique à balayage. Des échantillons de barres omnibus vieillis électriquement et par conduction ont été polis et observés. Le microscope à balayage permet la mesure des épaisseur, l'analyse de la composition et ainsi le calcul du coefficient de diffusion à l'aide de la fluorescence aux rayons-X. Le tableau XIII montre les résultats des mesures d'épaisseur des couches intermétalliques selon l'échantillon. La figure 40 montre quelques photos prises des couches au microscope. Dans tous les échantillons analysés, au moins 2 phases intermétalliques ont été observées. L'épaisseur des phases intermétalliques ne semble pas être fonction du type de vieillissement thermique utilisé. L'analyse faite à l'aide des rayons-X montre que la phase 1 serait composée de Cu_3Sn et que la phase 2 serait Cu_6Sn_5 . Nous devons cependant rapporter que dans le cas de l'alliage Sn-Ag-Cu et du Cu-Bi, de l'argent et du bismuth ont été trouvés dans les phases.

Tableau X

Épaisseur des phases intermétalliques formées à l'interface cuivre-enrobage

Échantillons vieillis électriquement				
	SnAgCu	SnBi	SnAgCuSb	SnCu
Phase 1 (μm)	1 – 2	1 – 2	2 – 3	1 – 2
Phase 2 (μm)	3 – 4	3 – 4	4 – 5	4 – 5
Enrobage (μm)	40	60	50	50
Échantillons vieillis par conduction thermique				
Phase 1 (μm)	2 – 3	1 – 2	1 – 2	1 – 2
Phase 2 (μm)	4 – 6	3 – 4	3 – 4	4 – 5
Enrobage (μm)	40	60	50	50

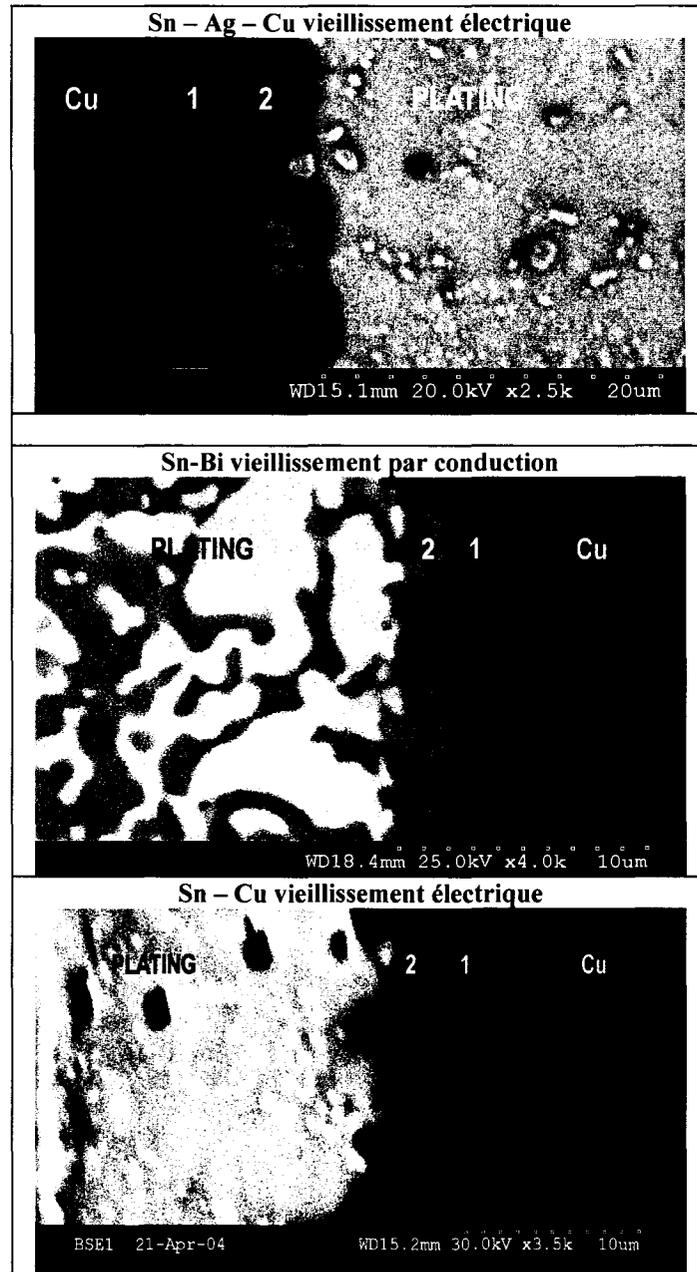


Figure 40 Morphologie type des phases intermétalliques formées à l'interface entre le cuivre et l'enrobage. Phase 1 est du Cu_3Sn et la phase 2 est Cu_6Sn_5 [Brau04]

Des fissures ont été observées à l'interface cuivre-alliage sur quelques échantillons. Celles-ci se propagent le long de la frontière entre les deux mais aussi

perpendiculairement dans les phases intermétalliques. La composition des phases intermétallique subit une progression dans le temps. La figure 41 montre le schéma de cette progression tel qu'observée dans nos échantillons. Plusieurs études ont montré que les propriétés mécaniques du système cuivre-étain sont grandement affectées par la présence des couches intermétalliques lorsque celles-ci sont supérieures à 2 μm [Fields04, Urquhart76, Bauer76, Linborg75].

Nous avons observé que la résistivité électrique de l'interface est beaucoup plus élevée chez les échantillons vieillis électriquement. Cette différence pourrait être expliquée par le niveau de contrainte mécaniques à l'interface. Ceci pourrait être une indication que le vieillissement électrique induit des contraintes à l'interface qui sont différentes de celles induites lors du vieillissement par conduction thermique. Il est connu que lors d'un chauffage rapide, il peut se développer des contraintes importantes dans les couches intermétalliques.

Ceci va affecter l'intégrité mécanique de l'interface [Bauer76, Linborg75, Zak72, Dimfield90]. De plus, des mesures de micro-dureté ont montré que les phases intermétalliques du système sans plomb sont très dures et fragiles [Lead04-1, Lead04-2, Roubaud01]. Nos résultats montrent donc que lors du vieillissement thermique par chauffage avec un courant CC, des contraintes mécaniques importantes sont générées à l'interface entre le cuivre et l'alliage sans plomb. De plus, il a été démontré que l'électromigration pourrait avoir un rôle à jouer dans la croissance des phases intermétalliques [Hunt74, Brau94].

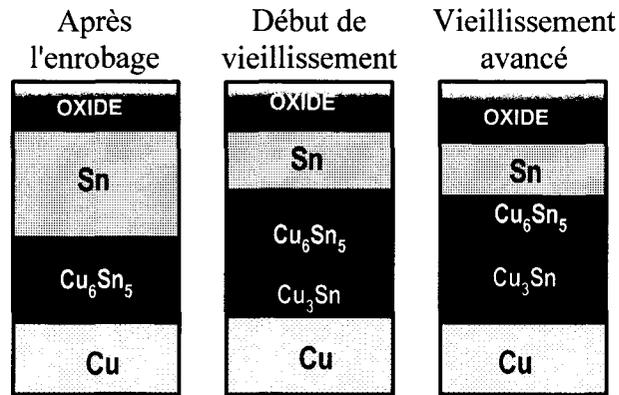
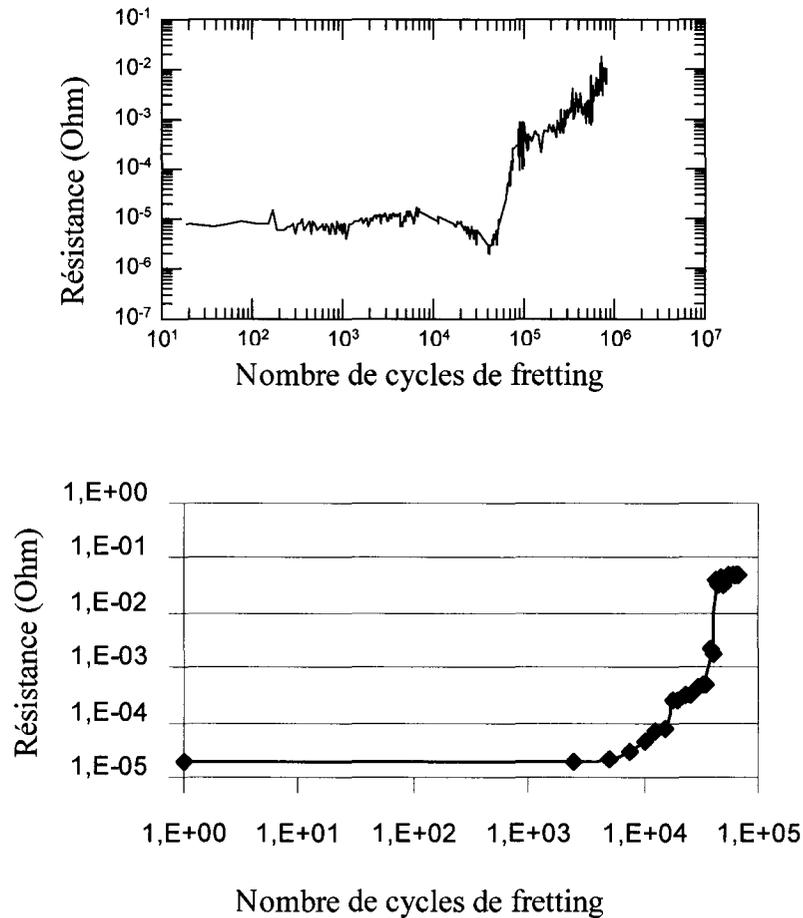


Figure 41 Schéma de la progression des phases intermétalliques à l'interface entre le cuivre et les alliages sans plomb [Brau04]

5.6 Influence du courant alternatif sur le fretting

Tel que décrit à la section 4.3, des essais de fretting ont été réalisés sur des échantillons fil sur plaque en cuivre avec courant CC et CA. Le but de ces essais est de comparer le comportement de la résistance de contact et le mécanisme de formation des débris avec un courant CA et CC. Le graphe 31 montre la résistance de contact en fonction du nombre de cycles de fretting pour un courant CC (haut) et CA (bas).



Graphe 31 Variation de la résistance CC (haut) et CA (bas) pour un contact cuivre-cuivre fil sur plaque en fonction du nombre de cycles de fretting, conditions de l'essai : force de contact = 400 grf, fréquence du mouvement : 1Hz, amplitude : 100 μ m, courant = 50 mA. [Gagn00]

La variation de la résistance CA avec le nombre de cycles de fretting est similaire à celle obtenue avec le CC, avec l'exception qu'elle débute plus tôt avec le courant alternatif. La variation de la résistance est caractérisée par deux stades. Dans le premier stade, la résistance n'est pas affectée par le fretting. Dans le deuxième stade, elle subit une hausse rapide à mesure que le fretting progresse. La figure 42 montre le type de fluctuations du signal de la tension et du courant du contact lors des essais avec courant CA. Au début de l'essai, le courant (ligne du haut) est stable et la tension (ligne du bas) montre une

sinusoïdale parfaite (figures 42A). Après 25000 cycles de fretting, on commence à voir une fluctuation dans le signal du courant qui tend à suivre le signal de la tension (figure 42B). Rendu à 40000 cycles, le signal du courant est fortement dégradé et la tension montre de légers signes de dégradation (figure 42C).

La figure 42D montre le signal de la tension après 57000 cycles, on y remarque que par moment la tension est par endroit très affectée et montre même des endroits où celle-ci est rectifiée. À ce stade de la dégradation la valeur de la valeur de la résistance de contact n'est pas importante, c'est plutôt par la forme du signal de la tension électrique qui domine. Puisque les premier signes de la détérioration dans le contact avec le courant CA étaient présents sur la valeur du courant, nous avons définis un critère de détection du début de la dégradation en ajustant l'oscilloscope pour détecter une variation du courant de $\pm 10\%$ par rapport à la valeur initiale. Ce critère a été utilisé lors des essais subséquents.

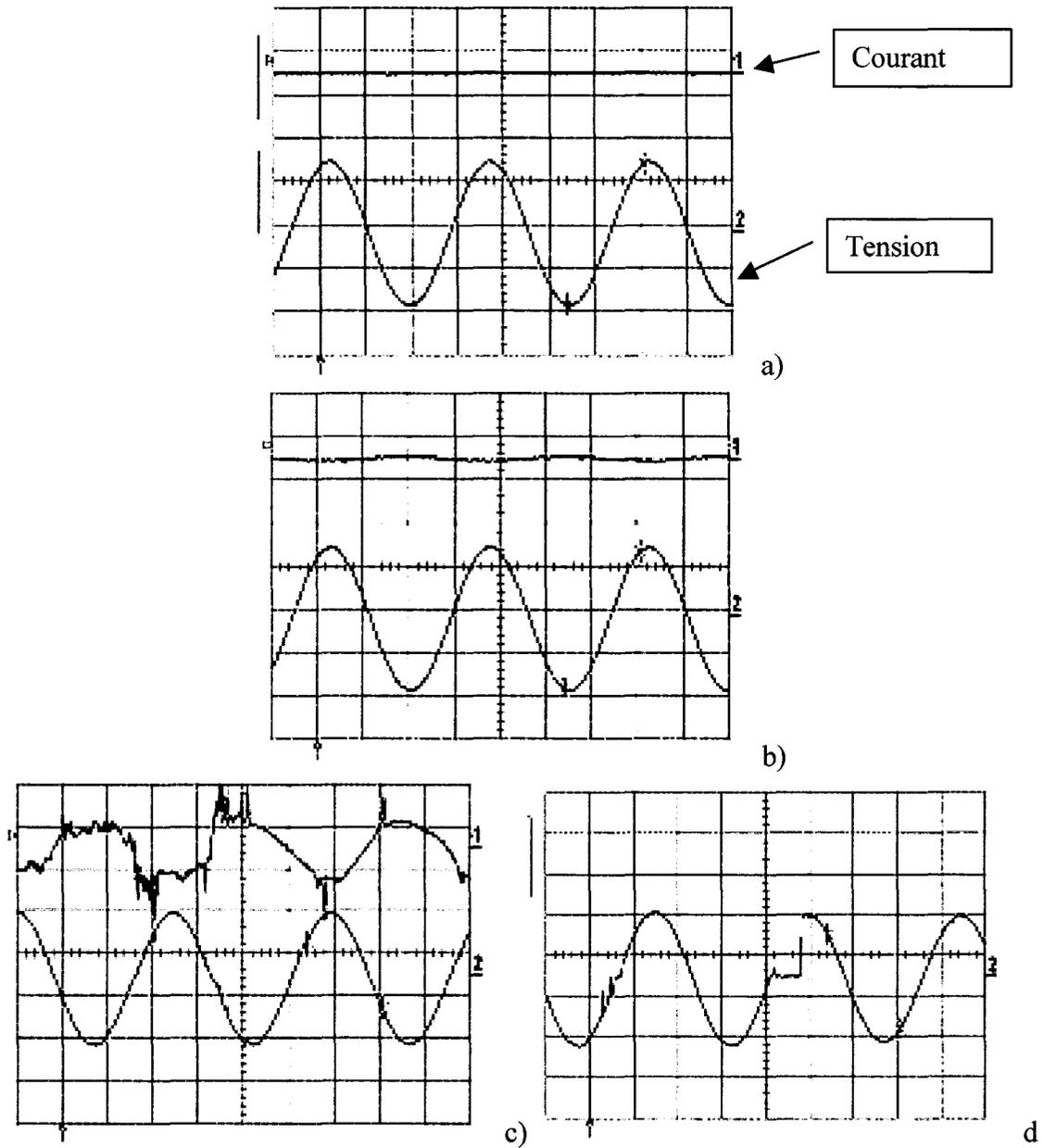


Figure 42 Variation du signal du courant et de la tension pour un contact cuivre-cuivre courant CA, a): signal au début de l'essai, b): 25000 cycles, c): 40000 cycles et d): 57000 cycles, conditions de l'essai: force: 400 grf, fréquence: 1Hz, amplitude: 100 μm , I: 50 mA. CA [Gagn00]

5.6.1 Morphologie des débris et des surfaces

Des analyses détaillées ont été réalisées sur les contacts CA et CC à l'aide du microscope à balayage et la fluorescence à rayons X. Ces analyses ont montré que le fretting cause des dommages importants dans la zone du contact et se caractérise par une accumulation importante de débris et de marque d'abrasion. L'observation détaillée a montrée que les débris sont passablement différents dans le cas du CA versus CC. La figure 43 montre la zone du contact avec courant CA (gauche) et CC (droite), on y remarque que le volume de débris est très important en périphérie du contact pour le CA. Les débris avec le CA ont l'aspect de flocons alors qu'avec le CC, ils sont plus adhérents et restent à la surface. Les débris avec le CA sont très légers et la manipulation de l'échantillons après l'essai est critique pour l'observation.

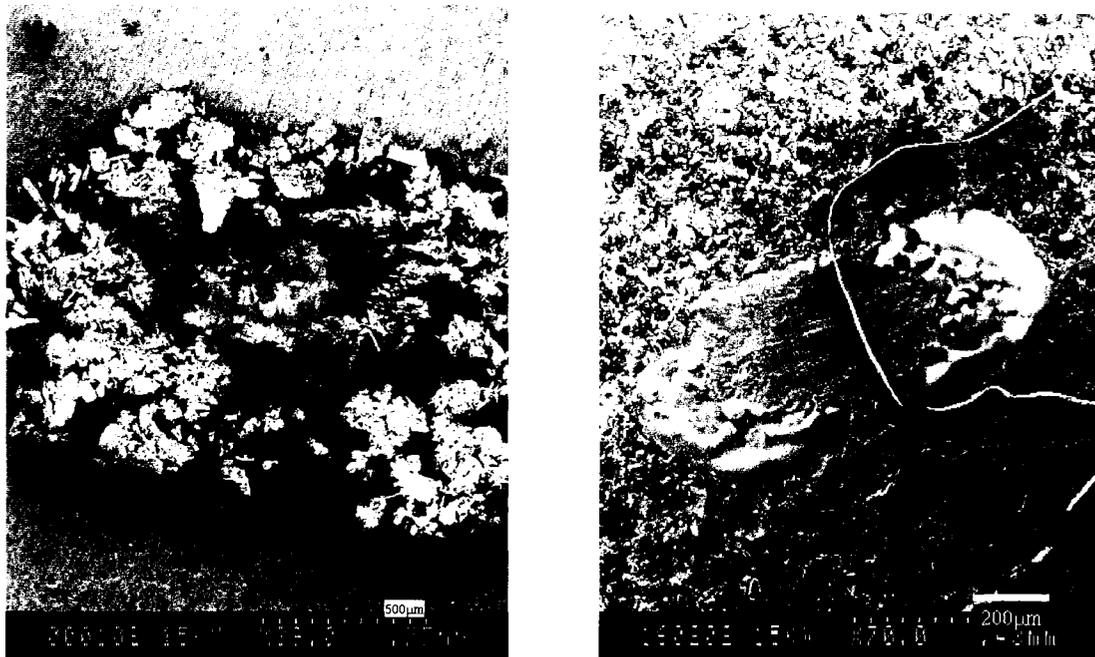


Figure 43 Image prise au microscope à balayage, contact cuivre-cuivre après 57000 cycles avec courant CA (gauche) et CC (droite), force: 400 grf, 1Hz, amplitude 100 µm, 50 mA [Gagn00]

La figure 44 montre un vue agrandie des débris pour le contact CA. L'analyse réalisée au rayon-X n'a cependant pas montré de différence marquée de la composition des débris entre les deux contacts.

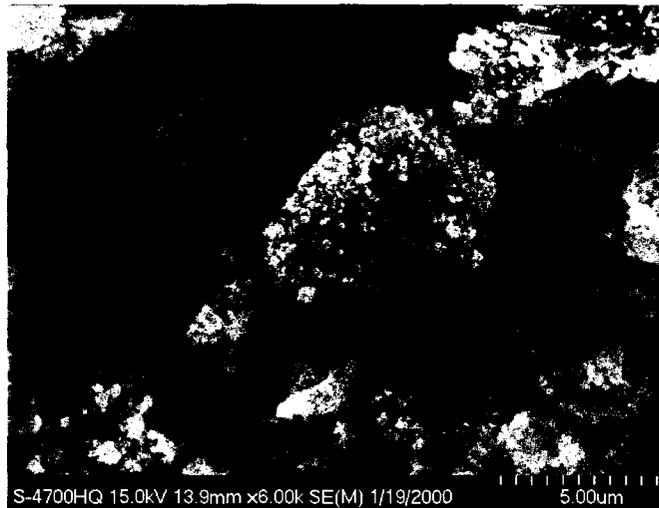


Figure 44 Vue agrandie des débris, cuivre-cuivre après 57000 cycles, force: 400 grf, 1Hz, amplitude: 100 μ m, 50 mA CA [Gagn00]

Les résultats indiquent clairement que le fretting produit sous courant CA produit un effet différent de celui observé avec le courant CC pour un contact cuivre-cuivre. L'effet du fretting semble se caractériser par deux stades de dégradation. Durant le premier stade, lorsque le contact est initié, les aspérités de surface du fil et de la plaque vont faire se briser la couche d'oxyde naturelle établissant ainsi un contact local métal sur métal. Établissant ainsi des voies pour le passage du courant. De plus à cause des contraintes locales très élevées, les aspérités de surface vont subir d'importantes déformations qui vont provoquer des soudures à froid locales.

Lorsque le mouvement de fretting se produit, le déplacement des deux surfaces une par rapport à l'autre va provoquer le bris de ces liens métalliques et va ainsi créer les premiers débris métalliques dans la zone du contact. Une fraction de ces débris vont s'oxyder alors que la majeure partie va demeurer sous forme de particules métalliques.

Le mouvement du fretting va alors favoriser l'évacuation des débris hors de la zone du contact et va provoquer un écrouissage de la surface et la rendre plus lisse. Ceci va alors réduire la formation des débris. On obtient à ce stade un bon contact électrique avec une résistance relativement stable. Les petites variations de la résistance électrique observées à ce stade sont probablement dues au bris instantané du contact à travers les points de contact. Le fait que ces petites variations se poursuivent indique que la production de nouveaux points de contact par rupture local de la couche d'oxyde est contre balancé par la perte de points de contact ailleurs sur la surface.

Dans la deuxième partie de la dégradation, la fatigue de la surface de contact commence à produire de plus en plus de débris et une couche isolante et/ou micro-alliée se bâtit à mesure que le mouvement de fretting progresse. À ce stade, le courant ne passe plus à travers des ponts métalliques (*A-spots*) mais plutôt par claquage à travers la surface isolante. Ce processus est appelé "*A-fritting*" et se produit lorsqu'il n'y a plus de ponts conducteurs. Le courant passe seulement lorsque le potentiel électrique nécessaire pour claquer à travers la couche isolante. Ceci provoque les déformations sévères observées sur le signal du courant de la figure 42.

La détérioration de la surface n'est pas continue à ce stade puisqu'elle s'interrompt par le phénomène appelé "*B-fritting*" [Holm67]. L'accumulation de débris et d'oxydes fait en sorte que le courant passe dorénavant à travers des ponts préférentiels entourés d'oxydes et dont la géométrie provoque une hausse de la densité locale du courant et ainsi de la sur-température. Cette augmentation de la température va provoquer la fonte local du métal et la destruction des oxydes autour du pont. Le contact s'en voit alors amélioré et la résistance de contact baisse et la température diminue et le métal se solidifie.

Pendant le refroidissement, le métal va se fissurer à cause des contraintes internes et ceci va alors provoquer la formation de débris supplémentaires dans la zone des ponts de

contacts. Le mouvement de fretting et la densité de courant accrue vont provoquer la destruction des derniers ponts par où passe le courant. La température élevée provoque la fonte, la décomposition et la sublimation des oxydes et peut même évaporer les matériaux [Lee87, Brau89]. La résistance de contact est alors très instable, elle subit des fluctuations très importantes et ceci produit ultimement la désintégration du contact.

Les résultats des analyses au microscope à balayage soulèvent cependant des questions intéressantes. Tel que montré, la morphologie des débris est très différente avec le contact CA. Nous croyons que la formation des débris sous fretting CA, est probablement due à l'exo-émission d'électrons durant le fretting. L'exo-émission se produit lorsque qu'un matériau est fortement sollicité par des déformations plastiques, de l'abrasion, un changement de phase ou de la fissuration en fatigue. Dans un procédé tribologique, la friction peut mener non seulement à l'élévation de la température de la surface mais aussi à l'exo-émission.

L'ajout du passage d'un courant électrique va contribuer à la hausse de température [Ghasemi93]. Il a été démontré que l'énergie d'activation requise pour la formation des oxydes de fer dans un procédé activé mécaniquement est beaucoup plus faible que pour un procédé activé thermiquement. Ceci impliquerait donc que la température de la surface ne peut être déduite que par l'analyse du type d'oxydes présent. Les oxydes de fer peuvent se former à des températures beaucoup plus faibles que prévues [Ghasemi93].

À la température de la pièce, la couche d'oxyde CuO de couleur noir se forme spontanément. À température élevée, et en présence d'air, l'oxyde Cu₂O de couleur rouge se forme [Brau99]. Des deux, le Cu₂O est connu pour ses propriétés semi-conductrices. Il est possible que l'effet combiné du champ provoqué par le courant CA et l'exo-émission d'électrons soit responsable de la morphologie des débris à l'extérieur de la zone du contact.

5.7 Conclusion

Ce chapitre montre que les mécanismes de dégradation des contacts électriques sont complexes et multiples. Il a été démontré que plusieurs facteurs vont influencer tant la valeur de la résistance électrique du contact, le taux d'usure et aussi la force de friction en présence de fretting et meso-fretting.

Nous avons montré qu'il y a corrélation entre le taux d'usure et l'amplitude du mouvement. Pour les couples métalliques, le coefficient de friction est le même soit entre 0.5 et 0.6. Tant le stade du début du meso-fretting que la formation de la couche micro-alliée dépend du couple des matériaux.

Nous avons montré que pour un contact bille sur plaque cuivre sur cuivre, il est possible de montrer un lien direct entre la force de friction et la valeur de la résistance électrique du contact. De plus, pour le cuivre, lors du dernier stade de dégradation du contact, la force de friction diminue. Pour les autres matériaux de contacts évalués, on note deux comportements différents :

- la variation de la force de contact se produit dès les tout premiers cycles et ne semble être affectée par la variation de la résistance de contact;
- dans les autres cas, la résistance de contact varie avec la force de friction et se traduit par une augmentation de cette dernière.

Les résultats des essais de fretting réalisés sur les alliages sans plomb montrent qu'ils sont tous très affectés par le fretting. De plus, la résistivité électrique de l'interface est beaucoup plus élevée chez les échantillons vieillis électriquement. Cette différence pourrait être expliquée par le niveau de contrainte mécanique à l'interface. Ceci pourrait être une indication que le vieillissement électrique induit des contraintes à l'interface qui sont différentes de celles induites lors du vieillissement par conduction thermique.

La plupart des lubrifiants évalués pour des applications de contact électrique à haute température montrent de bons résultats lors des essais de fatigue thermique par courant sur les contacts boulonnées de cuivre et d'aluminium. Les résultats des essais de fretting ont montré que les lubrifiants se comportent différemment selon le matériel et la force de contact. Pour le cuivre et l'étain, ils ont tous réussi à limiter de façon importante les effets du fretting. Dans le cas de l'aluminium cependant, les essais ont montré que les lubrifiants sont moins aptes à limiter la dégradation par le fretting.

CHAPITRE 6

DISCUSSIONS

Tel que démontré dans cette thèse, l'influence du fretting sur la dégradation des contacts électriques est très complexe à prédire à cause des interrelations entre les paramètres mécaniques, tribologiques et électriques. L'influence de quelques paramètres a été analysée dans le cadre de cette thèse par l'entremise de divers essais et mesures visant à mieux comprendre l'influence du fretting et du meso-fretting sur la dégradation des contacts électriques. À partir de ces mesures, il est permis de conclure les points suivants:

6.1 Effet de l'amplitude de déplacement sur le taux d'usure

Nous avons étudié le frottement non lubrifié de contacts métal-métal et métal-céramique avec et sans courant électrique dans le but de comprendre la relation entre les mécanismes du frottement et du fretting. Ces essais ont montré que le taux d'usure et le coefficient de friction est constant dans le stade du meso-fretting. Lorsque l'amplitude du mouvement est faible, de l'ordre de grandeur de la dimension de la surface de contact, le taux d'usure est faible, on parle alors de fretting.

Il existe bien une transition entre le fretting et le frottement. Pour les différents couples étudiés, elle se situe aux alentours de 200 μm à l'exception du couple acier/cuivre. En dehors du taux d'usure variable, cette transition est caractérisée par un changement de mécanisme de création des débris. On peut parler de copeaux en frottement tandis qu'en fretting, les débris sont beaucoup plus petits et lubrifiants.

Il est aussi possible à partir des ces résultats de classer la résistance au fretting des différents contacts à l'aide de la vitesse d'usure dans le stade de meso-fretting. La

résistance à l'usure est fonction du mécanisme. Lorsque le frottement se fait à travers un métal mou, il y a production de copeaux longs, ce qui entraîne un taux d'usure plus élevé. Pour résister donc au fretting ou au frottement, il faut donc éviter la production de ces copeaux et donc limiter les mécanismes qui en sont responsables. Ce sont essentiellement la propagation d'une fissure et l'adhésion. Le montage proposé permet relativement rapidement de pouvoir choisir des couples de fretting. Les essais ont aussi montré que pour tous les couples évalués, une variation du coefficient de frottement moyen dans le temps est détectée.

Les courbes représentant le taux d'usure en fonction de l'amplitude pour les différents couples de matériaux ont montré que pour la plupart des couples, il existe une zone de transition entre le fretting et le meso-fretting. Le taux d'usure dans cette zone est souvent plus faible que dans la zone du fretting. Le début et la fin de cette zone semble être cependant propre à chacun des couples.

Pour la plupart des couples observés lors des essais sans courant électrique, la nature des débris évolue avec l'amplitude du mouvement, passant de fines particules à une couche continue formées de particules compactées. La forme des débris d'usure renseigne sur le mécanisme de frottement. Plus le débris est fin, plus le fretting est prédominant. Au fur et à mesure que l'amplitude augmente, on observe une agglomération de fines particules. Pour des taux d'usure plus élevés, il y a production de gros copeaux. Pour des amplitudes de déplacement supérieures à 300 μm il y a formation d'une couche de micro alliage sur la surface. Cette couche micro alliée assure le frottement. L'essentiel du glissement se produit à l'intérieur de cette couche de surface. Lorsque l'amplitude diminue, la couche de troisième corps devient de plus en plus faible. Pour de faibles amplitudes de l'ordre de 40 μm , la surface est recouverte par une couche mono-particule de fins oxydes.

La formation de la couche micro-alliée dans la zone du contact se produit en 5 stades distincts. Durant le premier stade, lorsque le contact est initié, les aspérités de surface vont faire se briser la couche d'oxyde naturelle établissant ainsi un contact local métal sur métal. De plus à cause des contraintes locales très élevées, ces aspérités surface vont subir d'importantes déformations qui vont provoquer des fissures. Le mouvement va provoquer le bris des particules métalliques qui vont se répandre sur toute la surface. Les débris vont subir une oxydation rapide selon leur taille. Ces débris vont par la suite s'incorporer dans la surface et former une couche intermédiaire entre les deux surfaces. Lors de la dernière étape, le déplacement entre les deux couches se fait localement à travers la couche micro-alliée. La figure 45 illustre le principe des 5 stades de dégradation de la surface et de production de la couche micro-alliée lors du meso-fretting.

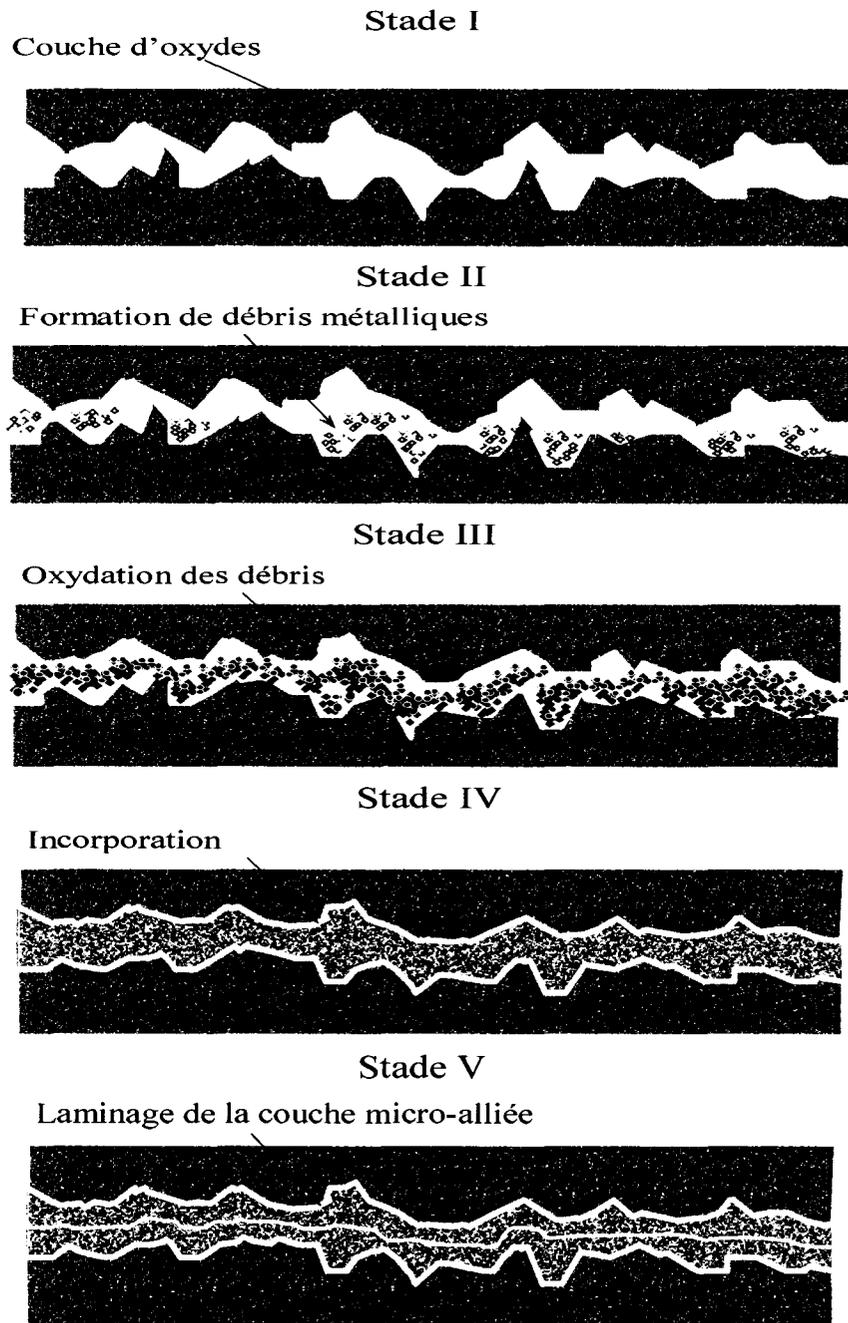


Figure 45 Stades de la production de la couche micro-alliée

6.2 Effet du courant sur la force de friction

Nous avons montré que pour la plupart des couples qui ont été évalués avec et sans courant électrique, l'augmentation de la résistance de contact électrique caractéristique de l'effet du fretting coïncide avec une variation de la force de friction pour la géométrie bille-plaque. Ceci implique donc que bien que le courant soit de très faible amplitude pour nos essais, il a une influence importante sur le mécanisme de formation des débris dans la zone de contact. Pour certains couples tel que cuivre-cuivre et aluminium-aluminium, la force de friction sans courant électrique ne varie que de très peu. La relation entre la présence du courant et la variation de la force de contact devient alors très évidente.

Dans le cas spécifique du cuivre-cuivre, nous avons montré une réduction de la force de friction dès que la résistance de contact commence à dégrader. Cet effet ne s'est produit que pour le couple cuivre-cuivre. Pour les autres couples où la coïncidence de la variation de la force de friction et de la variation de la résistance du contact a été observée, on assiste toujours à une hausse de la force de friction. Les caractéristiques physiques des oxydes de cuivre et d'aluminium a probablement un rôle important à jouer dans ces résultats. L'oxyde d'aluminium se forme naturellement très rapidement de par sa position sur l'échelle des potentiels électrochimiques. De plus, celui-ci est très dur et abrasif, alors que l'oxyde de cuivre se forme moins rapidement. L'oxyde de cuivre est aussi semi-conducteur et possède un coefficient de friction qui est plus faible que le cuivre non oxydé. Dans le cas de l'aluminium, l'augmentation de la force de friction serait provoquée par la quantité et/ou la nature des débris avec courant électrique. Alors que pour le cuivre-cuivre, on peut penser que le courant électrique va provoquer une augmentation de la quantité d'oxyde ou alors rendre la couche micro-alliés moins conductrice.

Ces deux couples ont l'avantage qu'étant relativement purs, les mécanismes de formation des couches inter-métalliques qui rendent encore plus complexe la dégradation, ne sont

pas en cause. Ainsi, la coïncidence entre l'augmentation de la résistance de contact et l'augmentation de la force de friction pour le couple laiton-laiton devient difficile à lier à la formation des oxydes seulement. Pour le couple laiton-laiton, nous avons montré une augmentation qui coïncide avec la variation de la résistance de contact mais qui n'est pas aussi importante que dans le couple cuivre-cuivre. Possiblement dans ce cas, le fait que l'on soit en présence d'un système qui va permettre l'interdiffusion et les intermétalliques ce qui fait en sorte que l'effet du courant est plus difficile à lier à un seul paramètre. Ces résultats ainsi que l'analyse approfondie de l'influence du courant sur les couples non-identiques feront l'objet d'une publication prochainement [Gagn05]

6.3 Variation de la densité de courant et de la force de friction

Nous avons utilisé un courant de 50 mA pour tous nos essais de fretting. Cette valeur est utilisée en littérature pour la géométrie de contact que nous avons utilisé et est présentée comme étant relativement faible. On doit cependant tenir compte dans cette évaluation de la progression de l'usure des deux surfaces de contact. La figure 46 montre une trace obtenue à la fin de l'essai sur un échantillon cuivre-cuivre avec une force de contact de 400 grf et courant CA de 50 mA fil-plaque.

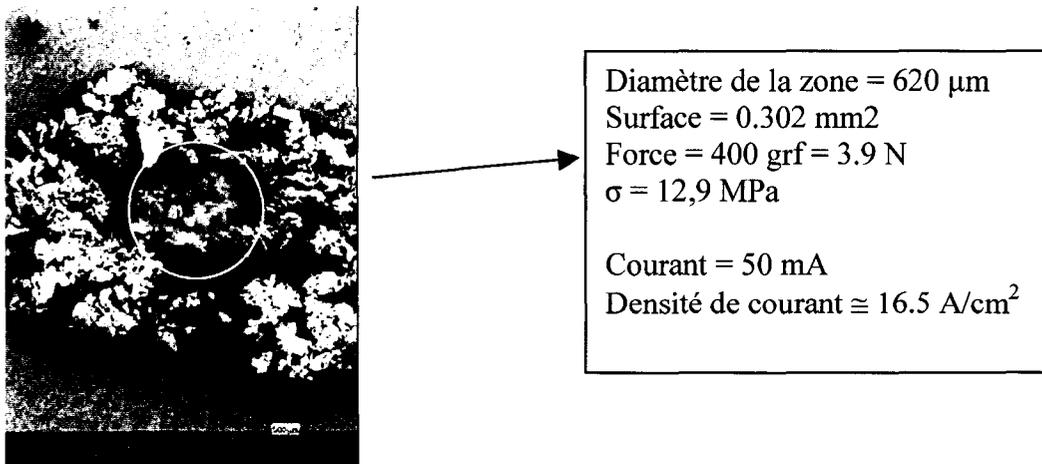
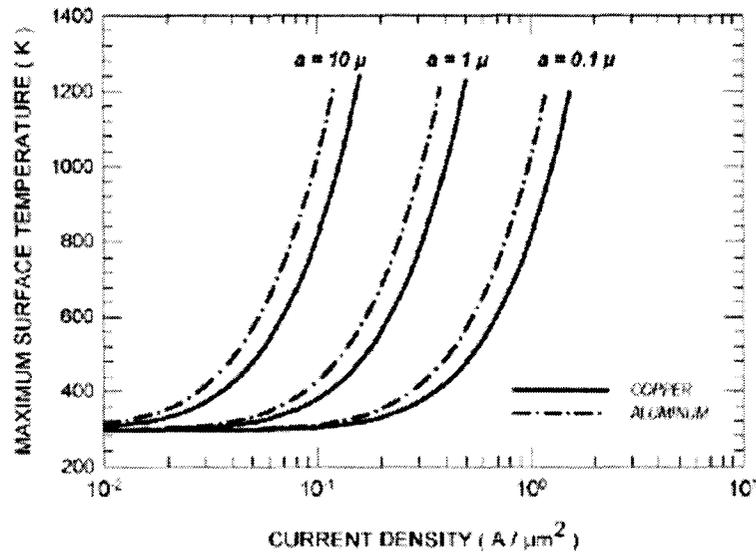


Figure 46 Mesure de la densité de courant et de la force de contact

La densité de courant à la fin de l'essai est de 16.5 A/cm^2 . De par la géométrie des échantillons, la densité de courant et la force de contact ne peuvent être constant pendant l'essai. Le seul moyen que ces paramètres demeurent constants serait d'avoir des échantillons de type plaque-plaque ou de compenser pendant l'essai de fretting la force de contact et la densité de courant à mesure que les surface se modifient par l'usure.

Cette évaluation de la densité de courant ne tient cependant pas compte de la surface de contact réelle par laquelle passe le courant électrique (sommation des "a-spots") tel que montré au chapitre 2. Cette variation de la densité de courant pendant les essais peut avoir des conséquences importantes sur les résultats. Le fig 32 montre la variation de la température d'un point de contact ("a-spots") en fonction du diamètre du point de contact pour l'aluminium et le cuivre. On y remarque que pour un diamètre de point de contact donné, la température du point de contact augmente rapidement lorsque l'on augmente la densité de courant. Cette augmentation de la température va produire des effets thermiques importants sur le matériel de contact.

Lors des essais de fretting, on pourrait dire que la densité de courant est maximale au début de l'essai étant donné que la surface de contact est plus petite. À la fin de l'essai, la surface est plus grande mais la plus grande épaisseur de la couche d'oxydes et de débris fait en sorte que le courant à moins d'endroits où passer. Globalement, il est donc difficile de déterminer de façon précise quel est la densité de courant réelle.



Grphe 32 Température de la surface de contact en fonction du diamètre du point de contact pour le cuivre et l'aluminium [Gagn05]

6.4 Influence du courant CA sur le contact cuivre-cuivre

Le comportement dans le temps de la résistance de contact pour les échantillons cuivre-cuivre soumis aux mêmes conditions de fretting est essentiellement le même pour le courant CA que CC. Les analyses menées au microscope à balayage ont cependant montré une importante différence de la morphologie des débris de fretting dans la zone du contact dégradé entre les échantillon CA et CC. Nous croyons que la formation des débris sous fretting CA, est probablement due à l'exo-émission d'électrons durant le fretting. Dans un procédé tribologique, la friction peut mener non seulement à l'élévation de la température de la surface mais aussi à l'exo-émission [Gagn00]. Il a été démontré que l'énergie d'activation requise pour la formation des oxydes de fer dans un procédé activé mécaniquement est beaucoup plus faible que pour un procédé activé thermiquement. Ceci impliquerait donc que la température de la surface ne peut être déduite que par l'analyse du type d'oxydes présent. Les oxydes de fer peuvent se former à des températures beaucoup plus faibles que prévues [Ghasemi93].

6.5 Influence du fretting et du vieillissement thermique sur les alliages sans plomb

Il a été montré que pour les alliages sans plomb SnAgCu, SnBi, SnAgCu et SbSnCu la dégradation sous fretting se traduit par une augmentation rapide de la résistance de contact. La formation et la croissance des phases intermétalliques pour ces alliages a un effet important sur la résistance électrique de l'interface alliage-cuivre. La formation des phases intermétalliques se manifeste par l'augmentation de la résistance électrique de l'interface entre le cuivre et l'alliage et ce tant pour les échantillons vieillis par courant électrique que par chauffage. L'augmentation de la résistance électrique à l'interface semble être plus importante pour les échantillons vieillis électriquement [Gagn04].

Plusieurs études ont montré que les propriétés mécaniques du système cuivre-étain sont grandement affectées par la présence des couches intermétalliques lorsque celles-ci sont supérieures à 2 μm . Nous avons observé que la résistivité électrique de l'interface est beaucoup plus élevée chez les échantillons vieillis électriquement. Cette différence pourrait être expliquée par le niveau de contrainte. Ceci pourrait être une indication que le vieillissement électrique induit des contraintes à l'interface qui sont différentes de celles induites lors du vieillissement par conduction thermique. Il est connu que lors d'un chauffage rapide, il peut se développer des contraintes importantes dans les couches intermétalliques qui vont affecter l'intégrité mécanique de l'interface [Bauer76, Linborg75, Zzak72, Dimfield90]. De plus, des mesures de micro-dureté ont montré que les phases intermétalliques du système sans plomb sont très dures et fragiles [Lead04-1, Lead04-2, Roubaud01]. Nos résultats montrent donc que lors du vieillissement thermique par chauffage avec un courant CC, des contraintes mécaniques importantes sont générées à l'interface entre le cuivre et l'alliage sans plomb. De plus, il a été démontré que l'électro-migration pourrait avoir un rôle à jouer dans la croissance des phases intermétalliques [Huntington74, Brau94]. Des essais supplémentaires ont été réalisés dans le but d'approfondir les connaissances sur l'effet du courant électrique sur les phases intermétalliques de ces alliages. Des échantillons de plaques de fretting de

cuivre ont été soumises à un vieillissement thermique en chambre environnementale pendant 5, 10, 15 et 25 jours à 4 températures entre 75 et 180 °C. Le même vieillissement a été reproduit électriquement à l'aide de la source de courant CC et d'un montage dérivé de celui montré à la section 4.3. Ces échantillons ont été soumis à des essais de fretting et à des analyses au microscope à balayage. Les résultats seront diffusés un peu [Brau05].

6.6 Lubrifiants haute température

Les résultats des essais par thermogravimétrie (TGA) et l'exposition prolongée en chambre environnementale demeurent une bonne évaluation de la capacité de ces lubrifiants à haute température. Il a été démontré que même une exposition relativement courte à 200 °C provoque des changements importants pour quelques uns de ces composés. La nature de ces composés fait en sorte que leur performance sur les contacts cuivre-cuivre est sensiblement meilleure que pour les contacts aluminium-aluminium. Dans le cas du cuivre, le lubrifiant rallonge en fait le stade du meso-fretting où l'usure est faible. Nous croyons que le comportement au fretting de ces lubrifiants est lié à la résistance au cisaillement du composé formé par les débris et le lubrifiant. Des analyses supplémentaires seront nécessaires pour déterminer si le mécanisme de dégradation observé s'apparente à celui des lubrifiants utilisés présentement [Brau02].

La formation de composés intermétalliques par l'interdiffusion des métaux dans un couple électrique bimétallique est en général nuisible pour la stabilité électrique du couple [Gjosten73, Lind75]. Les composés intermétalliques exercent une grande influence non seulement sur la résistivité électrique mais aussi sur les propriétés mécaniques du raccord étant donné que ces composés sont habituellement très fragiles et à conductivité électrique faible. Ceci réduit considérablement la résistance à l'impact, à la traction et la contrainte de cisaillement d'un raccord. Certains composés intermétalliques possèdent des duretés très élevées, comparativement aux alliages

primaires. Donc les zones de contact intermétalliques seront très affectées par les micro-déplacements qui provoqueront la rupture des zones intermétalliques du contact électrique [Bandy90, Braun89-2].

La figure 47 montre le schéma de la formation des phases intermétalliques dans le système étain-cuivre. On y voit que l'interdiffusion du cuivre dans l'étain provoque la formation de deux phases intermédiaire, le Cu_6Sn_5 et le Cu_3Sn .

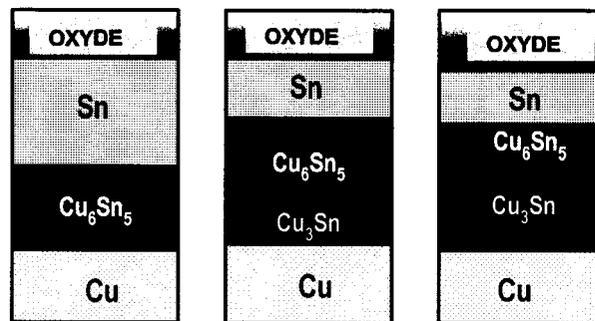


Figure 47 Nature des phases intermétalliques dans le système cuivre/étain [Brau04]

RECOMMANDATIONS POUR LA POURSUITE DES TRAVAUX

La poursuite des travaux peut se faire sur plusieurs aspects soulevés dans cette thèse. Le montage développé à l'ÉTS permet d'investiguer plus à fond les travaux réalisés sur la relation entre l'amplitude du mouvement, la force de friction et le taux d'usure. Sachant maintenant que chaque couple de matériaux étudié semble avoir une zone de transition spécifique entre le fretting et le meso-fretting, il serait ainsi intéressant de refaire certains essais pour approfondir les connaissances sur le mécanisme de formation des débris dès le début de la zone de transition.

J'ai particulièrement apprécié les analyses sur le comportement de la force de friction en rapport avec la résistance électrique de contact. La valeur du courant a certainement un rôle important à jouer dans cette relation. Une étude avec divers amplitudes de courant électrique serait intéressante à réaliser dans le but d'en extraire une densité de courant limite ayant un effet sur la force de friction.

Les essais réalisés sur l'influence du courant CA sur la dégradation par le fretting soulèvent des questions importantes: Quel est l'influence de l'exo-émission d'électron dans la formation des débris et comment s'y prendre pour prouver que ce mécanisme serait bel et bien responsable? Il est possible que les oxydes formés avec le courant CA ne soient pas de même nature qu'avec le courant CC.

L'influence du courant électrique sur la formation des couches intermétalliques pour les alliages sans plomb est présentement investigué à l'aide d'un montage qui a récemment été réalisé à partir de celui de la section 4.4. Des échantillon de plaques de fretting en cuivre ont été enrobées avec les mêmes alliages qui ont fait l'objet de notre étude. Celle-ci ont été vieillées électriquement et thermiquement mais avec des durées plus longues et une gamme de températures entre 75 et 200 °C. Le montage réalisé à cet effet permet de

faire passer un courant simultanément dans 4 plaques de fretting (figure 48). Un programme surveille la température de chacune des plaques et ajuste le courant de la source de façon à maintenir une température de vieillissement constante. Étant donné que les épaisseurs des couches intermétalliques mesurées lors de nos essais étaient de l'ordre du micron, une attention particulière sera apportée lors de l'analyse au microscope. De plus nous allons utiliser un microscope électronique permettant une meilleure résolution que celui utilisé à date.

Montage du vieillissement électrique des plaques de fretting

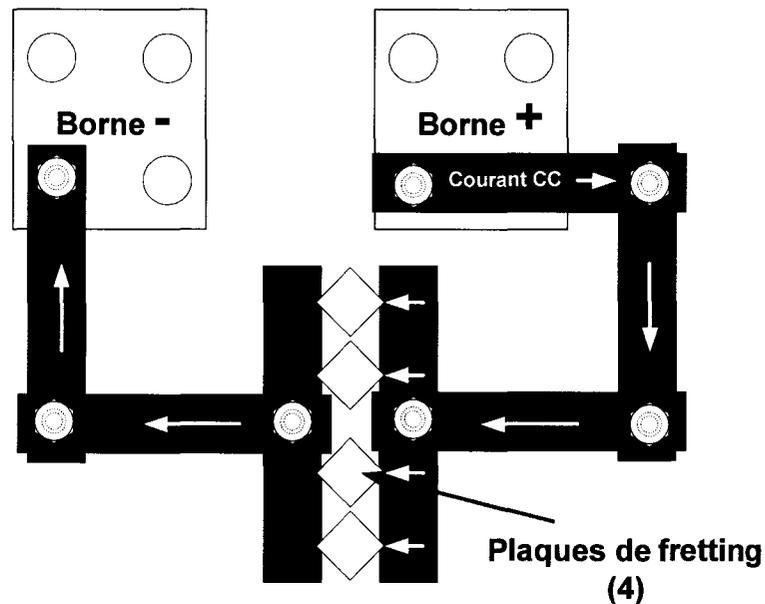


Figure 48 Montage de vieillissement des plaques de fretting enrobées d'alliages sans plomb

ANNEXE 1

CALIBRATION MONTAGE BILLE-PLAQUE

Tel que montré à la figure A.1.1, le bras supérieur du porte-bille du montage de l'ÉTS est muni de 2 jauges de contraintes (une en dessus et une en dessous) pour mesurer la flexion de la poutre provoquée par la force de friction de la plaque sur la bille. Les deux jauges (350 Ohm) sont raccordées en demi-pont et un pont de Wheastone est complété à l'aide de deux résistances supplémentaires de 350 Ohm. Lorsque le bras est supporté et que la bille ne touche pas à la plaque, nous avons déterminé expérimentalement que le poids propre du bras est de force de 73 gr (0.72N). En présence d'une force F_C appliquée sur le dessus du porte-bille produit un moment de flexion $M_x(+)$, il est possible d'établir la courbe de flexion en fonction de la force F_C .

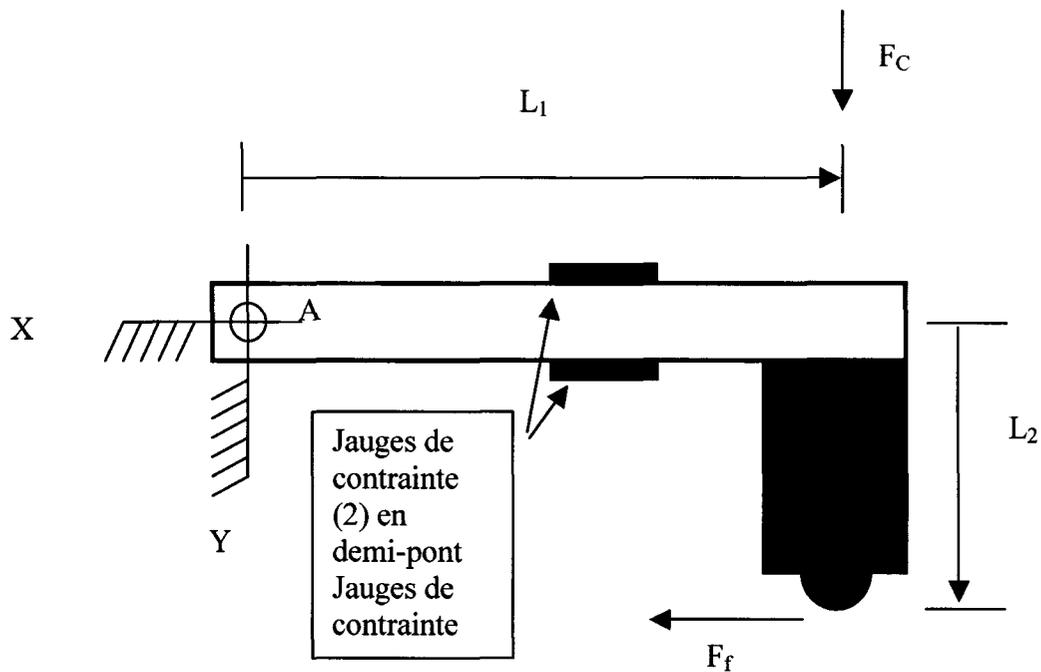


Figure A1.1 Détermination de la force de friction du contact à partir de la flexion de la poutre

La figure A.1.2 montre la relation entre les paramètres géométriques de la poutre et l'équation nécessaire à l'obtention de la déformation. Dans notre cas, les résistances R2 et R4 sont les résistances de 350 Ohm et R1 et R3 représentent les deux jauges. La tension V_s est la tension variable selon la déformation de la poutre et la valeur V_0 est la tension d'excitation du pont qui dans notre cas est de 5.0 volts.

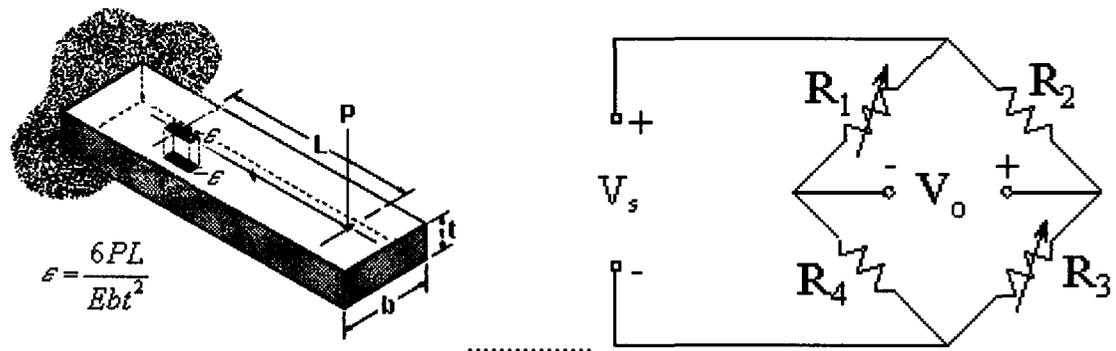


Figure A1.2 Mesure de la flexion de la poutre [Eng05]

où

ε = Déformation en μ déformation

P = Force (N)

L = Longueur de la poutre

E = Module de Young (Mpa)

B = Largeur de la poutre (mm)

T = épaisseur de la poutre (mm)

En répétant l'essai de flexion de la poutre avec plusieurs forces, il est possible d'établir une équation de la force de flexion de la poutre en fonction du signal obtenu par le pont de jauge ($F(M_X)$).

$$F(M_X) = F_C * L_1 \quad (A1.1)$$

Puisque la distance $L_1 \neq L_2$, pour $F_C = 0$ à 150 gr, la force de friction F_f sur le contact est ensuite obtenue par l'équation suivante :

$$F_f = F(M_x) * L_1/L_2 \quad (A1.2)$$

L'intérêt de la mesure de l'effort transversal (force de friction) est de pouvoir en extraire le coefficient de friction du contact, via la relation :

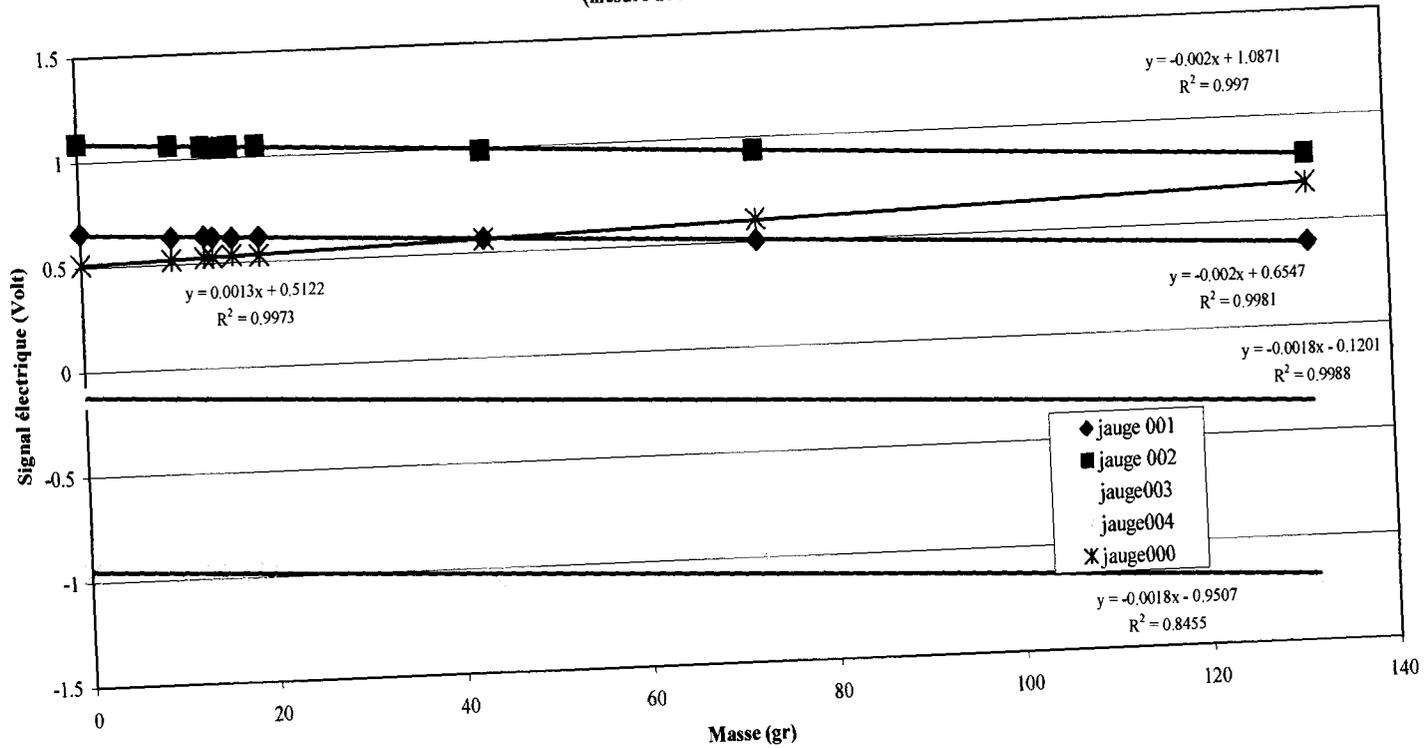
$$\mu = \frac{F_f}{F_n} \quad (A1.3)$$

où F_n est la force de contact. Dans le cas présent la force de contact est assurée par un poids mort de diverses valeurs. Pour la majorité des essais, la force utilisée était de 73 gr (0.72N). Pour réaliser des essais avec des forces différentes, on rajoute des poids sur le dessus du porte-bille. La figure A.1.3 montre la courbe de calibration de la déformation de la poutre en fonction de la force appliquée dessus.

De la même manière que pour la mesure de la force de friction, la mesure du déplacement de la plaque est faite à l'aide de la flexion d'une poutre instrumentée à l'aide de jauges de contraintes montées en demi-pont. Cette mesure est essentielle afin de connaître l'amplitude exacte du déplacement de chacune des stations. La calibration des poutres de mesure de déplacement est à toute fin pratique identique à celles de la mesure de la force de friction sauf qu'elle est plus simple. À l'aide d'un indicateur micrométrique, la courbe de la réponse en tension du pont de jauge en fonction de la flexion de la poutre a été trouvée pour chacune des stations. La géométrie étant légèrement différente pour les poutres de mesure du déplacement, les équations sont légèrement différentes.

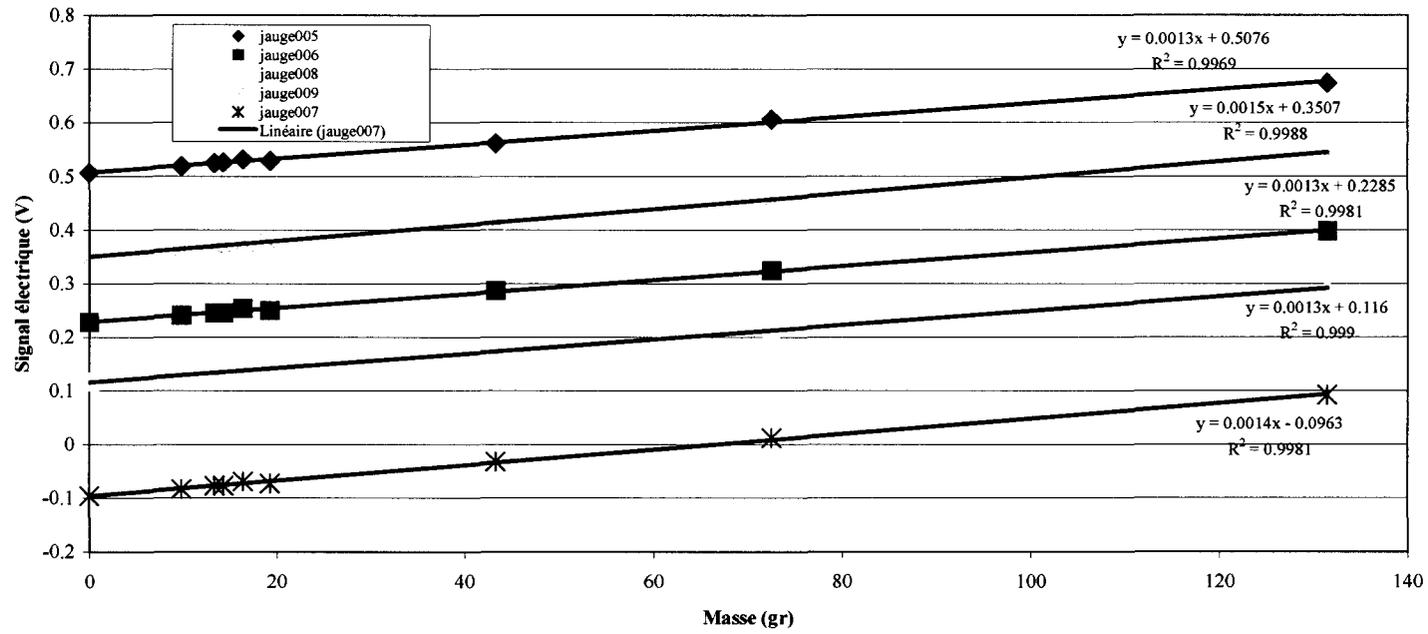
Tout comme pour les jauges de mesure de la force de friction, les ponts de jauges ont été complétés à l'aide de résistance de précision de 350 Ohm et la tension d'alimentation du circuit est de 5.0 Volts. La courbe de calibration du déplacement en fonction de la tension est montré à la figure A.1.4.

Étallonage jauges du haut
(mesure de la force de contact)



Grphe A1. 1 Courbes de calibration des poutres de mesure de la force de friction, montage ÉTS

**Étallonnage des jauges du bas
(mesure de l'amplitude)**



Grphe A1.2 Courbes de calibration jauges de mesure du déplacement montage ÉTS

Le schéma de l'instrumentation nécessaire à la mesure de la résistance du contact bille-plaque est montré à la figure A.1.5.

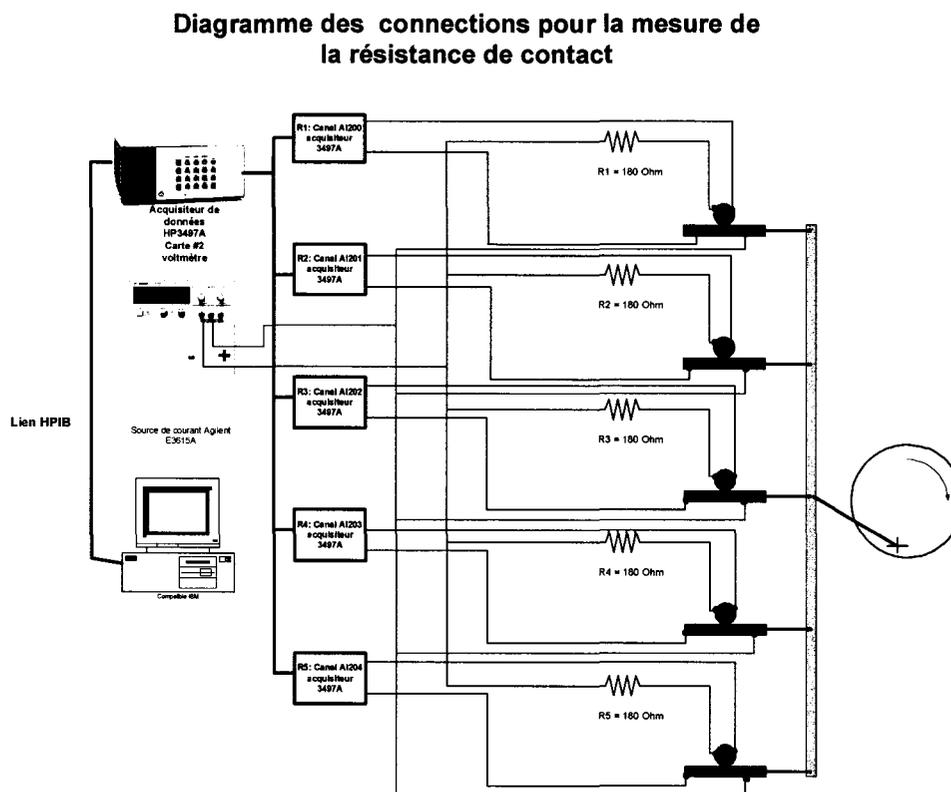


Figure A1.3 Schéma de l'acquisition des valeurs de résistance de contact

Afin d'effectuer une sauvegarde systématique des données d'essai, un programme d'acquisition a été réalisé avec le logiciel HPVee sur plate-forme PC et commercialisé par HP. Ce programme a pour fonction de stocker les données d'essais de façon à pouvoir les analyser dans Excel par la suite. Les données à sauvegarder sont pour chacune des stations: l'amplitude du déplacement en μm , la force de friction, le temps depuis le début de l'essai (sec), la tension électrique entre la bille et la plaque (V). Pour chacune des stations, le programme enregistre 100 lectures de tous les paramètres d'une station et passe ensuite à la suivante. Le cycle est répété à toutes les minutes ou selon la sélection de l'utilisateur. La logique de programmation est montrée à la figure A.1.4.

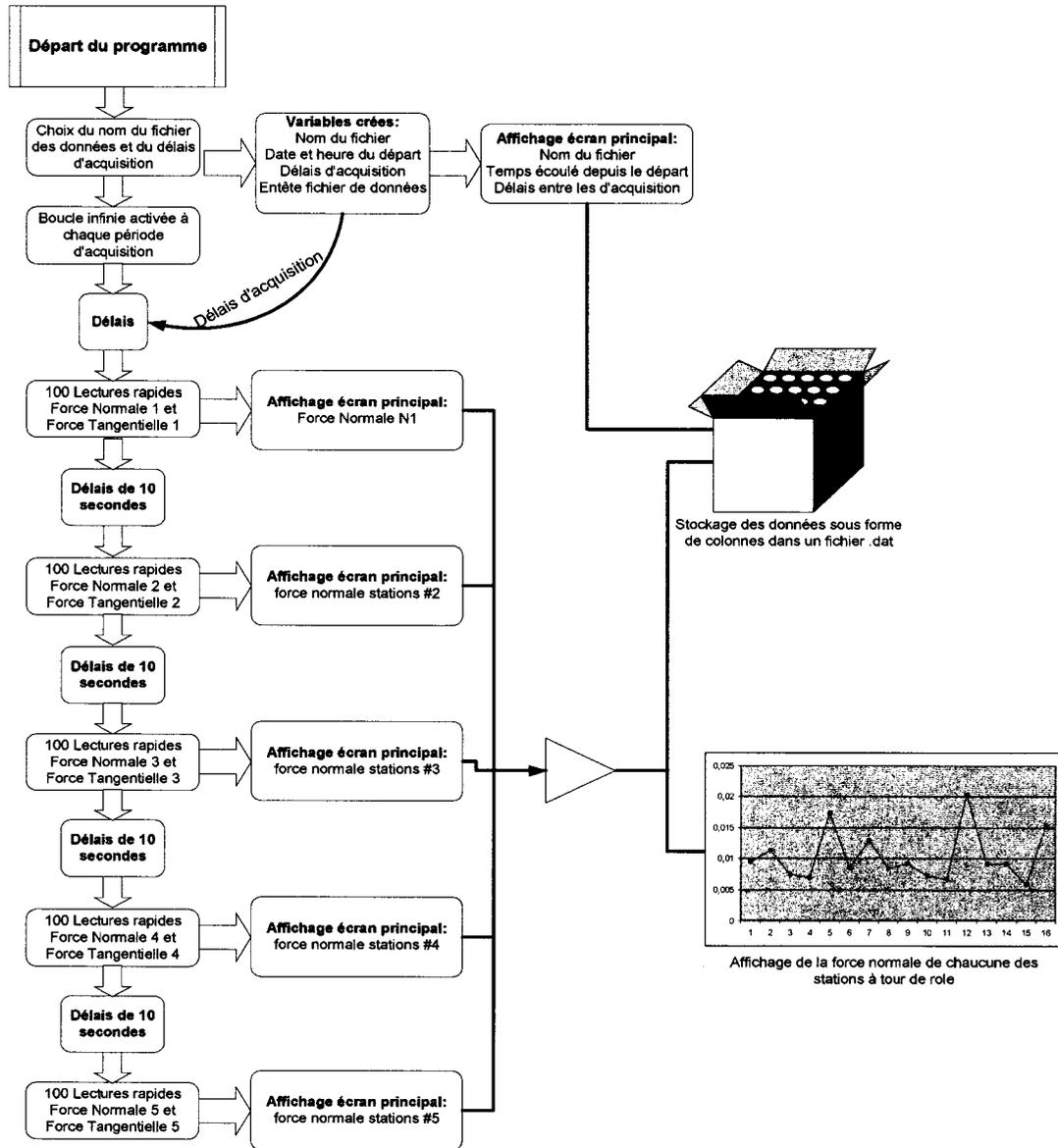
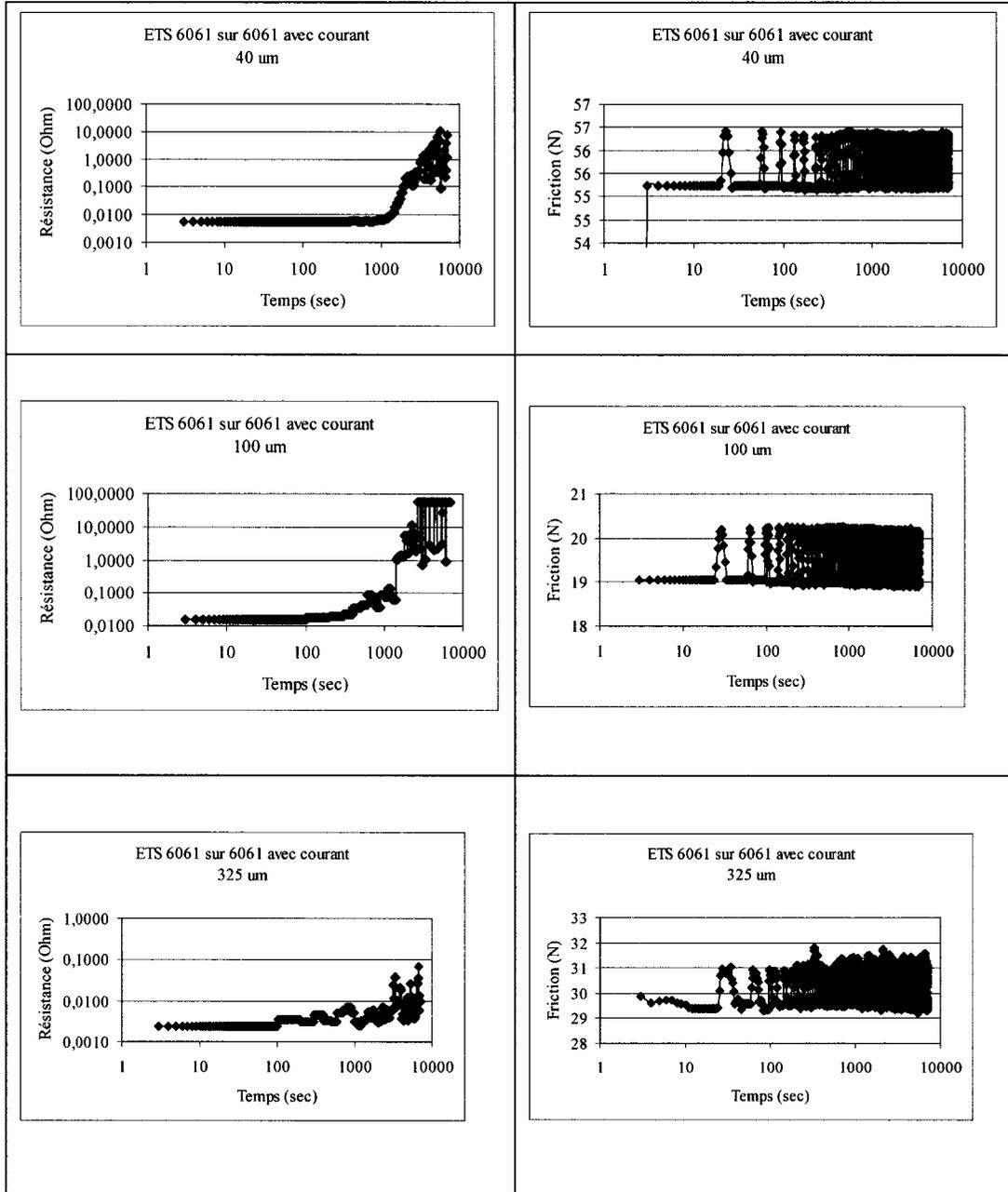


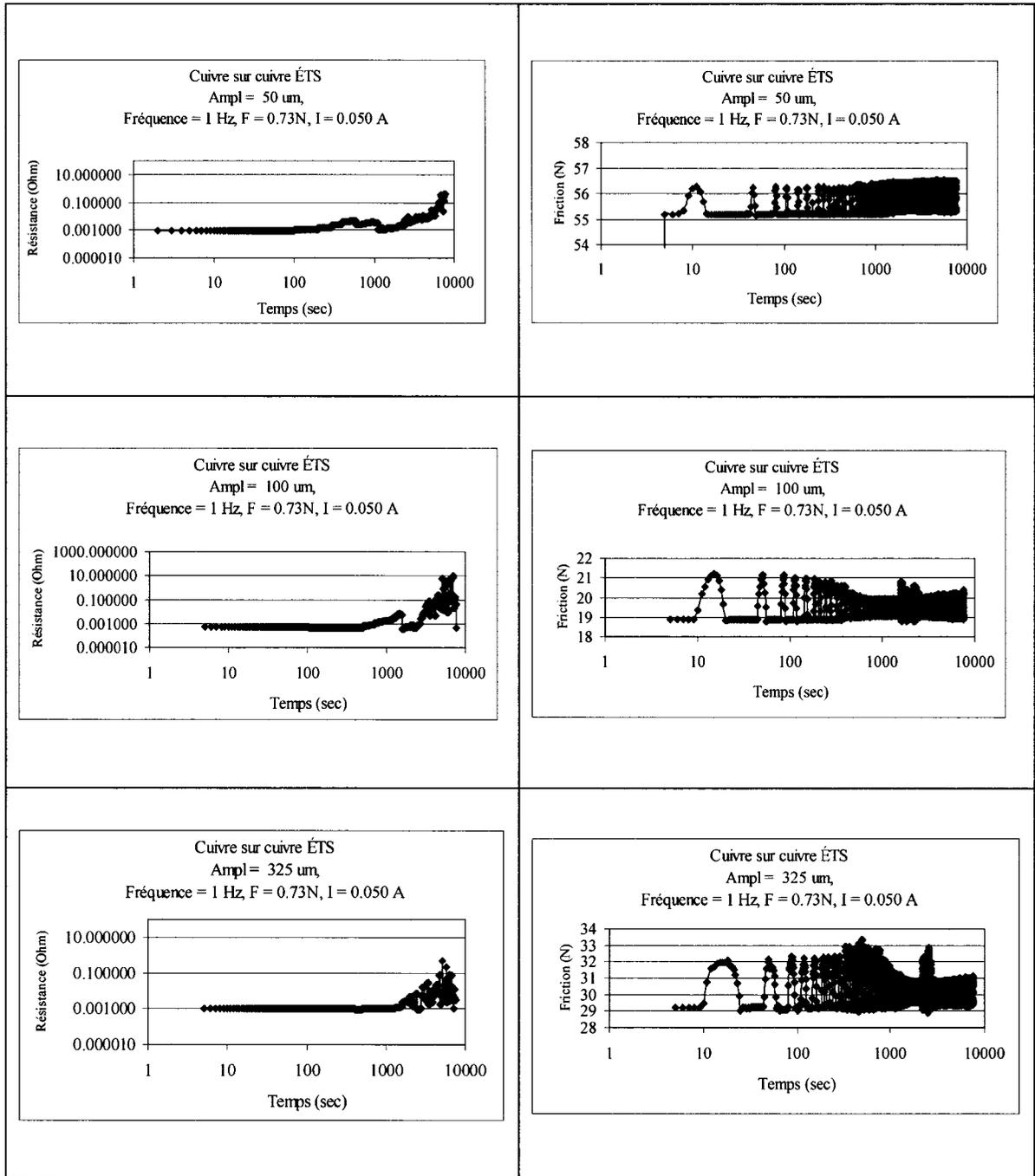
Figure A1.4 Schéma de la logique de l'acquisition des données ÉTS

ANNEXE 2

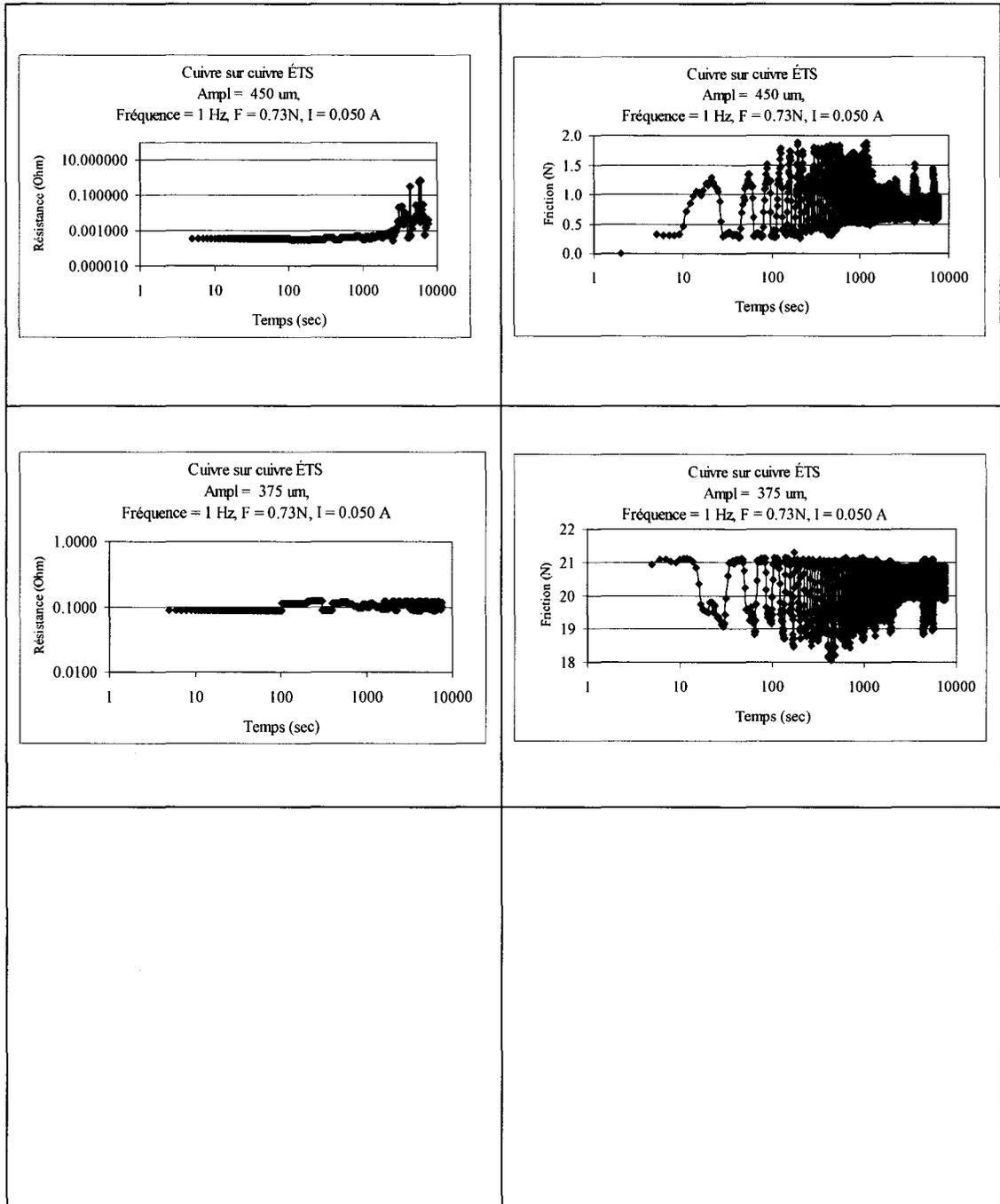
RÉSULTATS DES ESSAIS DE FRETTEMENT BILLE SUR PLAQUE, AVEC ET SANS COURANT ÉLECTRIQUE



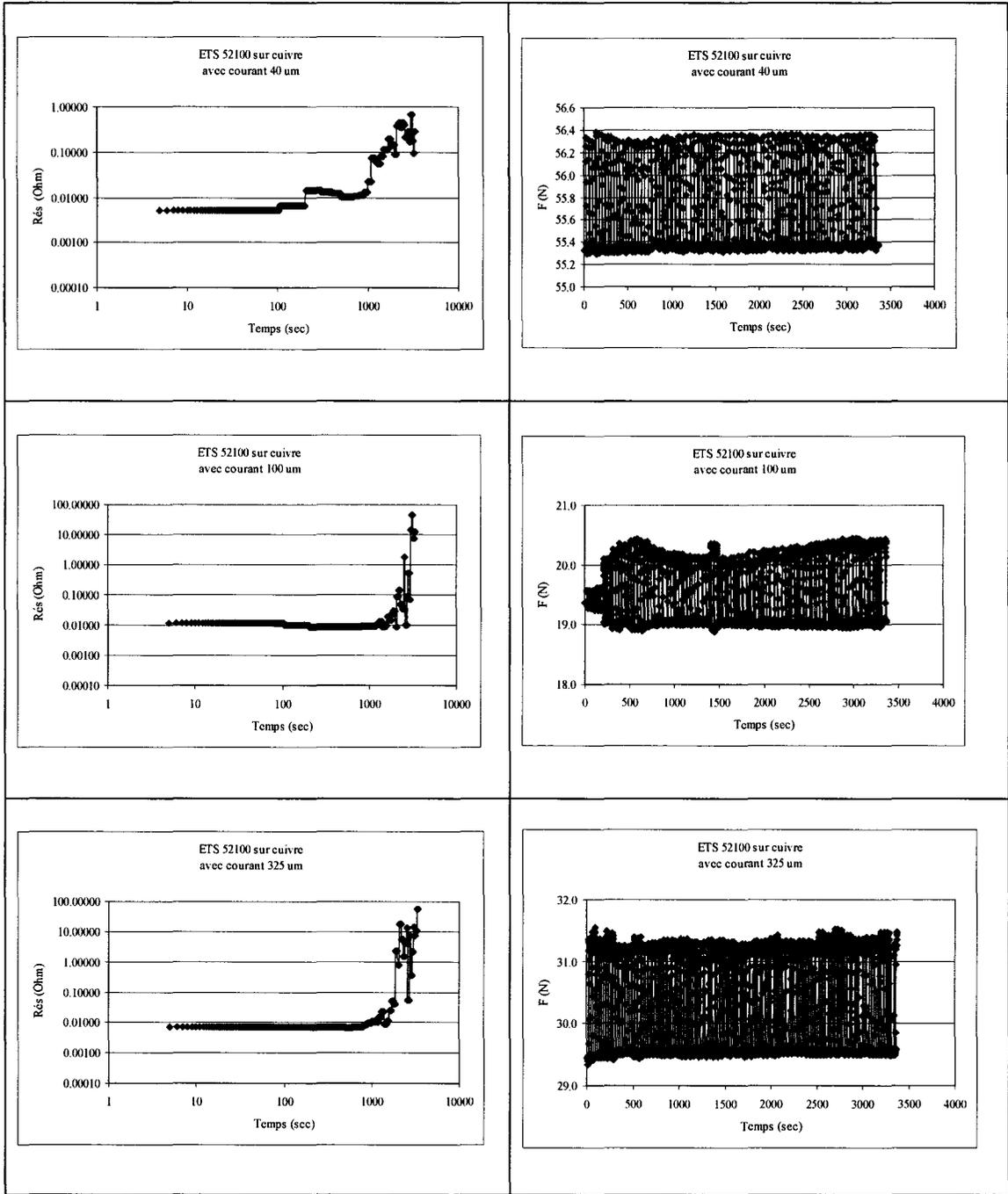
Graphe A2. 1 6061 sur 6061 avec courant, 40, 100 et 325 μm



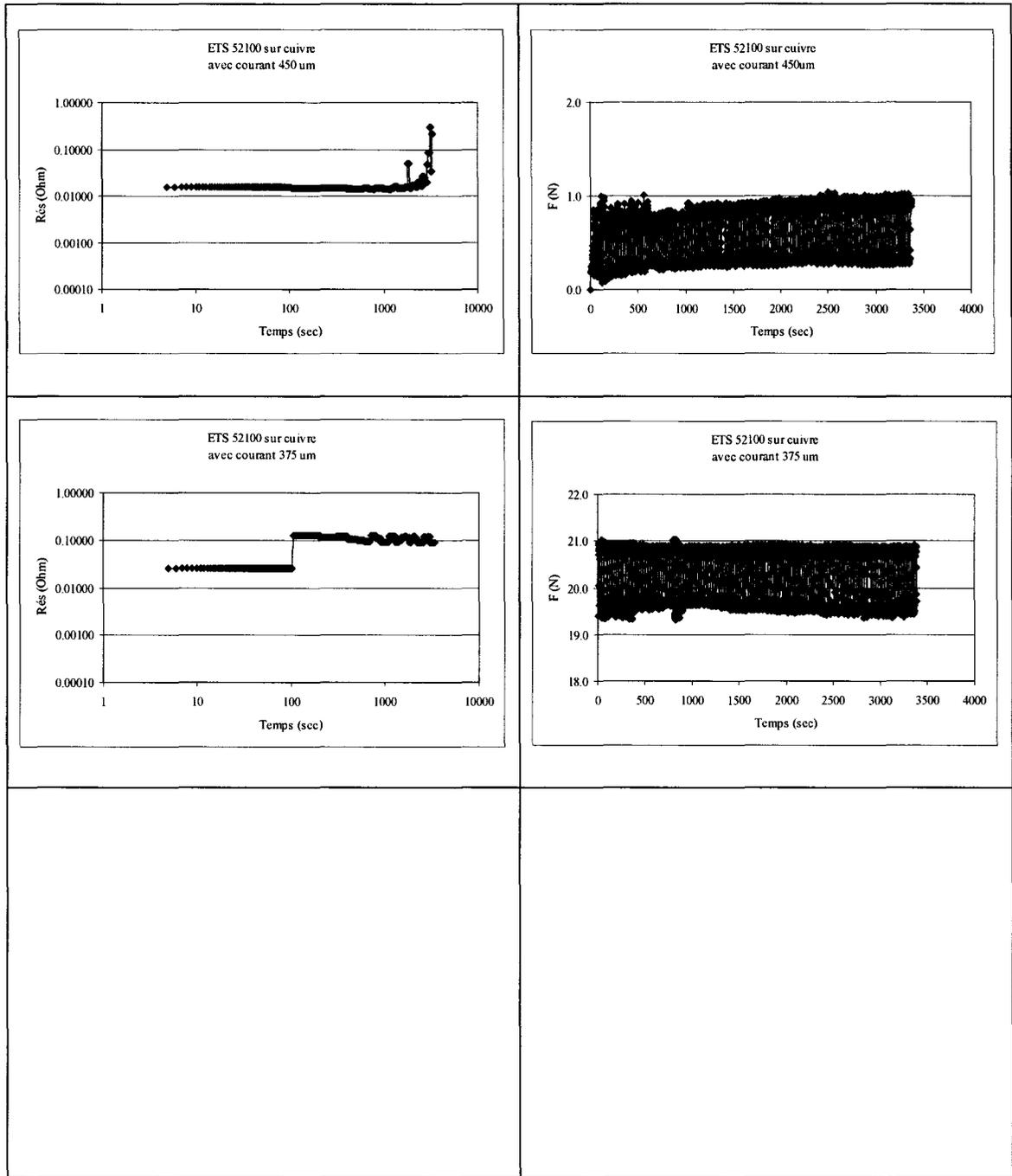
Graphe A2.2 Cuivre sur cuivre avec courant, 40, 100 et 325 μm



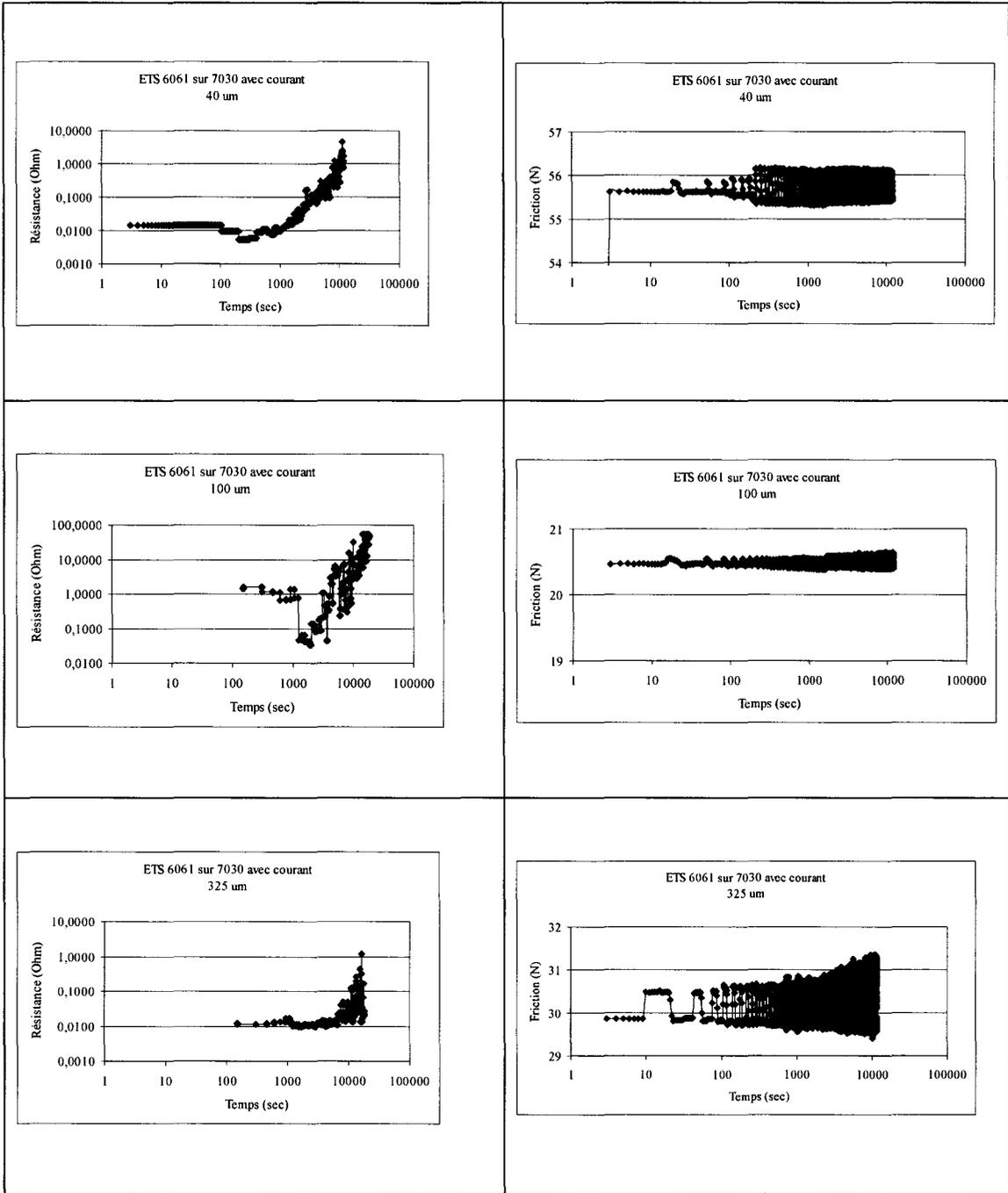
Grappe A2. 3 Cuivre sur cuivre avec courant, 450 et 375 μm



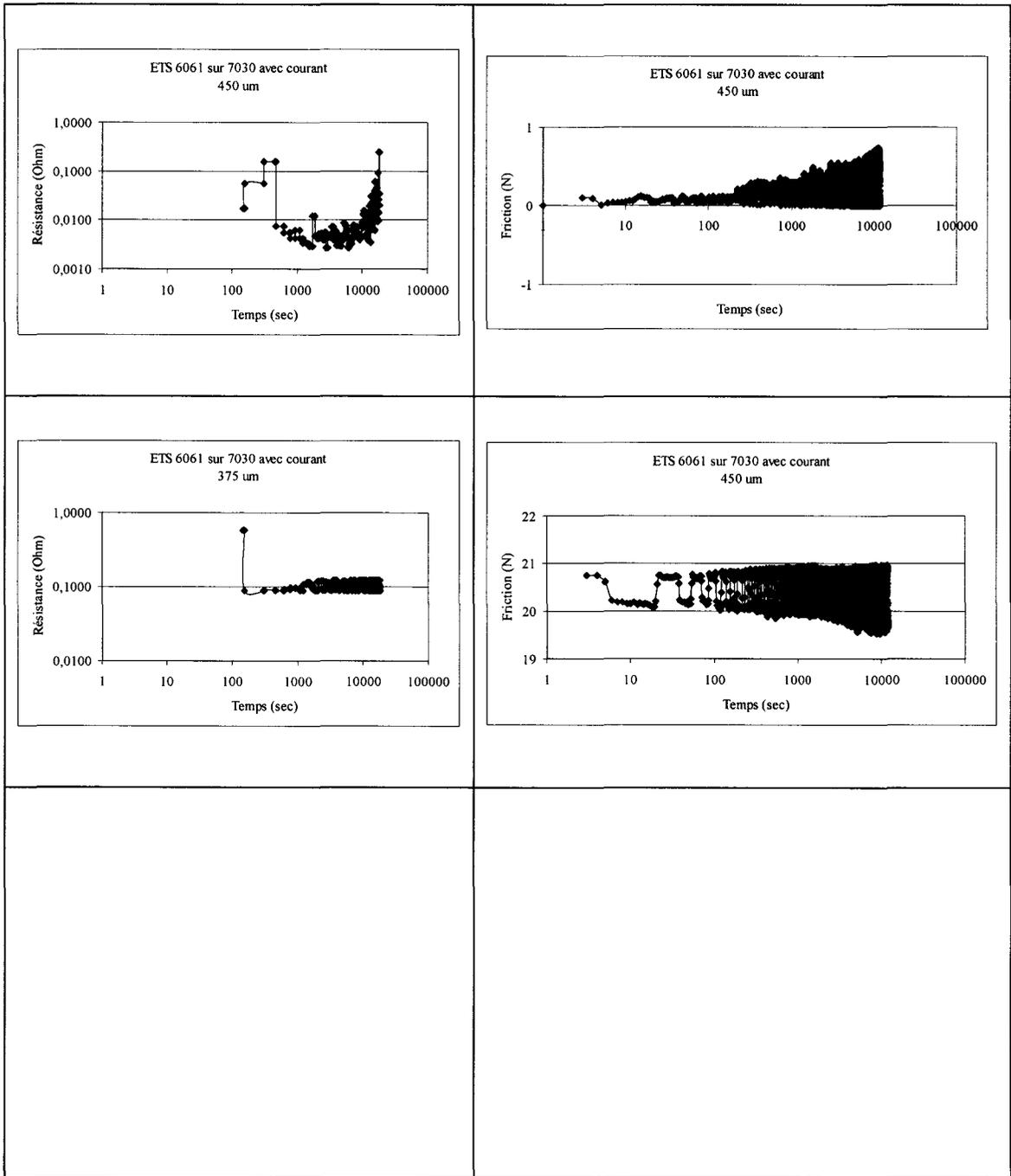
Graphe A2. 4 52100 sur cuivre avec courant, 40, 100 et 325 μm



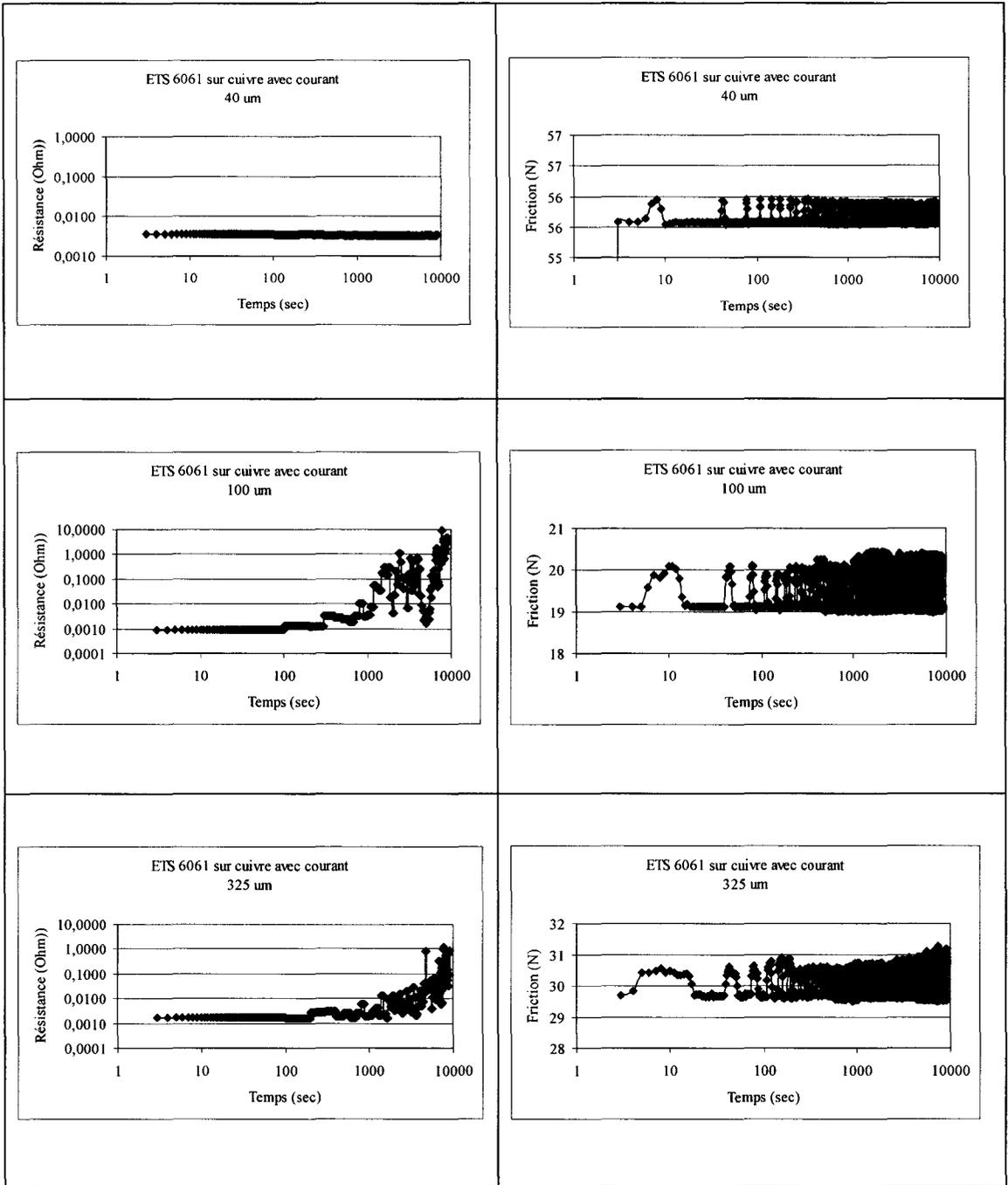
Grphe A2. 5 52100 sur cuivre avec courant, 450 et 375 μm



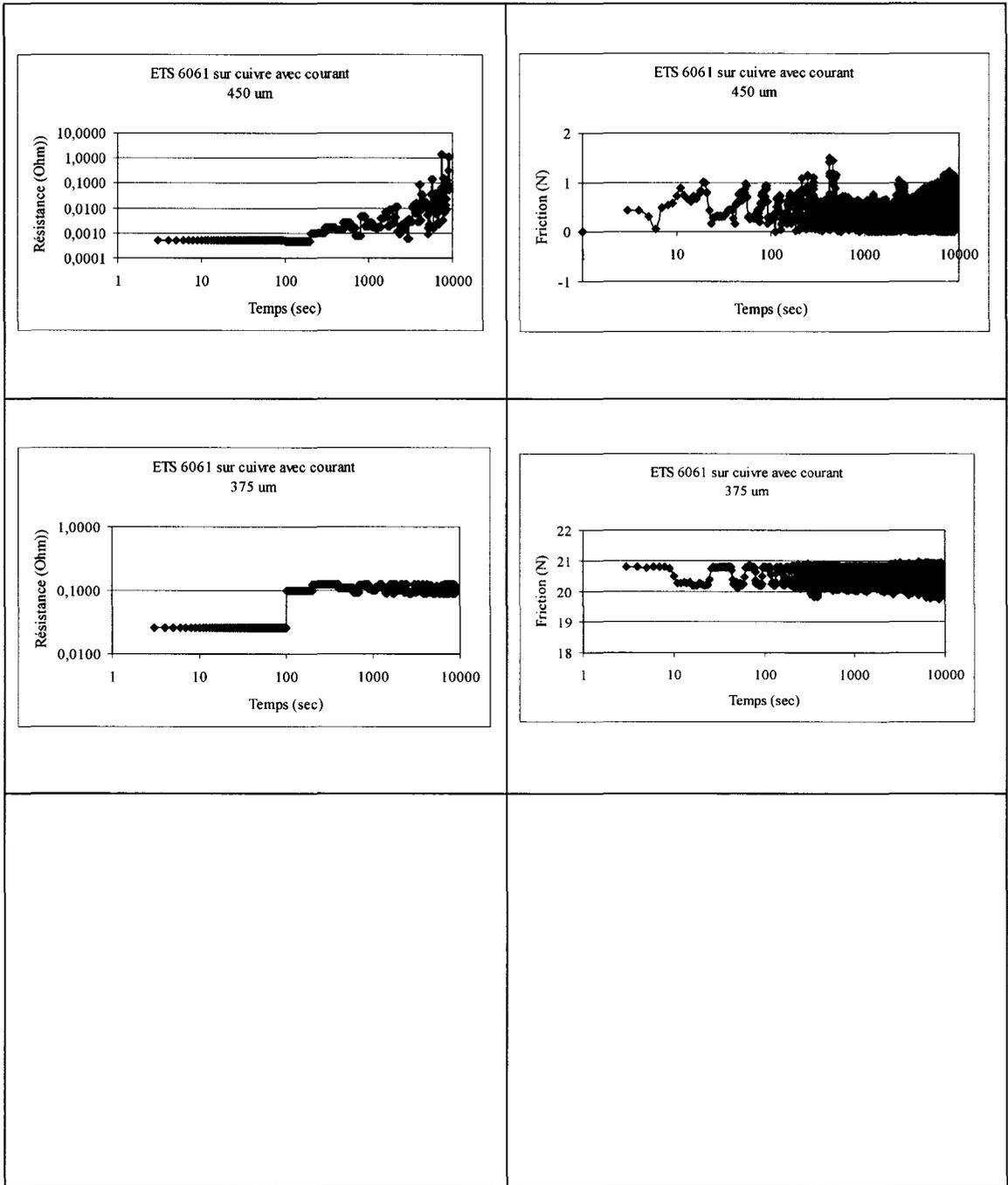
Grphe A2. 6 Avec courant 6061 sur 7030, 40, 100 et 325 μm



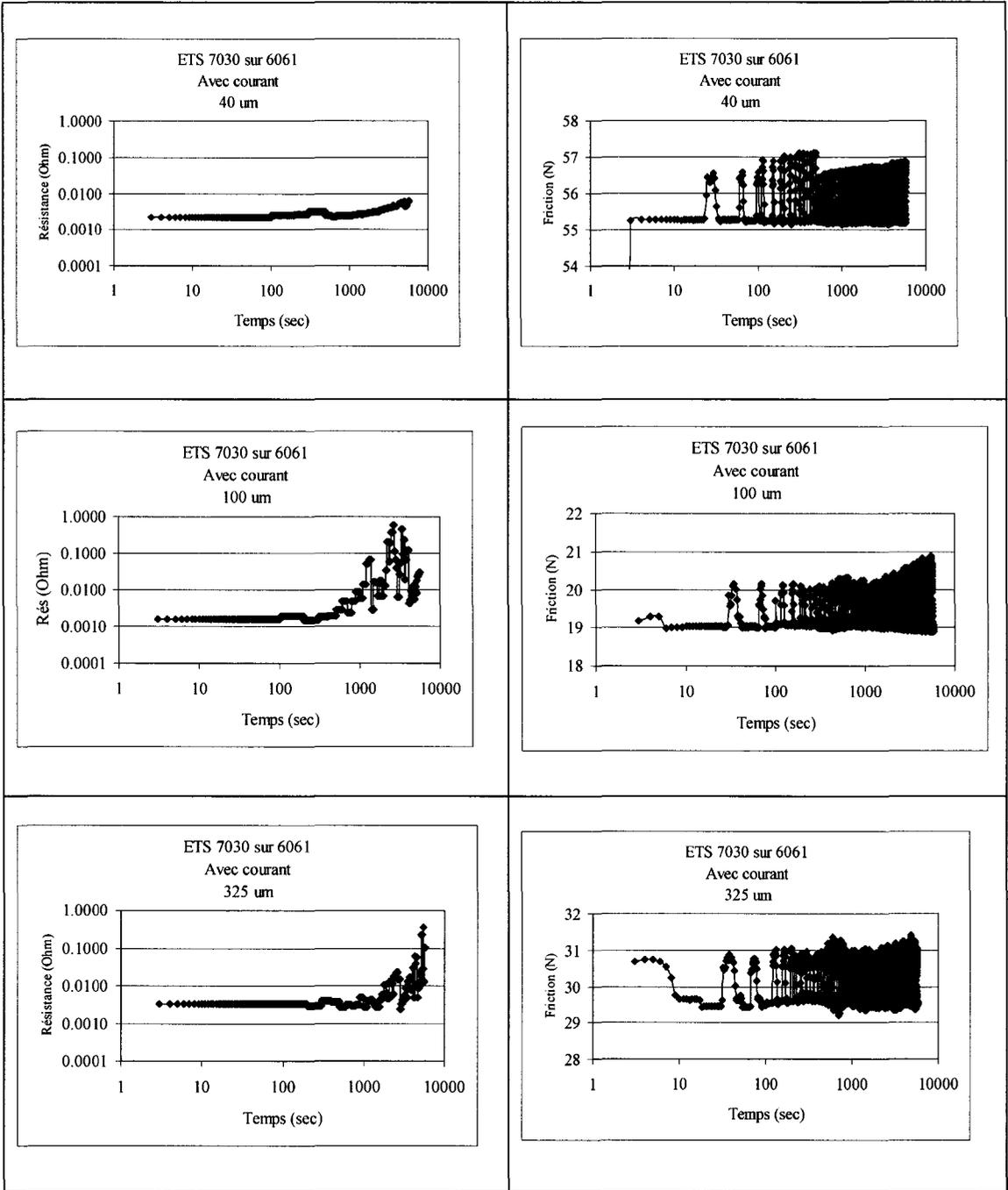
Grphe A2. 7 Avec courant 6061 sur 7030, 450 et 375 μm



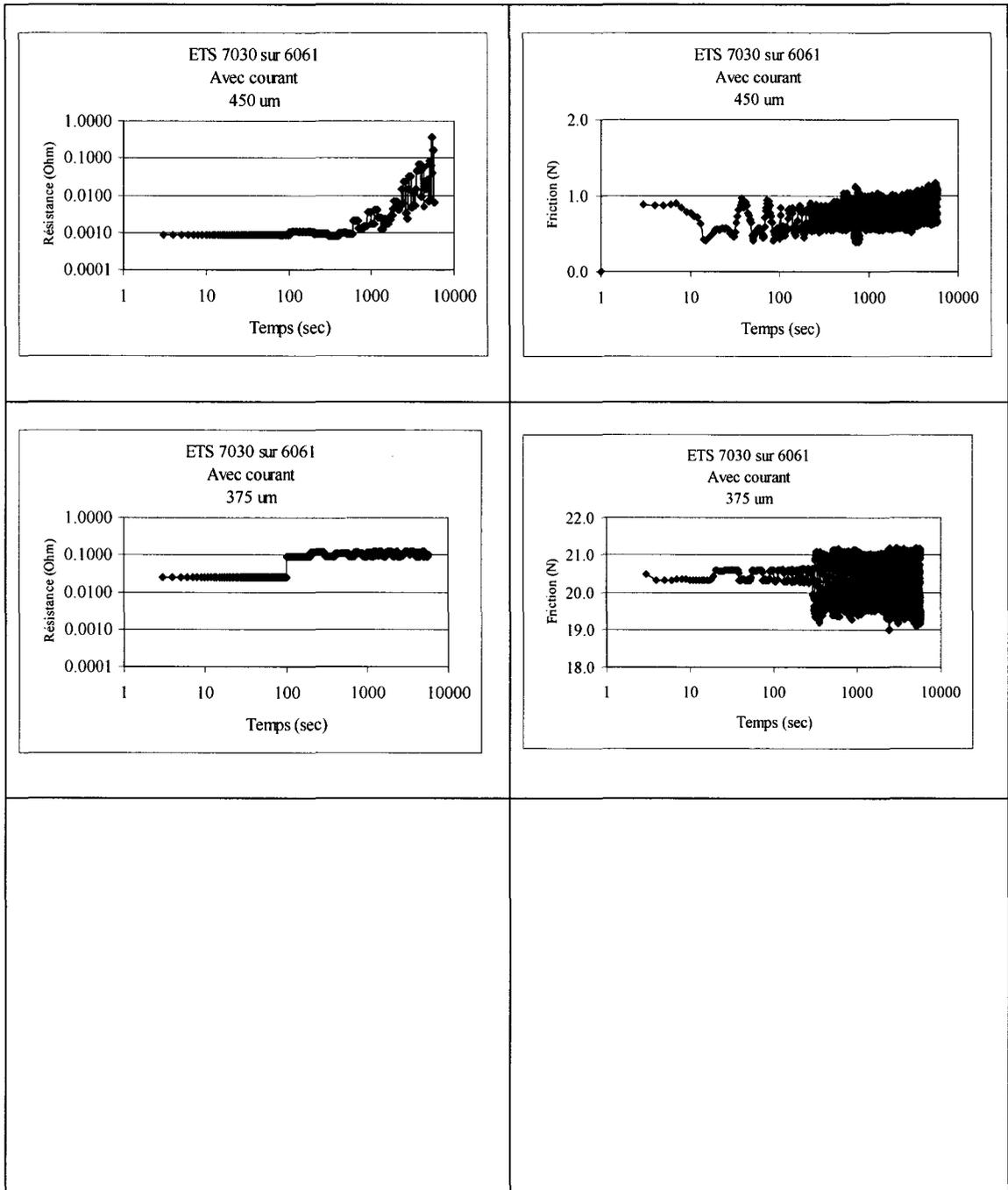
Grphe A2. 8 Avec courant 6061 sur cuivre, 40, 100 et 325 μm



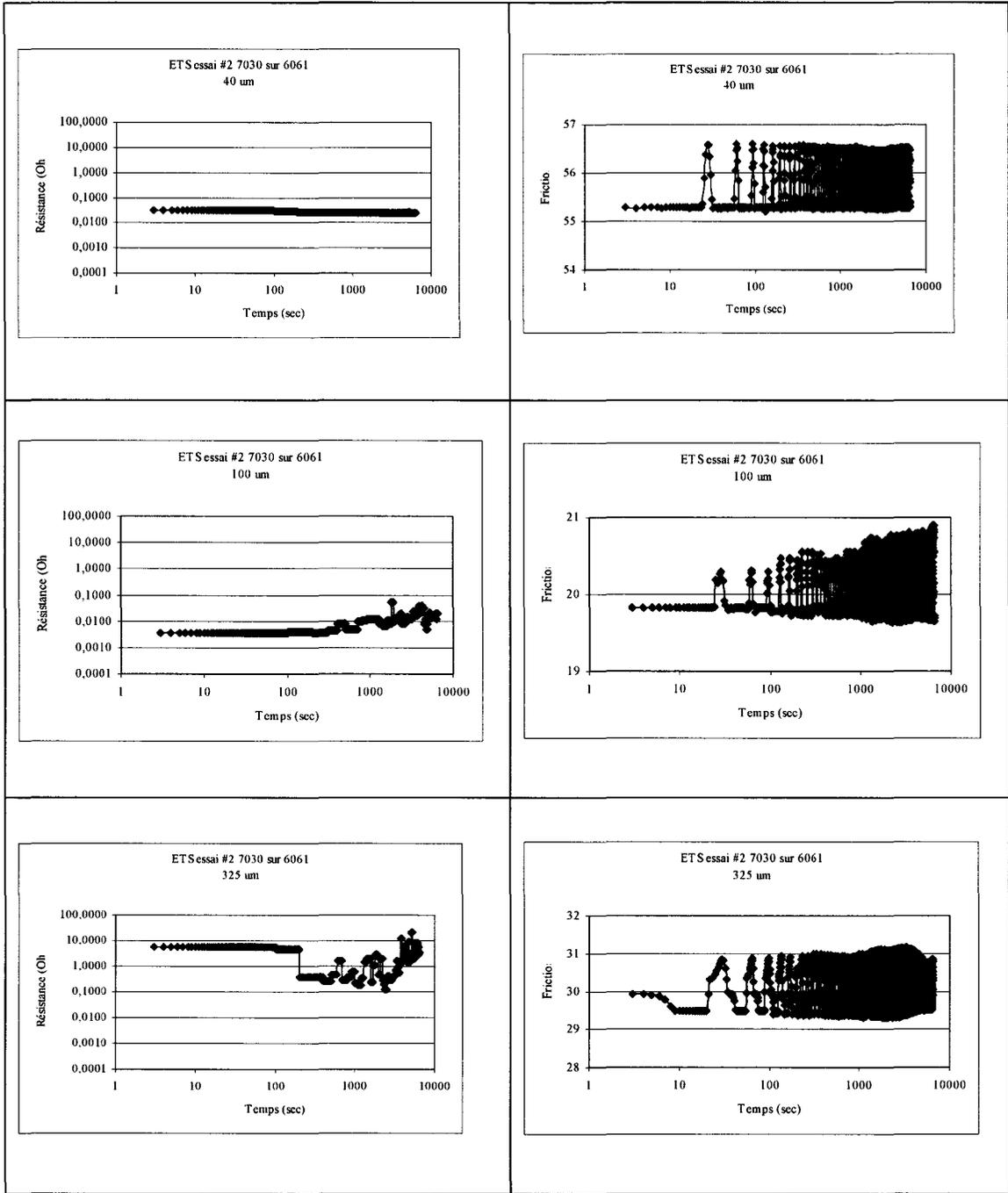
Grphe A2. 9 Avec courant 6061 sur cuivre, 450, 375 μm



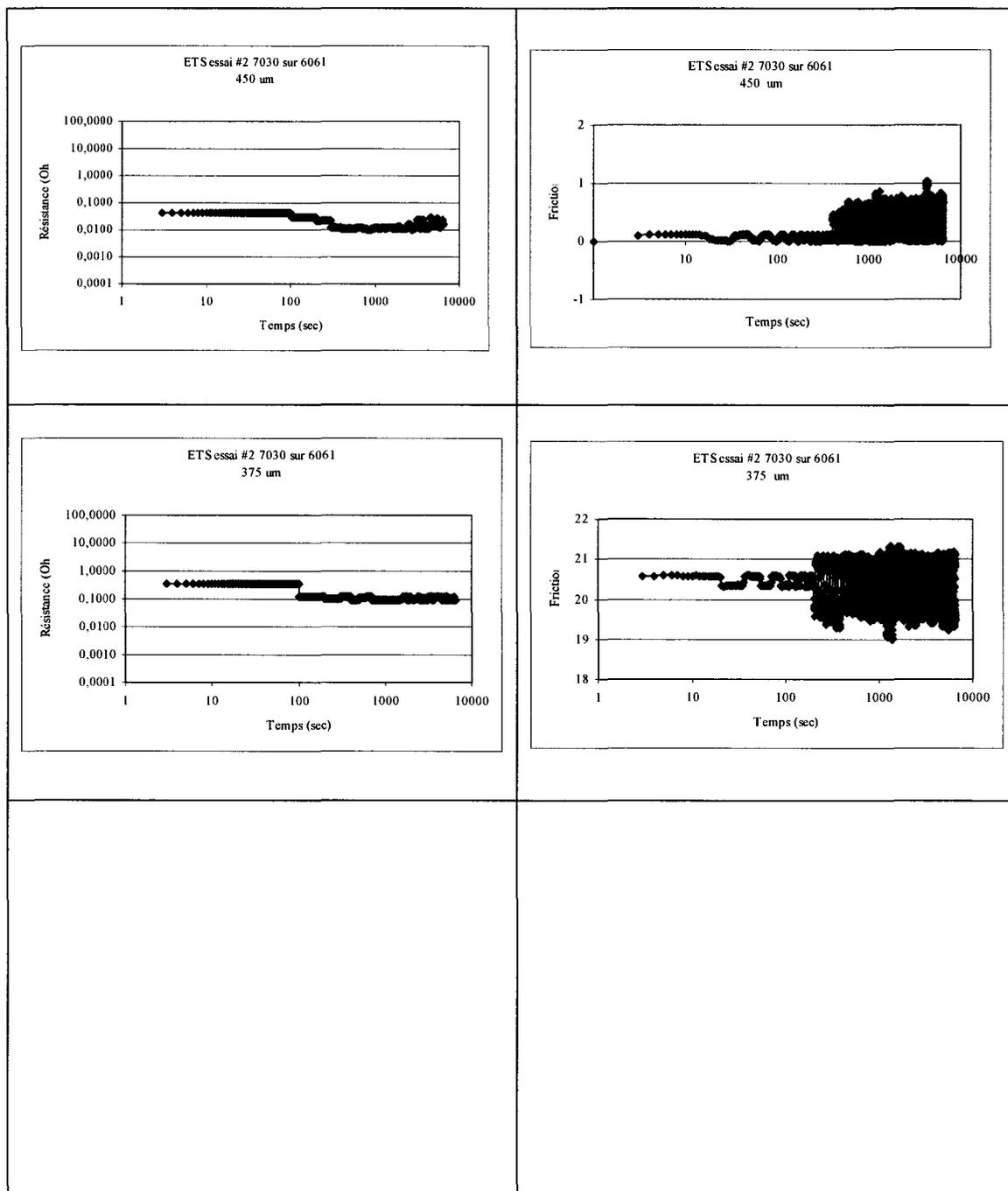
Graphe A2. 10 Avec courant 7030 sur 6061, 40, 100 et 325 μm



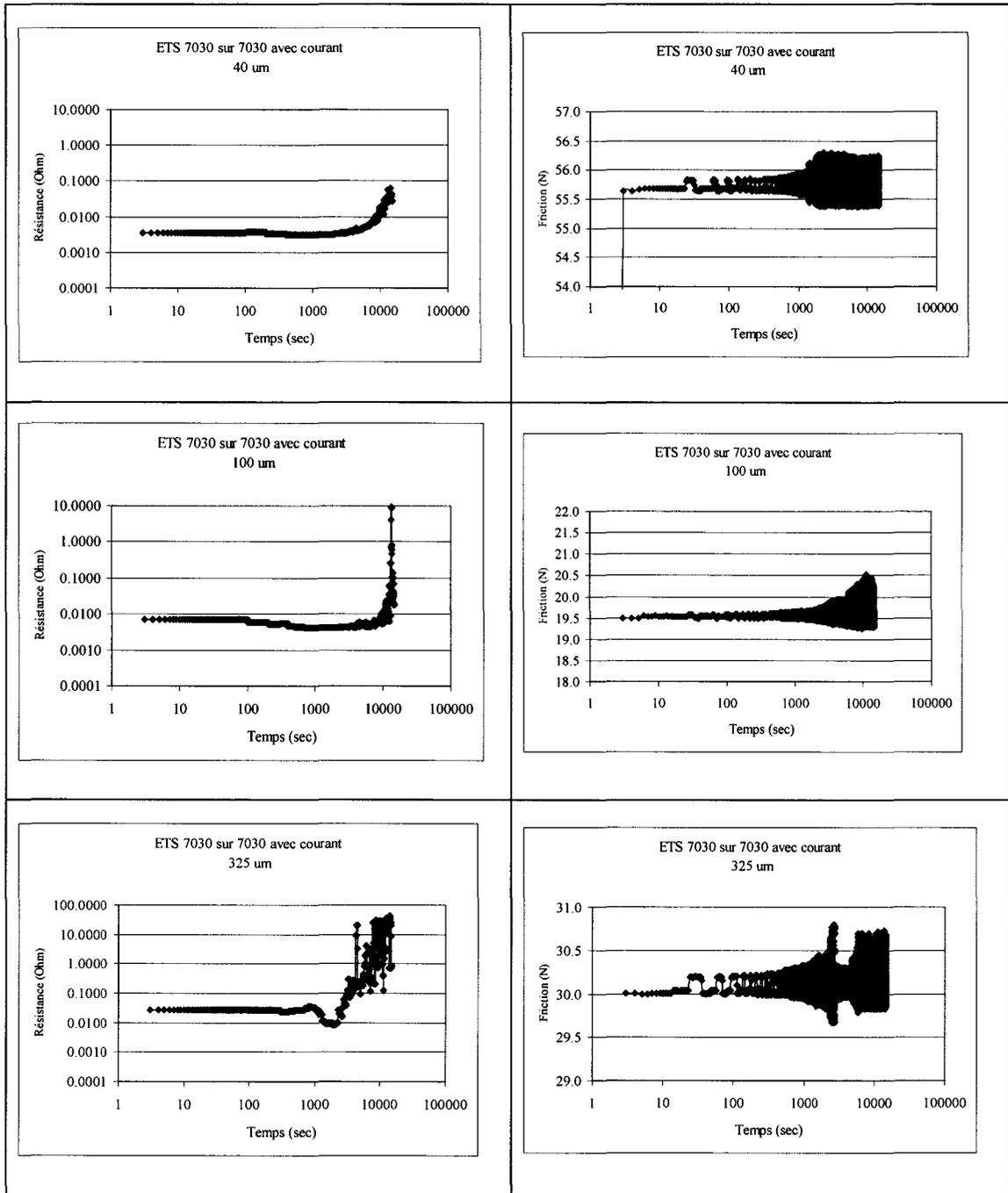
Grphe A2. 11 Avec courant 7030 sur 6061, 450 et 375 μm



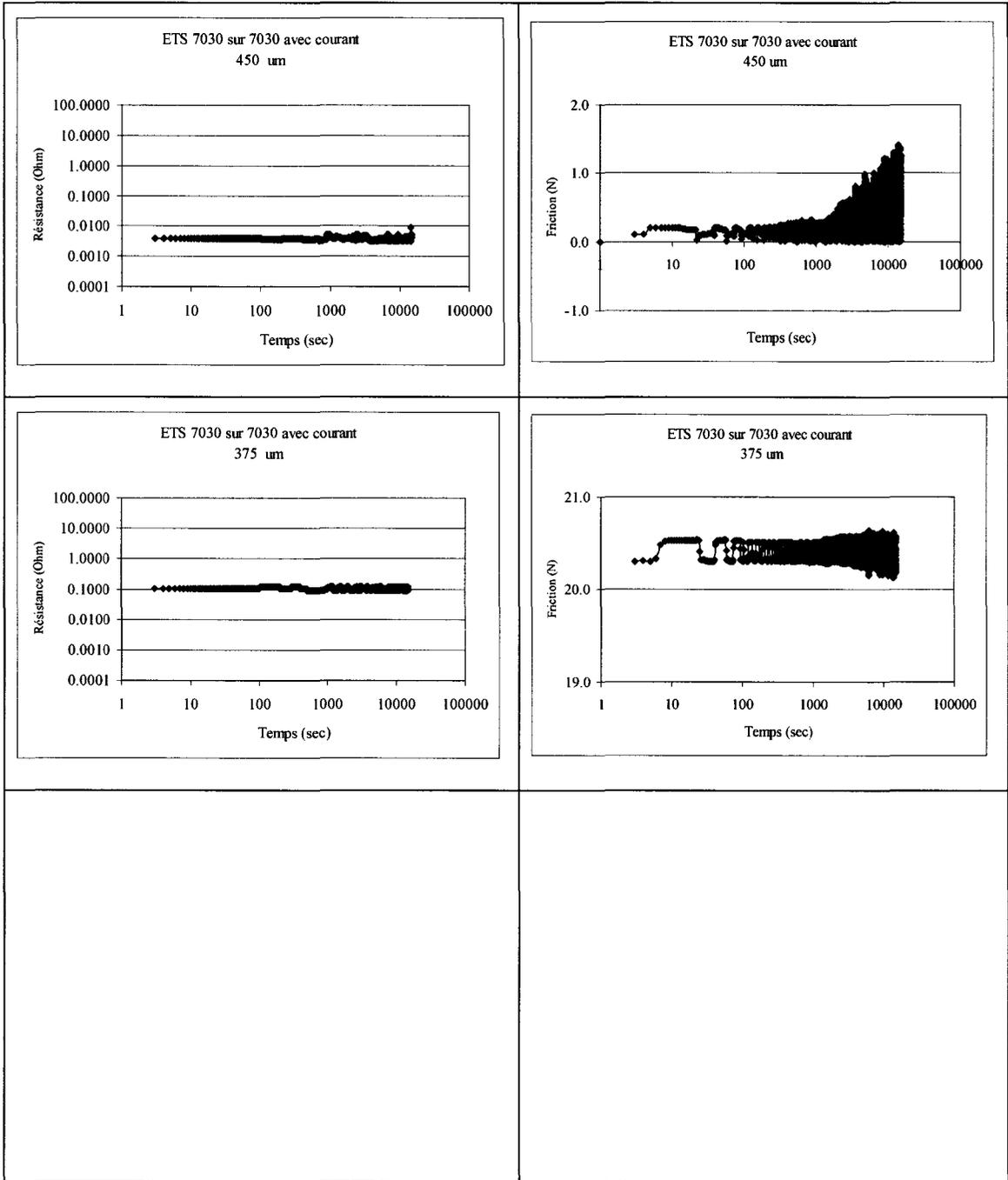
Grappe A2. 12 Avec courant 7030 sur 6061 série #2, 40, 100 et 325 μm



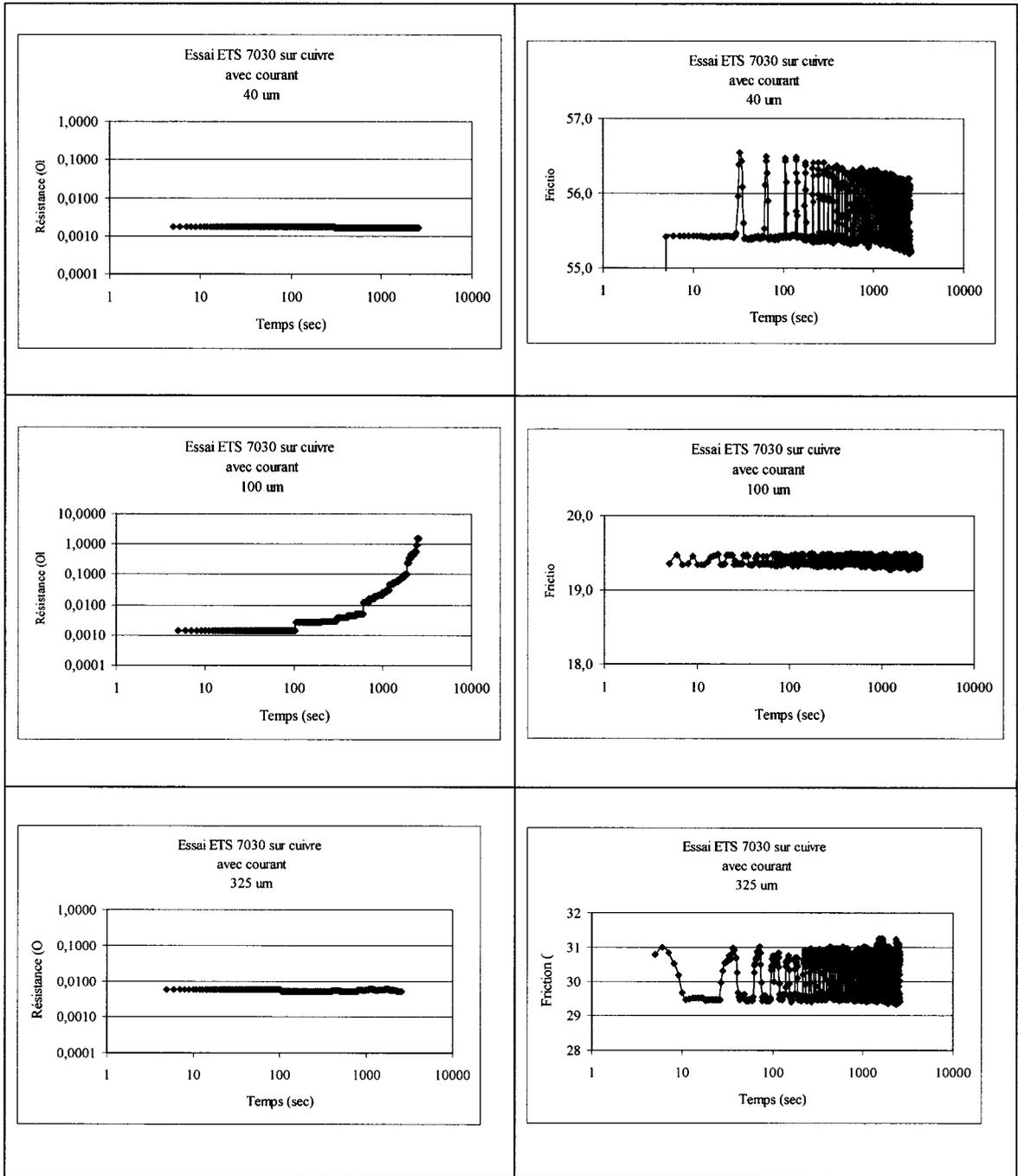
Graphe A2. 13 Avec courant 7030 sur 6061 série #2, 450 et 375 μm



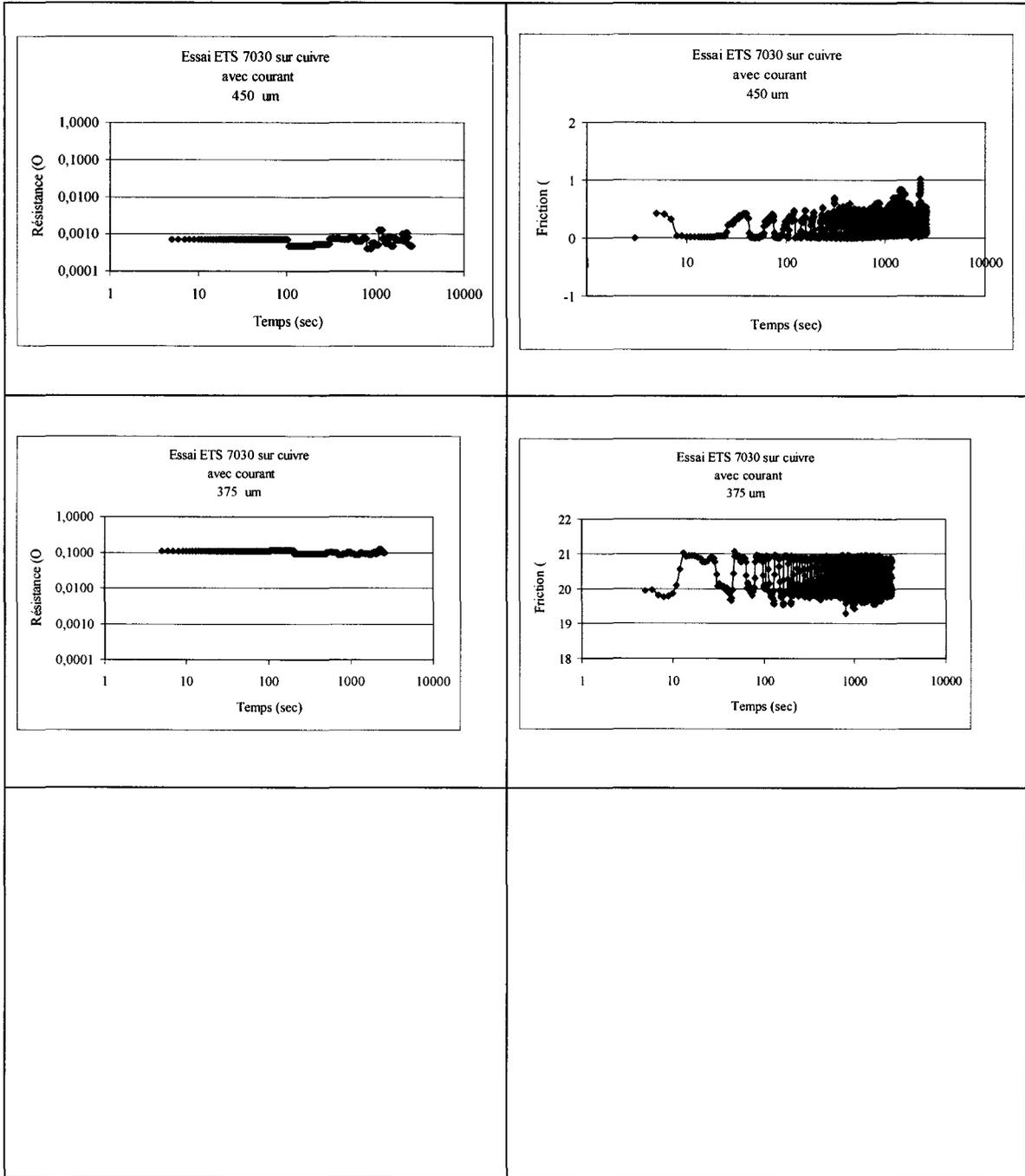
Grappe A2. 14 7030 sur 7030 avec courant, 40, 100 et 325 μm



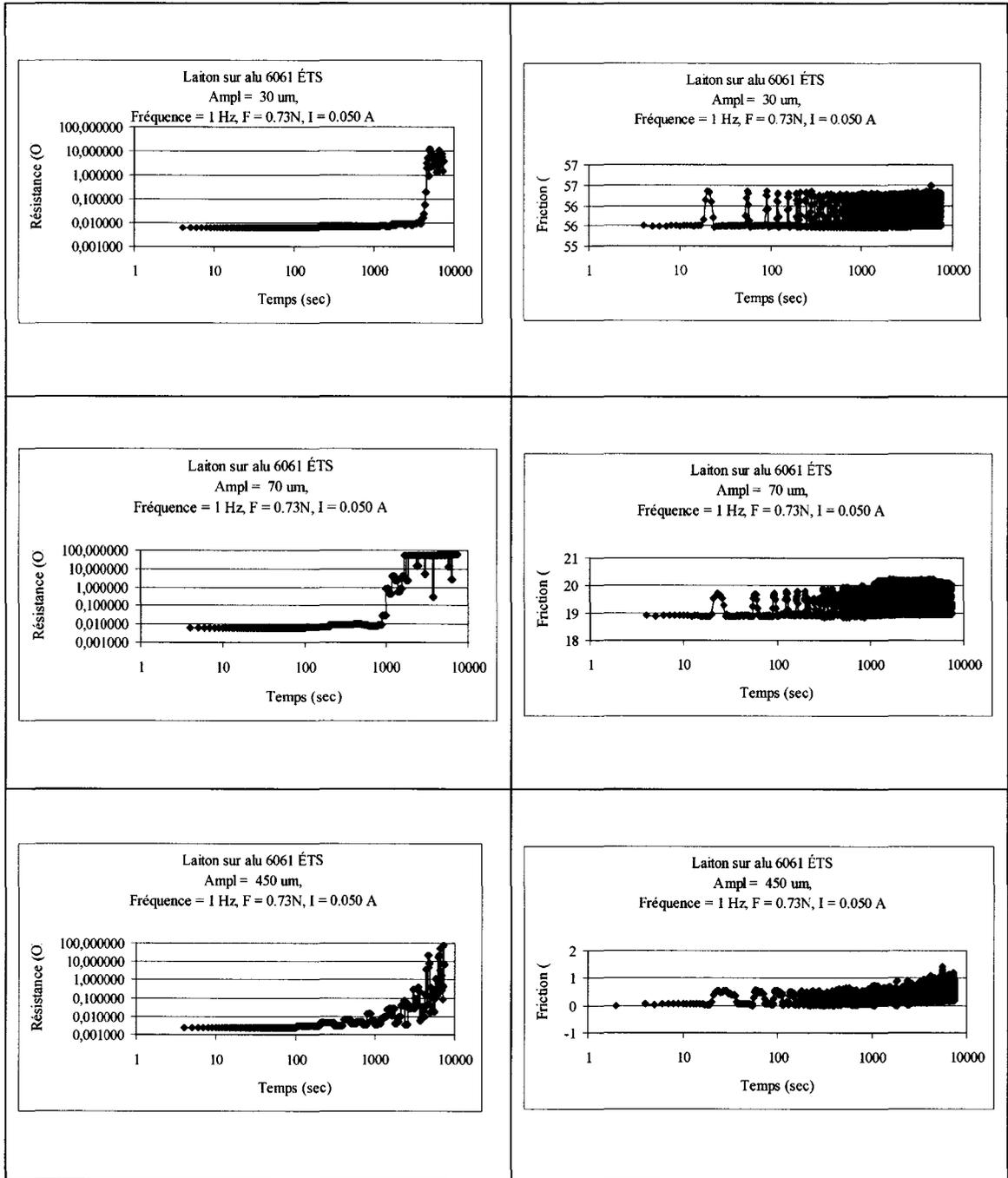
Grphe A2. 15 7030 sur 7030 avec courant, 450 et 375 μm



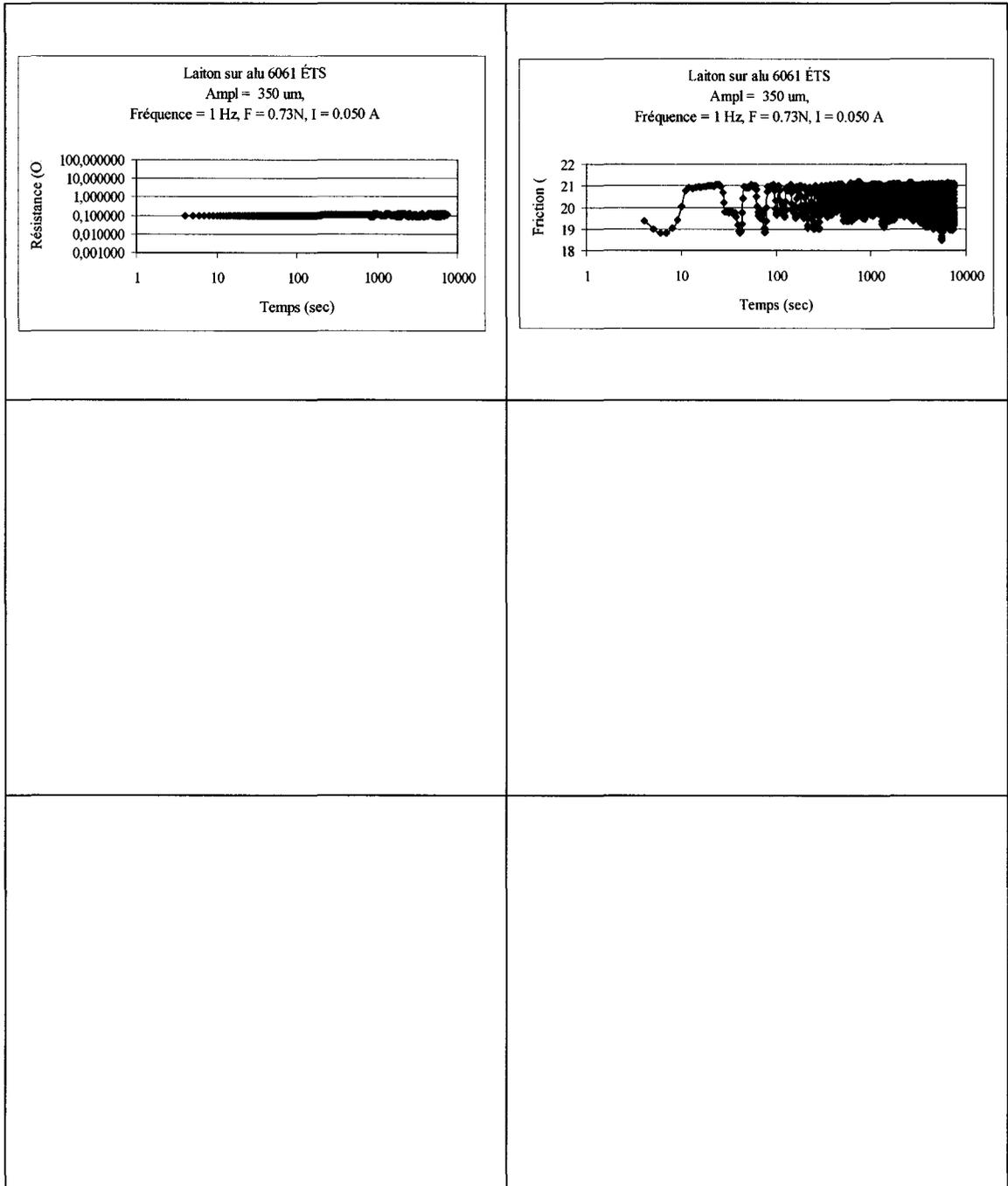
Graphe A2. 16 Avec courant 7030 sur cuivre, 40, 100 et 325 μm

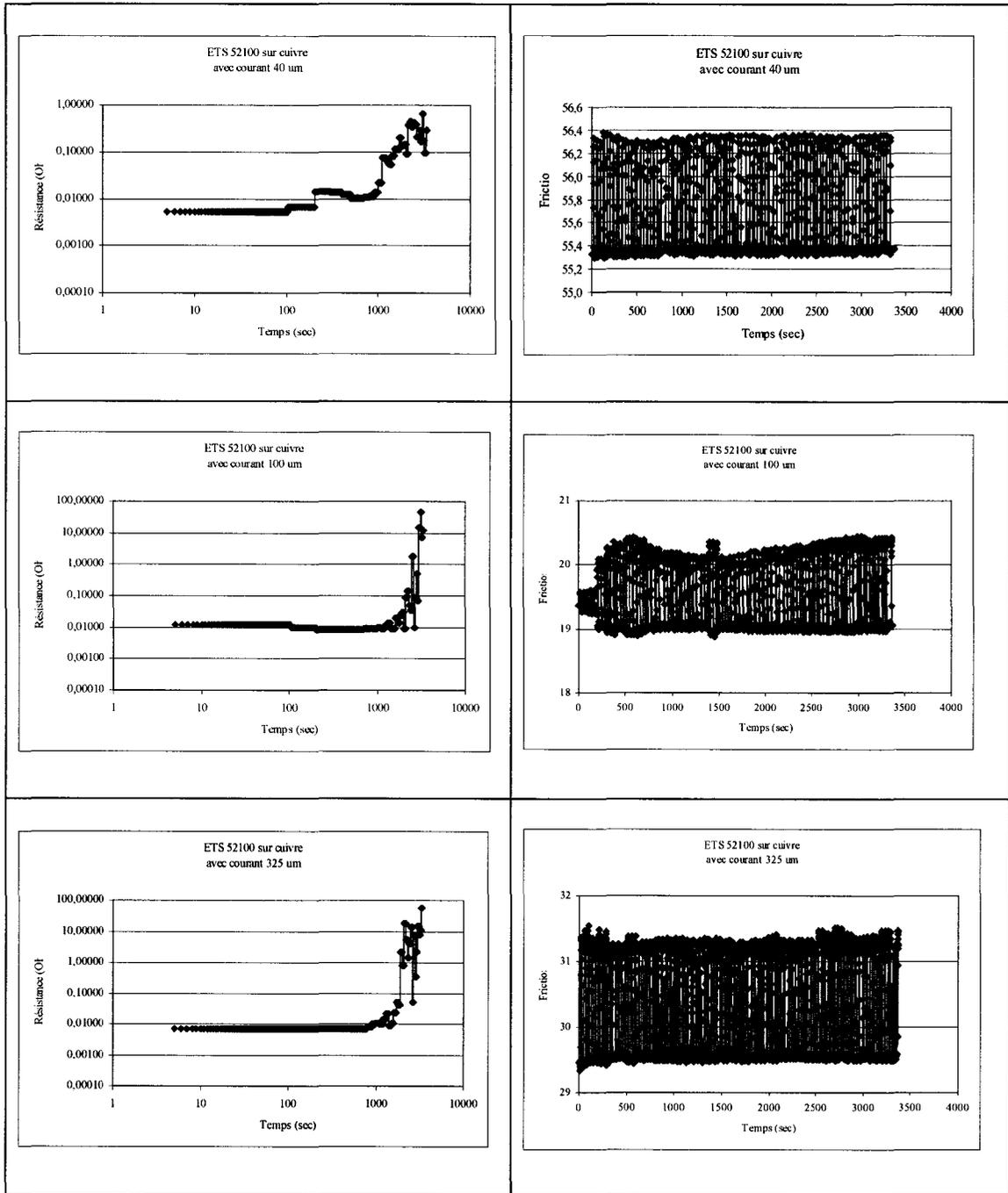


Graphe A2. 17 Avec courant 7030 sur cuivre, 450 et 375 μm

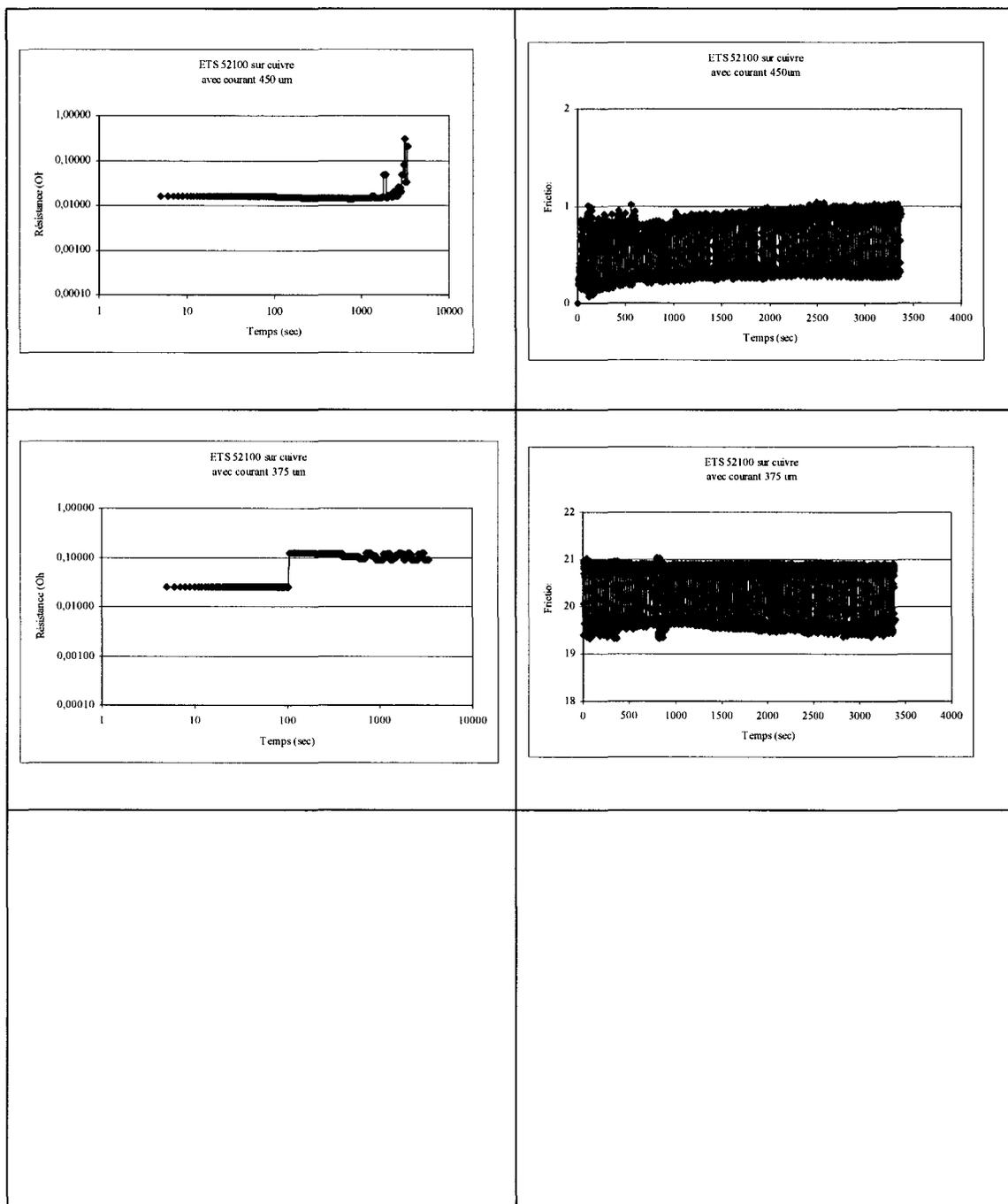


Graphe A2. 18 Avec courant laiton sur 6061, 30, 70 et 450 μm

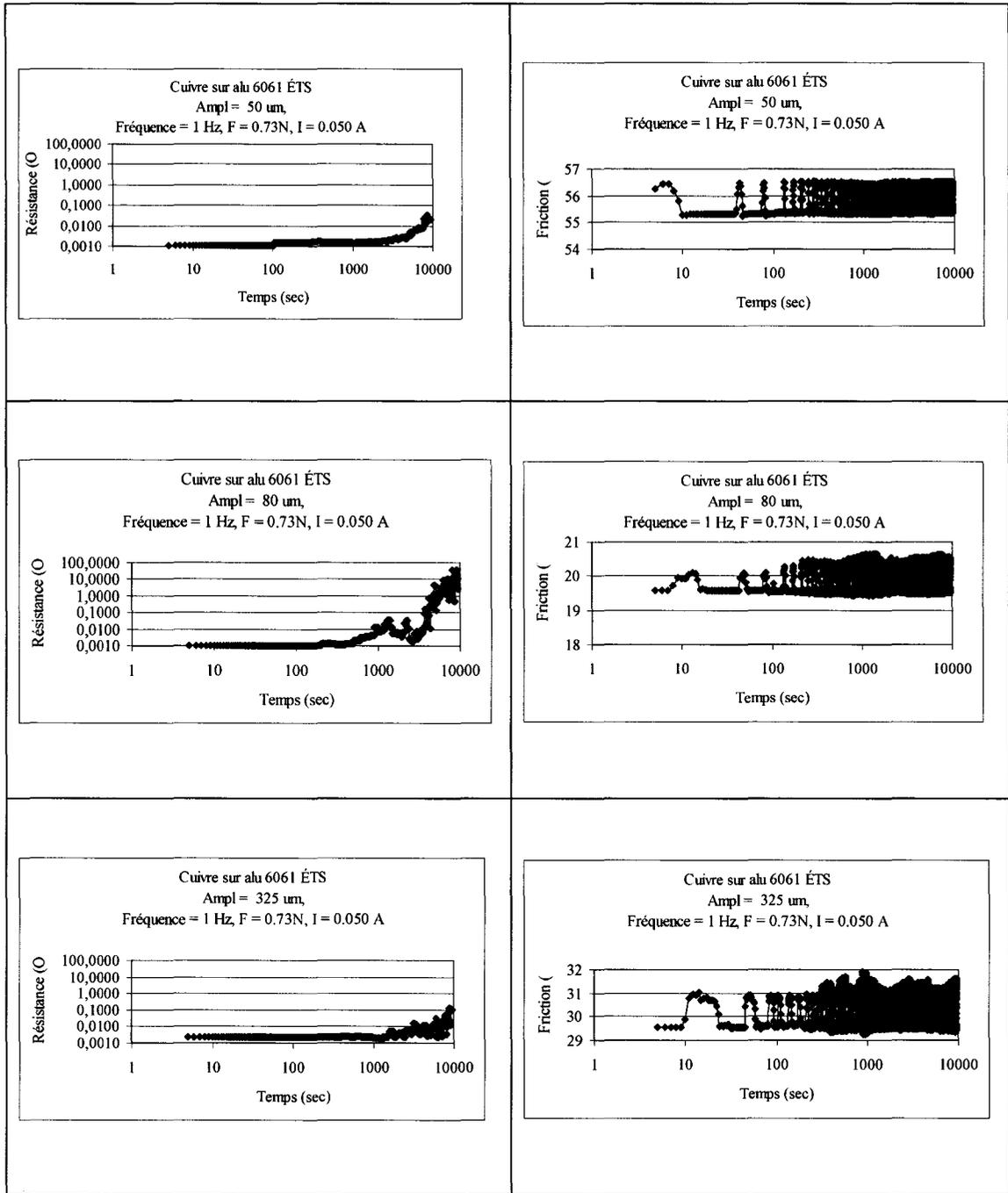
Graphe A2. 19 Avec courant laiton sur 6061, 350 μm



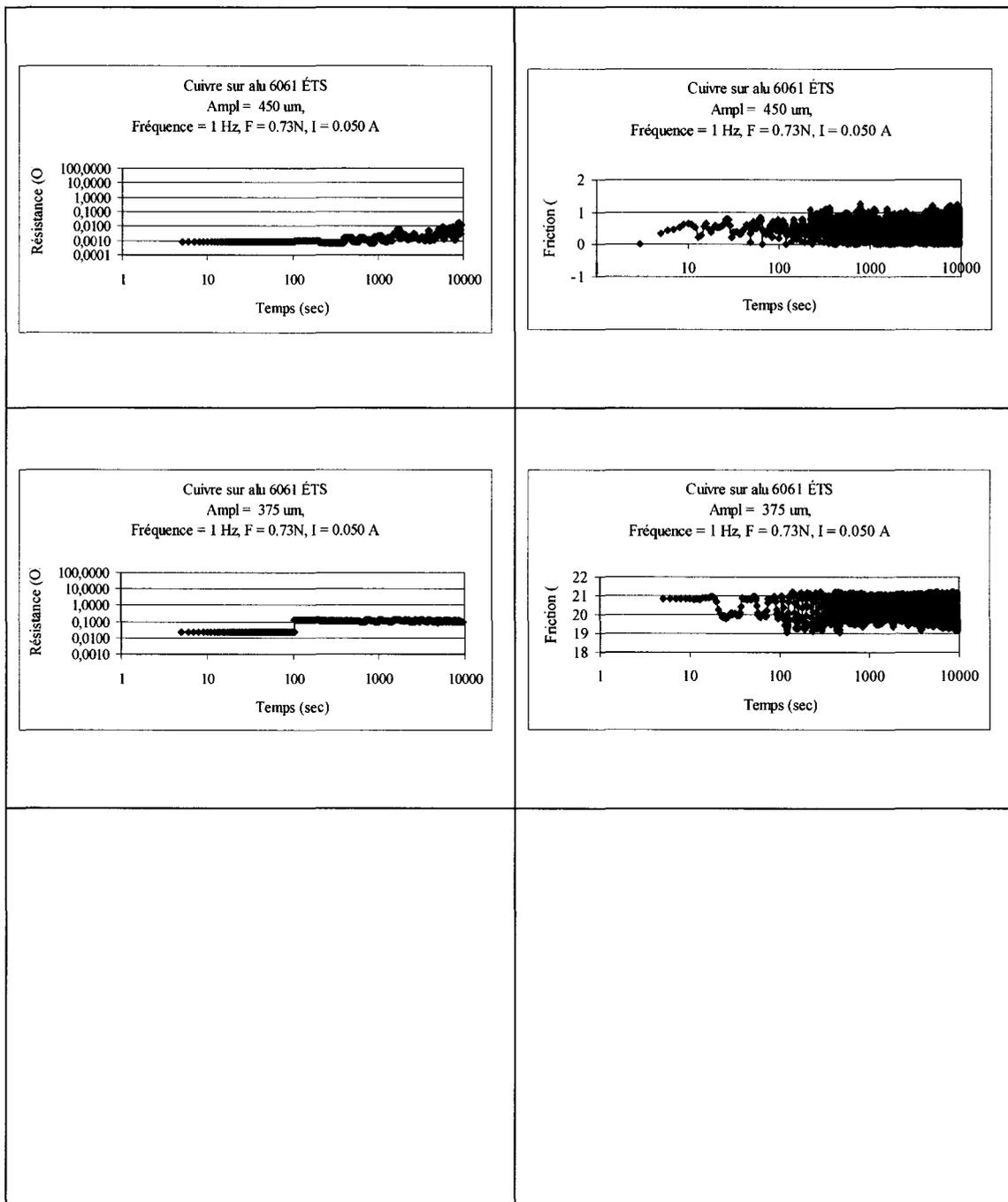
Grphe A2. 20 Avec courant 52100 sur cuivre, 40, 100 et 325 μm



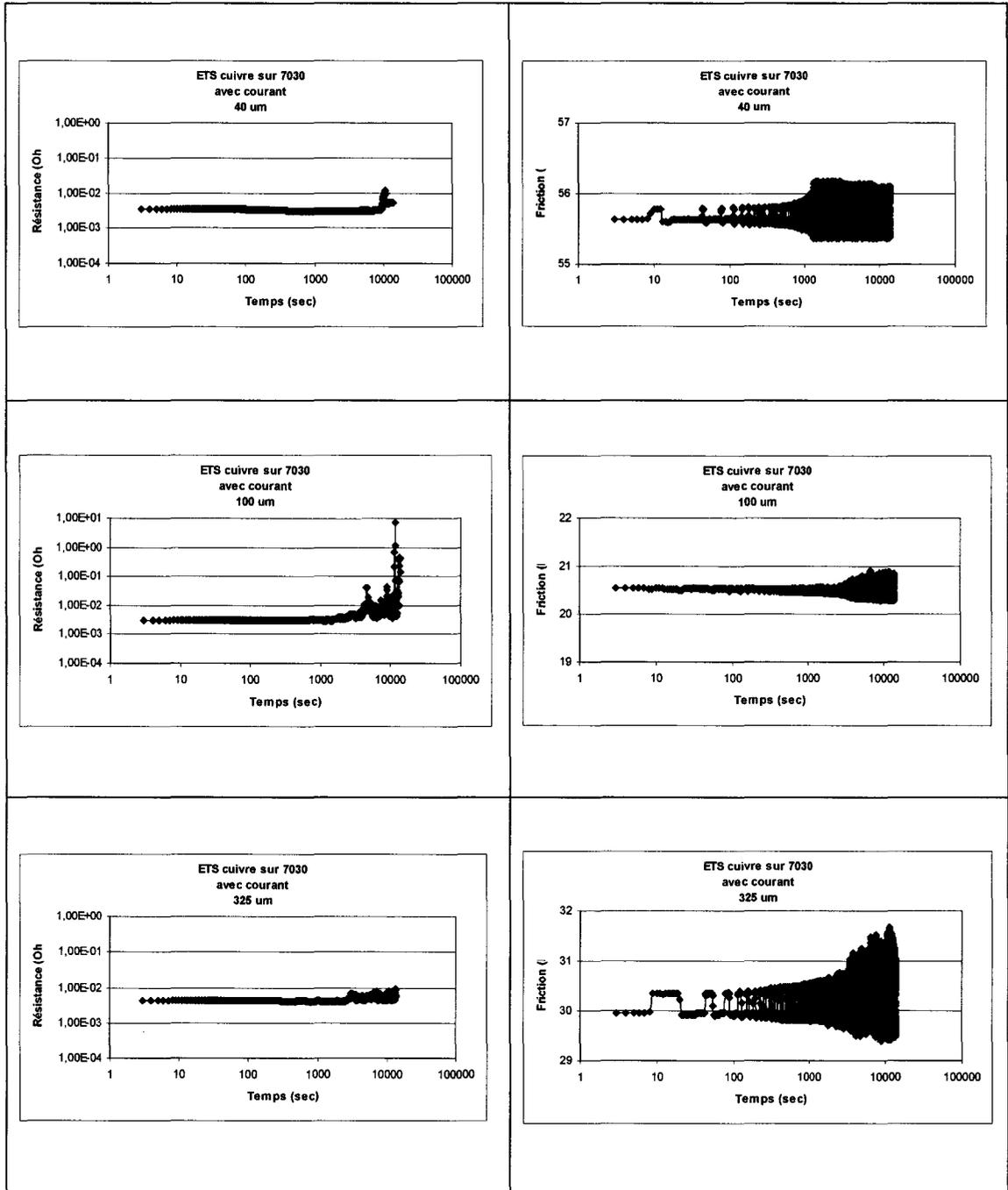
Grphe A2. 21 Avec courant 52100 sur cuivre, 450 et 375 μm



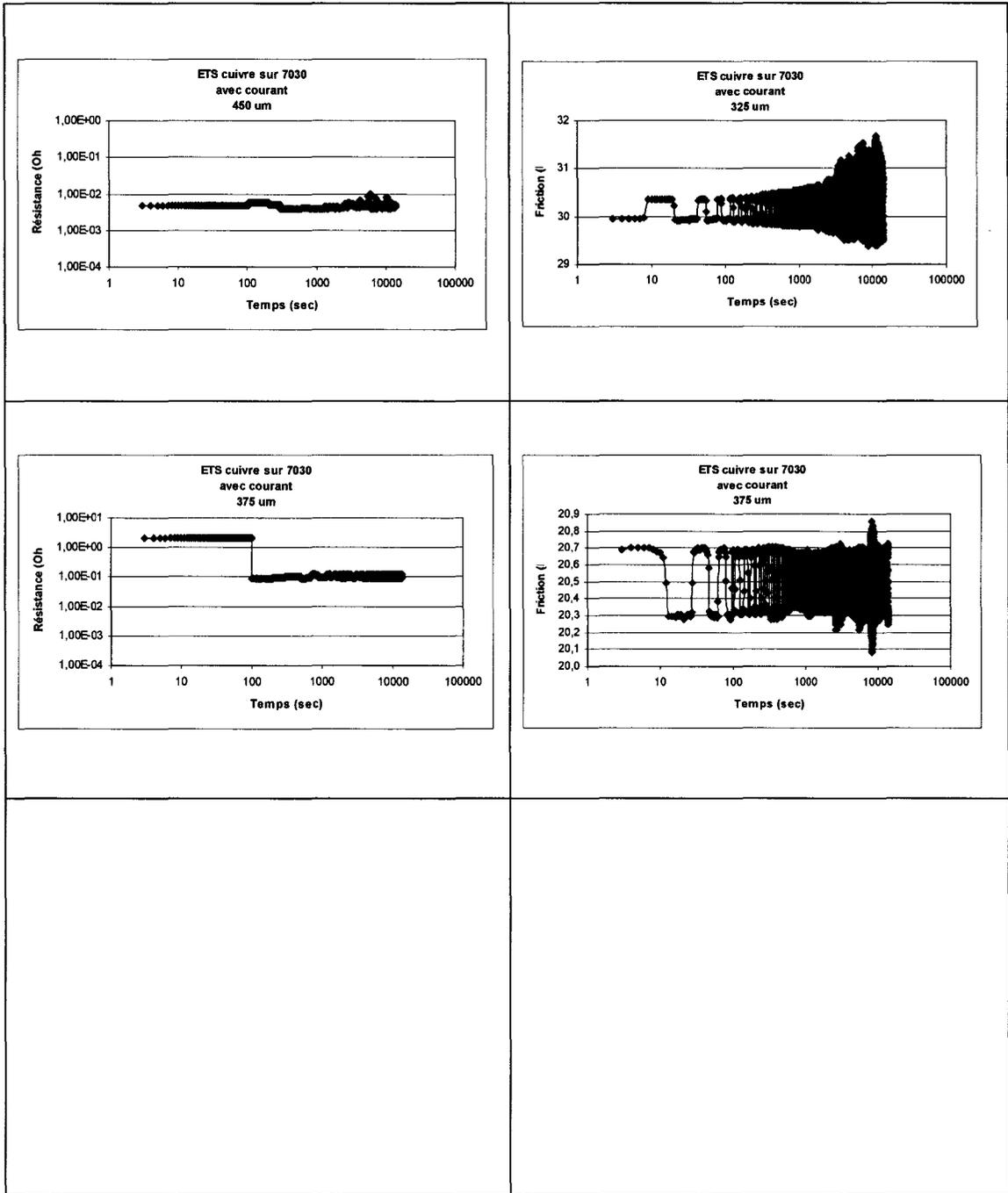
Grphe A2. 22 Avec courant cuivre sur 6061, 40, 80 et 325 μm



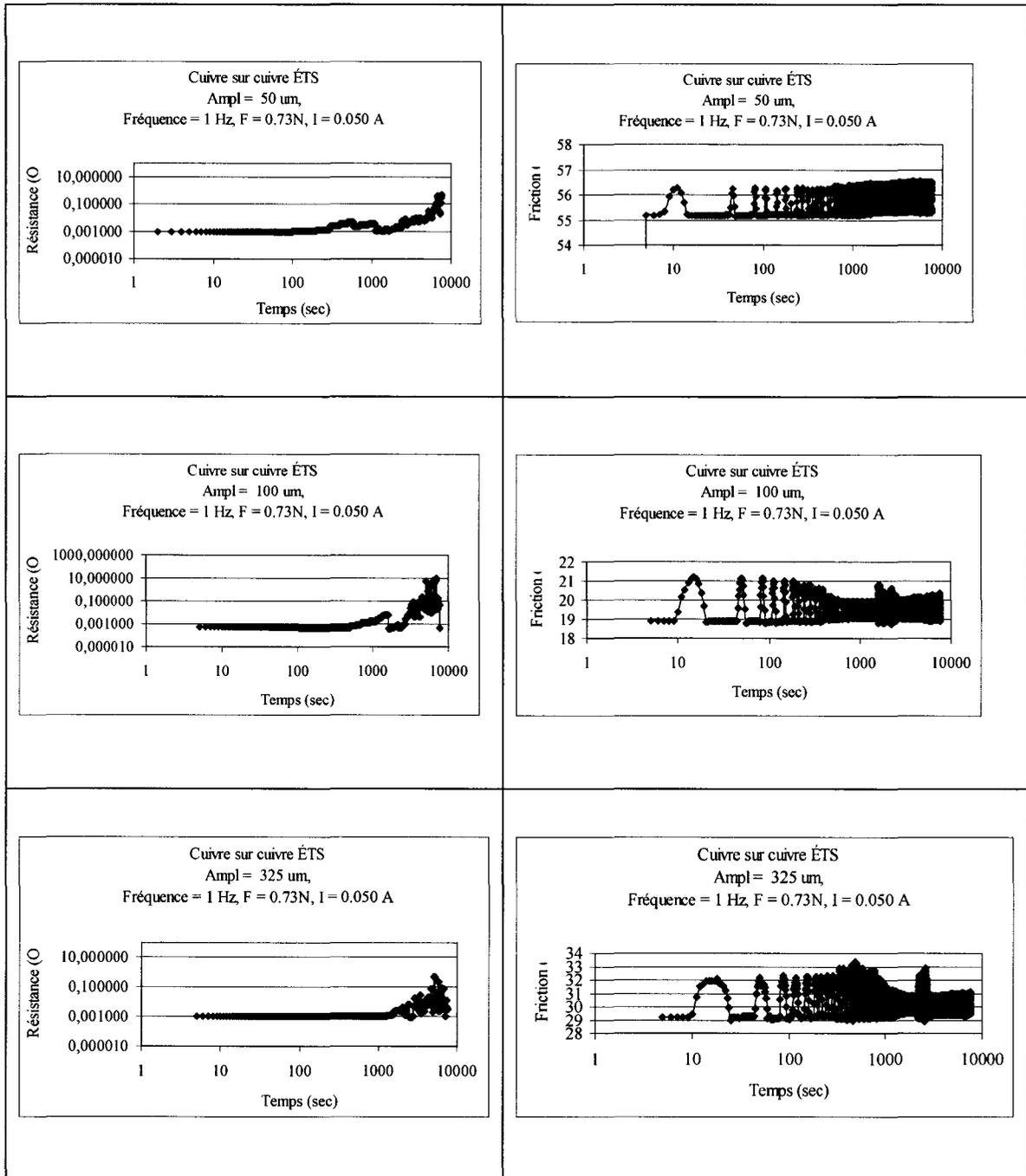
Graphe A2. 23 Avec courant cuivre sur 6061, 450 et 375 μm



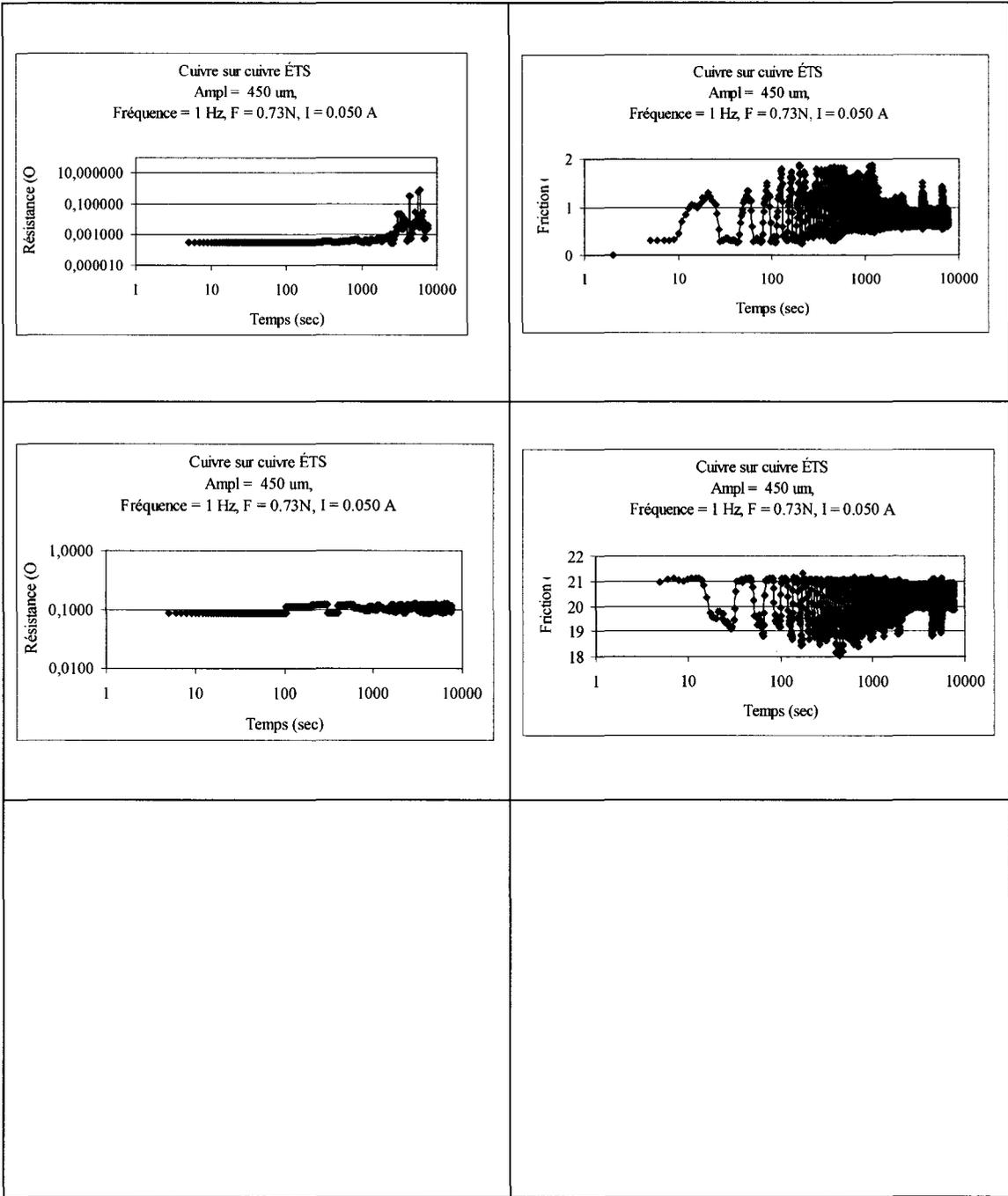
Graphe A2. 24 Avec courant cuivre sur 7030, 40, 100 et 325 μm



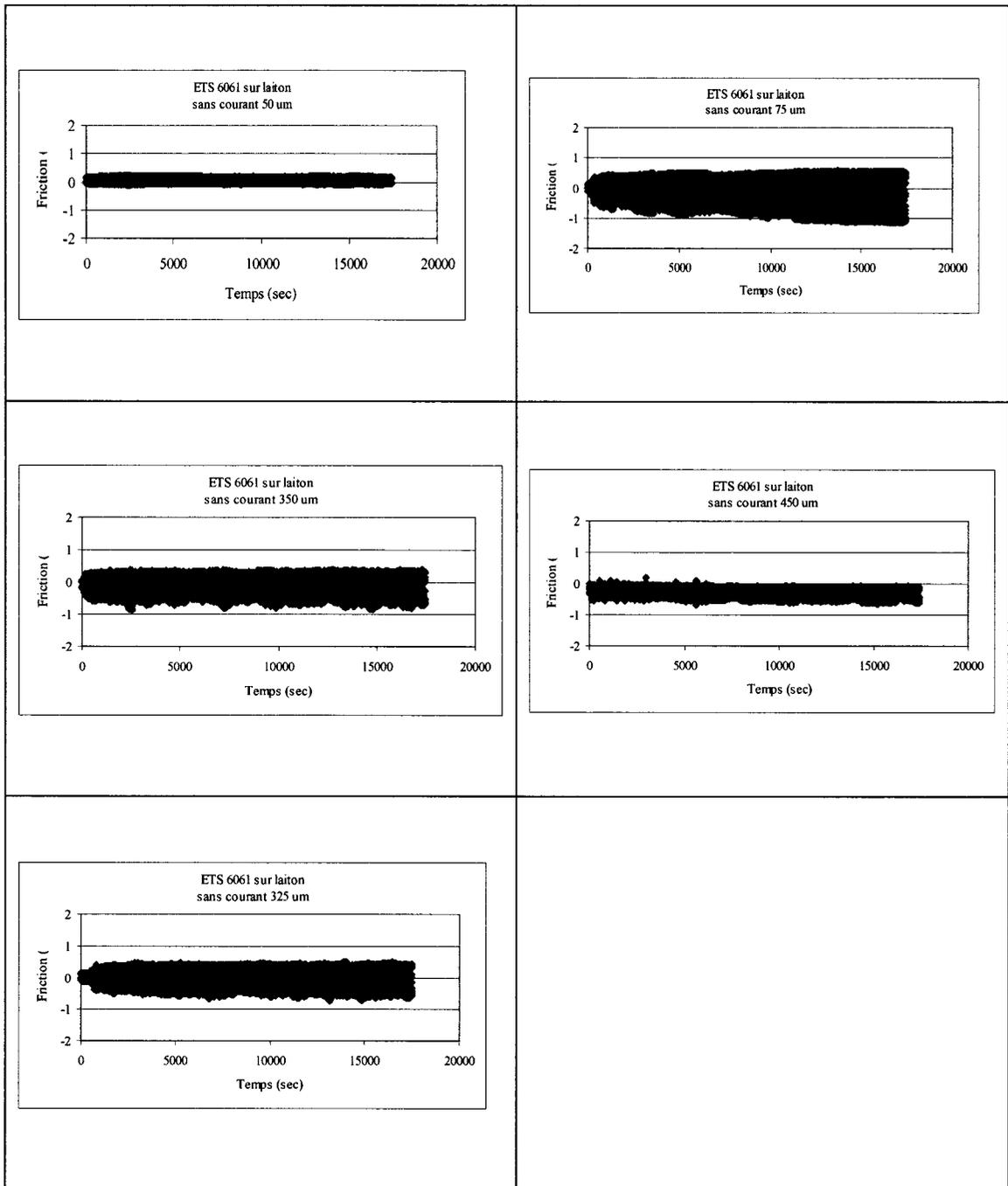
Graphe A2. 25 Avec courant cuivre sur 7030, 450 et 375 μm



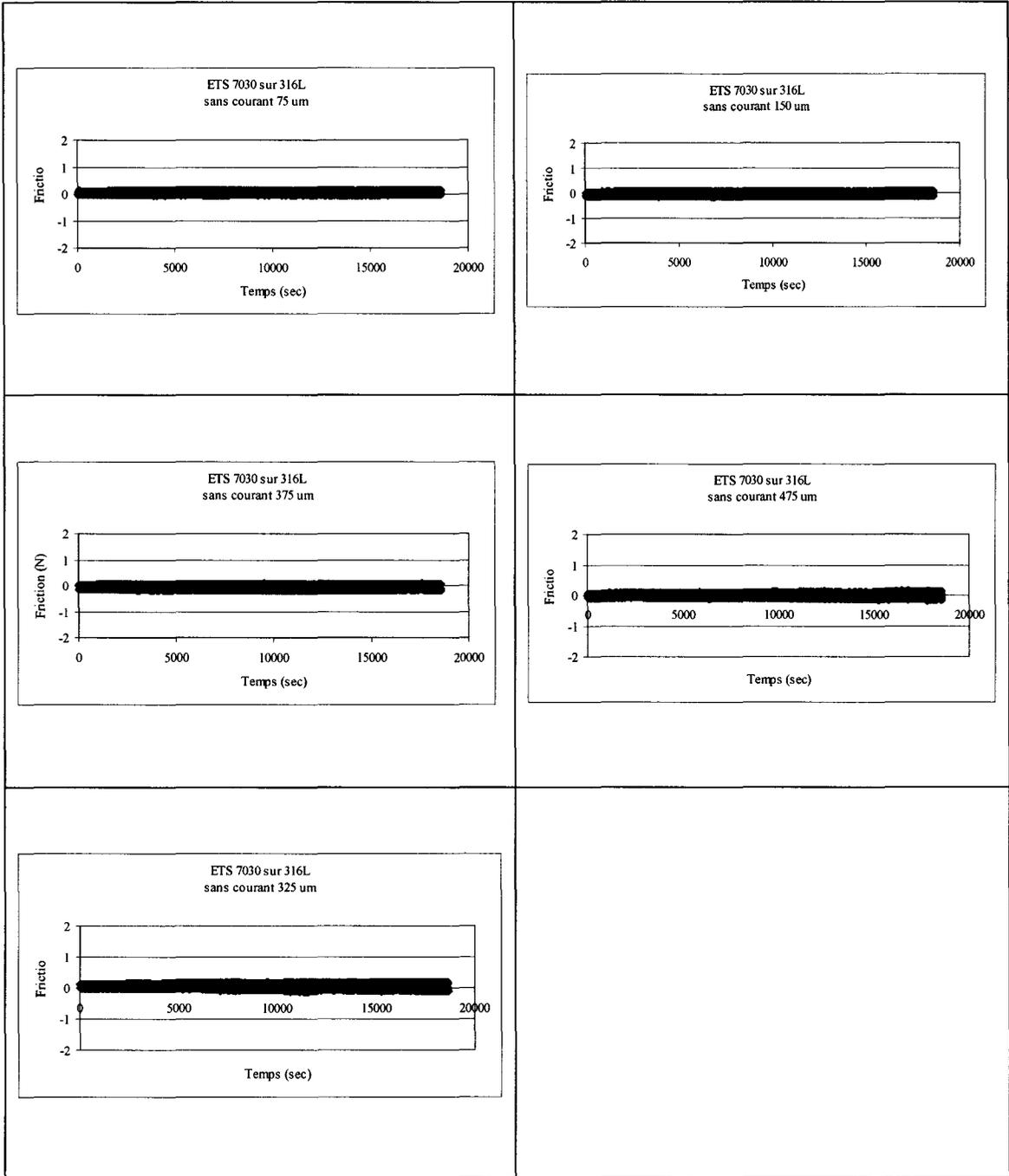
Grphe A2. 26 Avec courant cuivre sur cuivre, 40, 100 et 325 μm



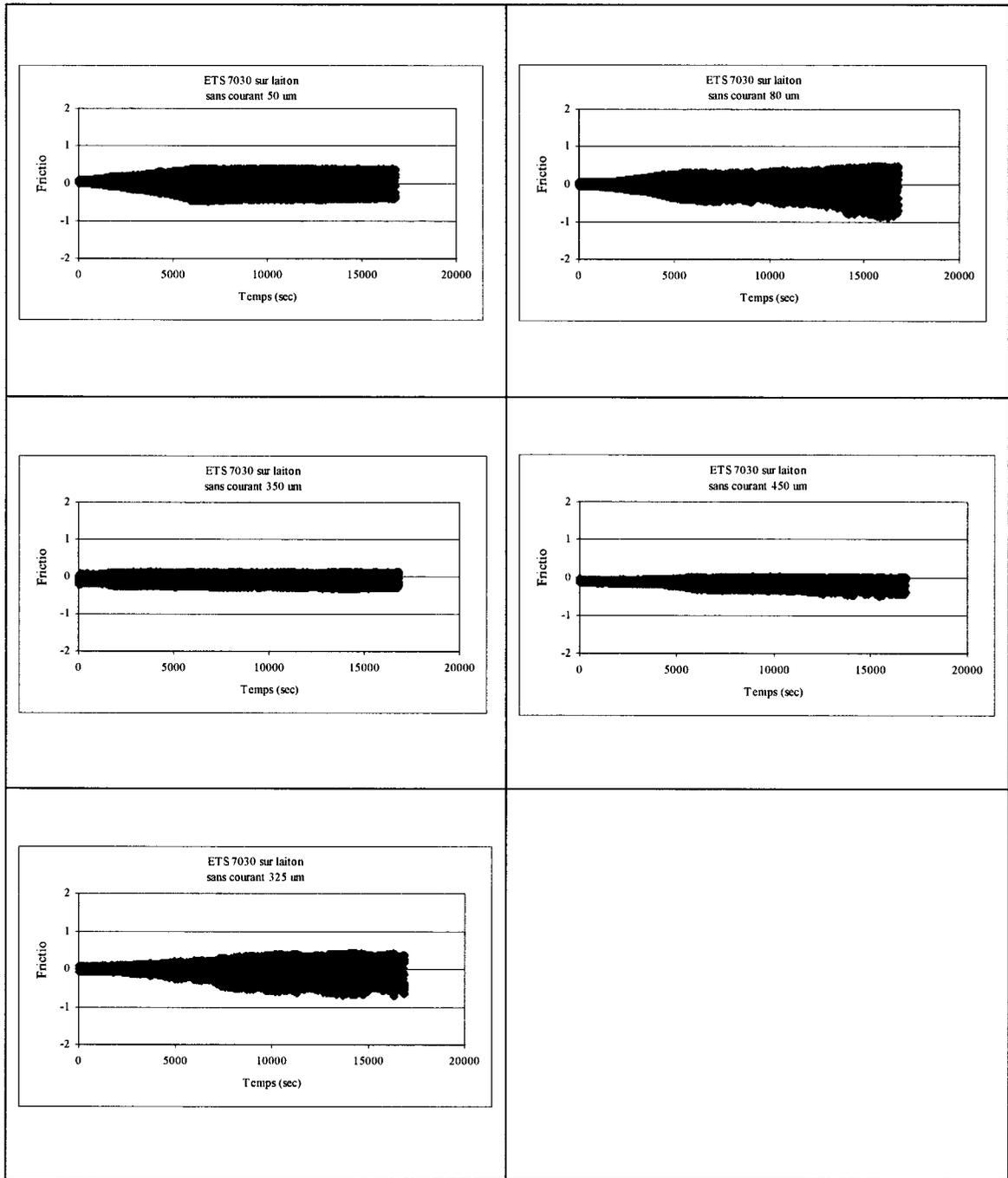
Grappe A2. 27 Avec courant cuivre sur cuivre, 450 et 375 μm



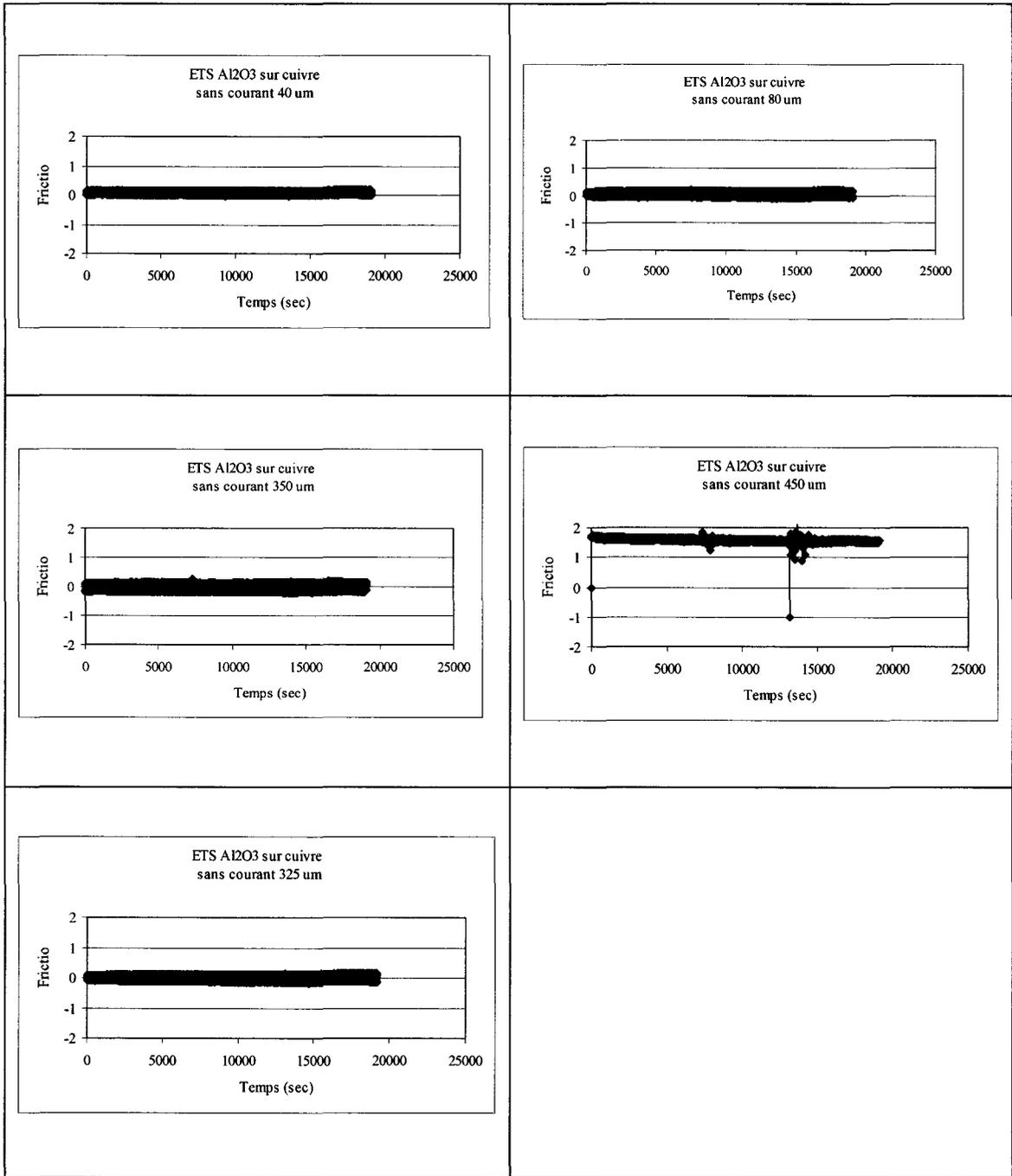
Graphe A2. 28 Sans courant 6061 sur laiton, 50, 75, 350, 450 et 325 μm



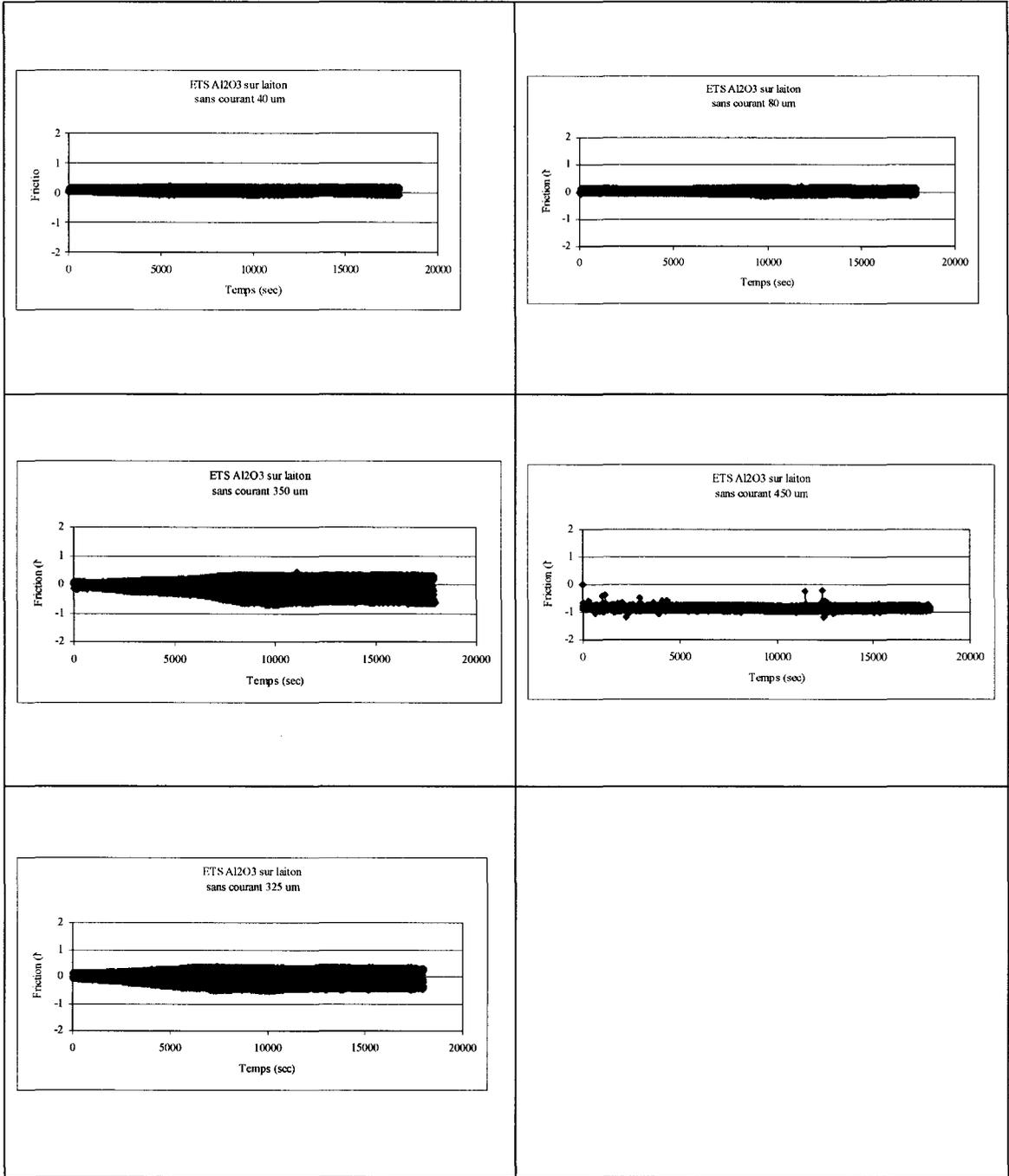
Graphe A2. 29 Sans courant 7030 sur 316L, 50, 75, 350, 450 et 325μm



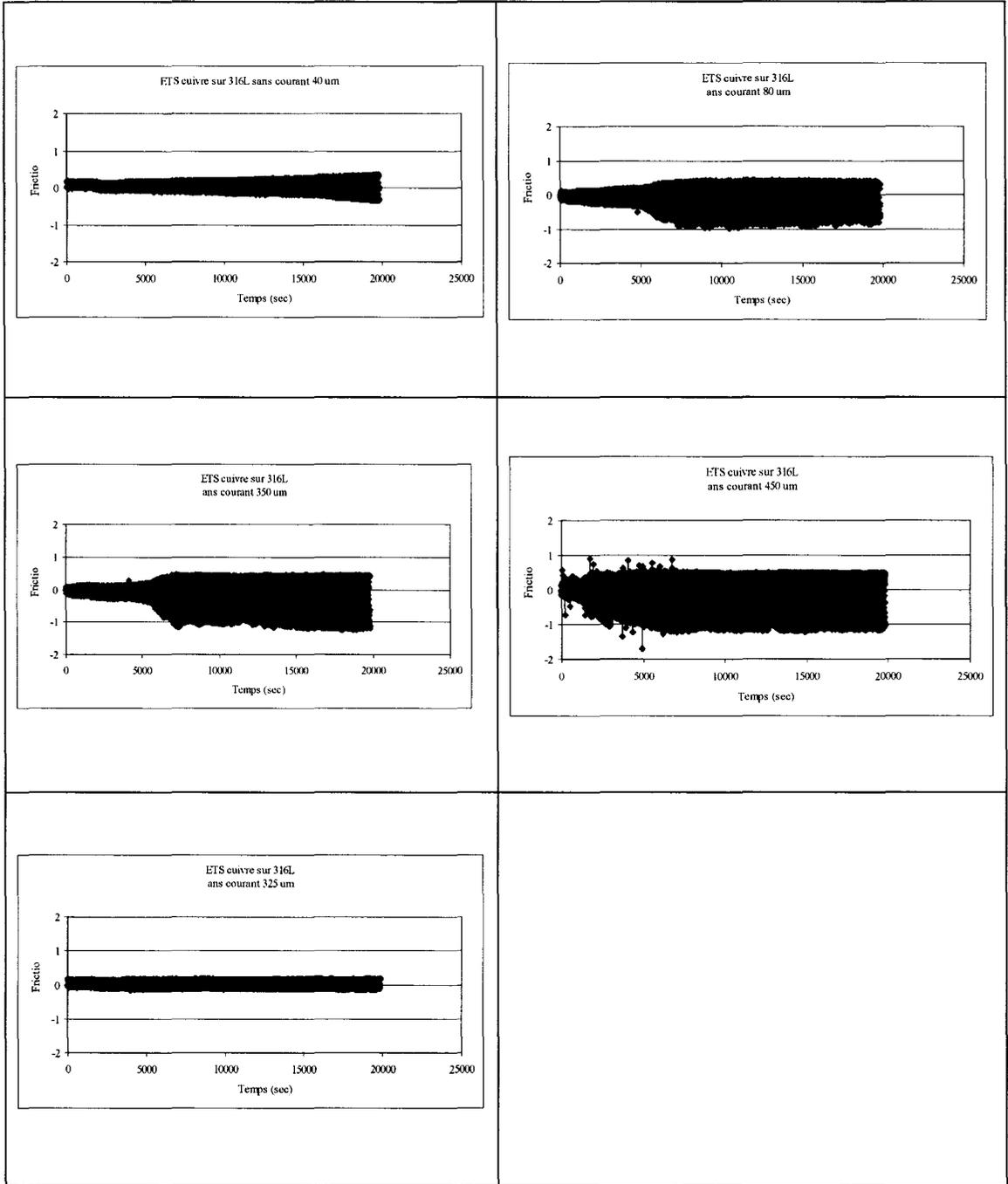
Graphe A2. 30 Sans courant 7030 sur laiton, 50, 75, 350, 450 et 325μm



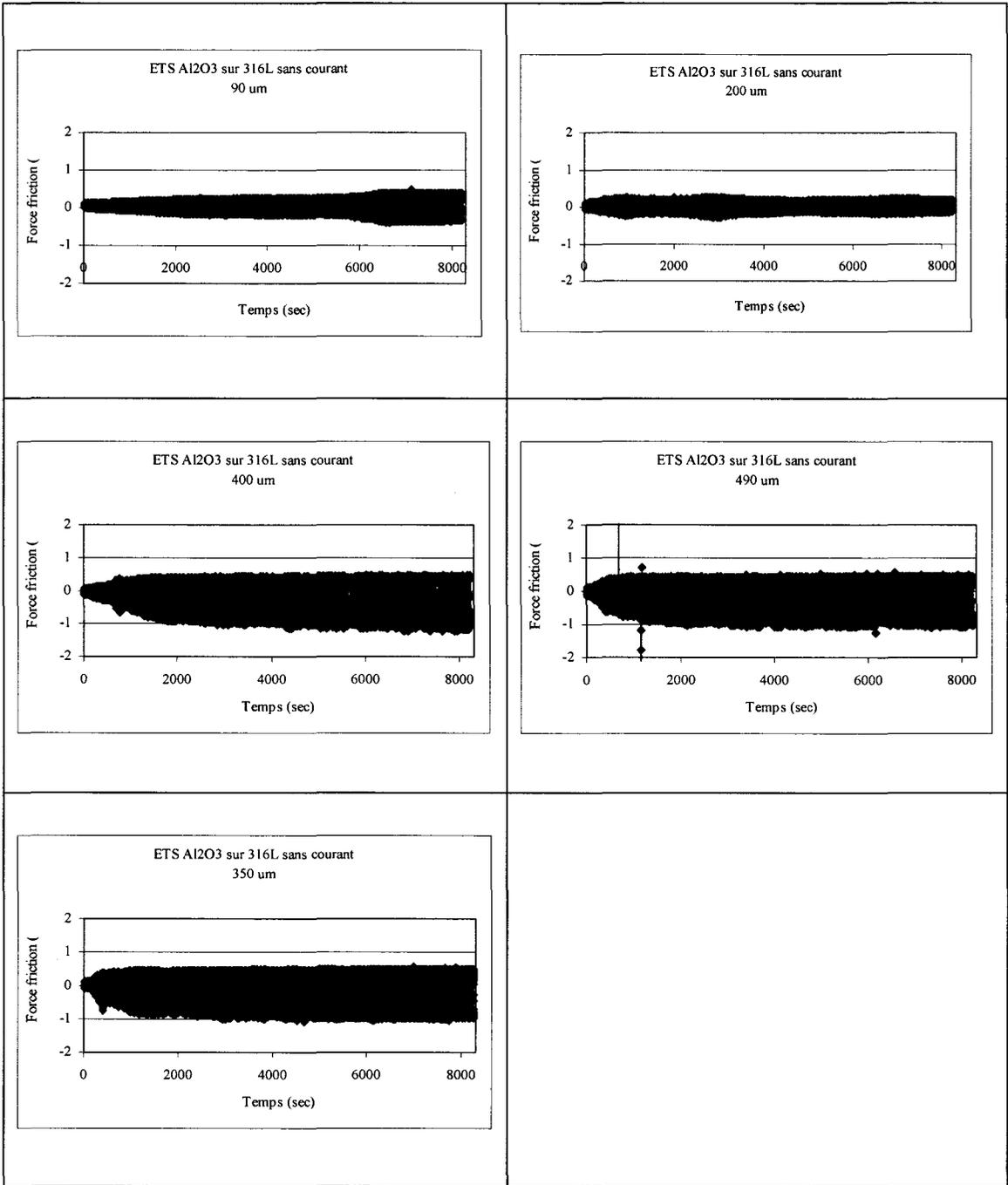
Grphe A2. 31 Sans courant Al₂O₃ sur cuivre, 40, 80, 350, 450 et 325µm



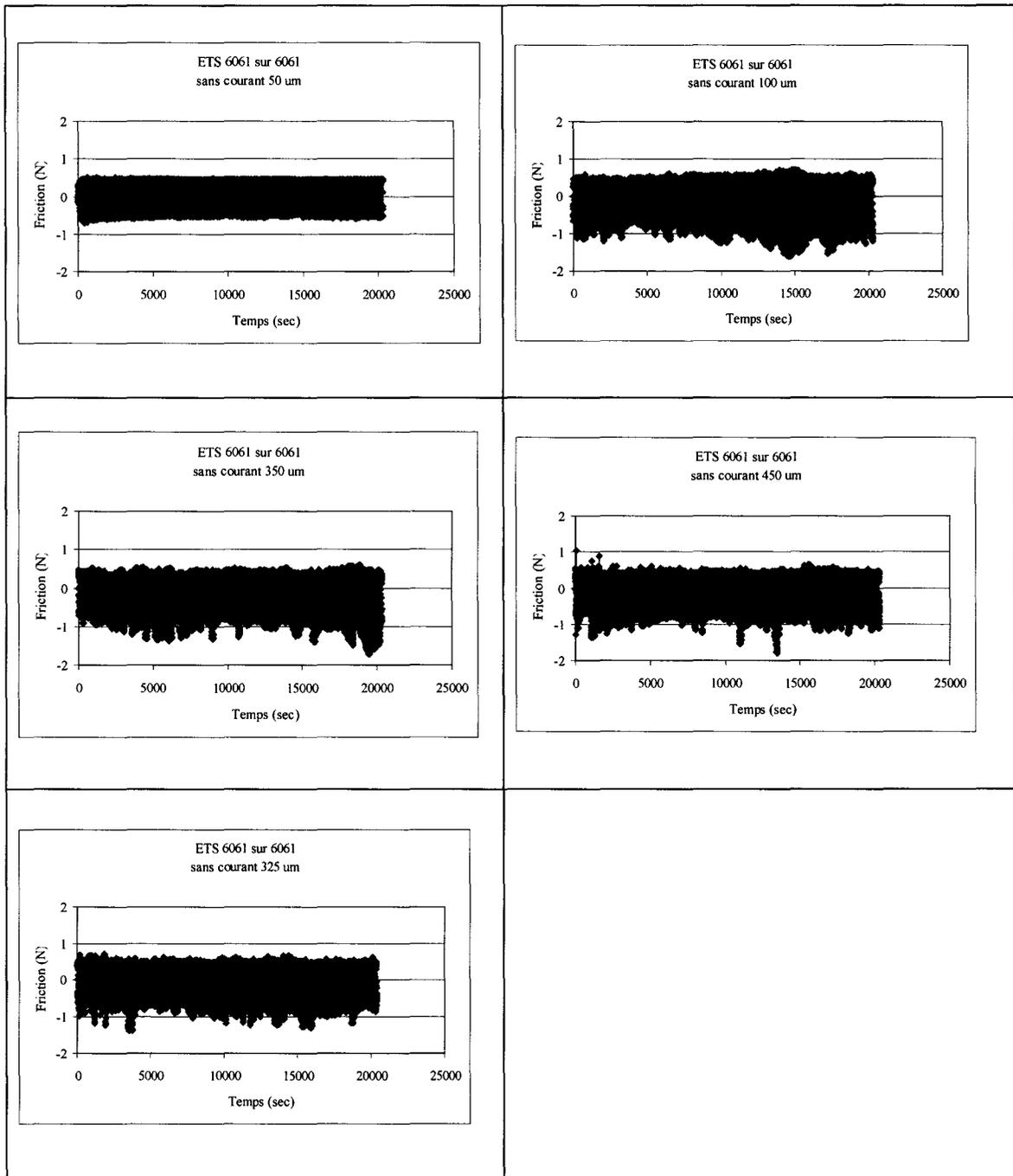
Graphe A2. 32 Sans courant Al₂O₃ sur laitton, 50, 75, 350, 450 et 325µm



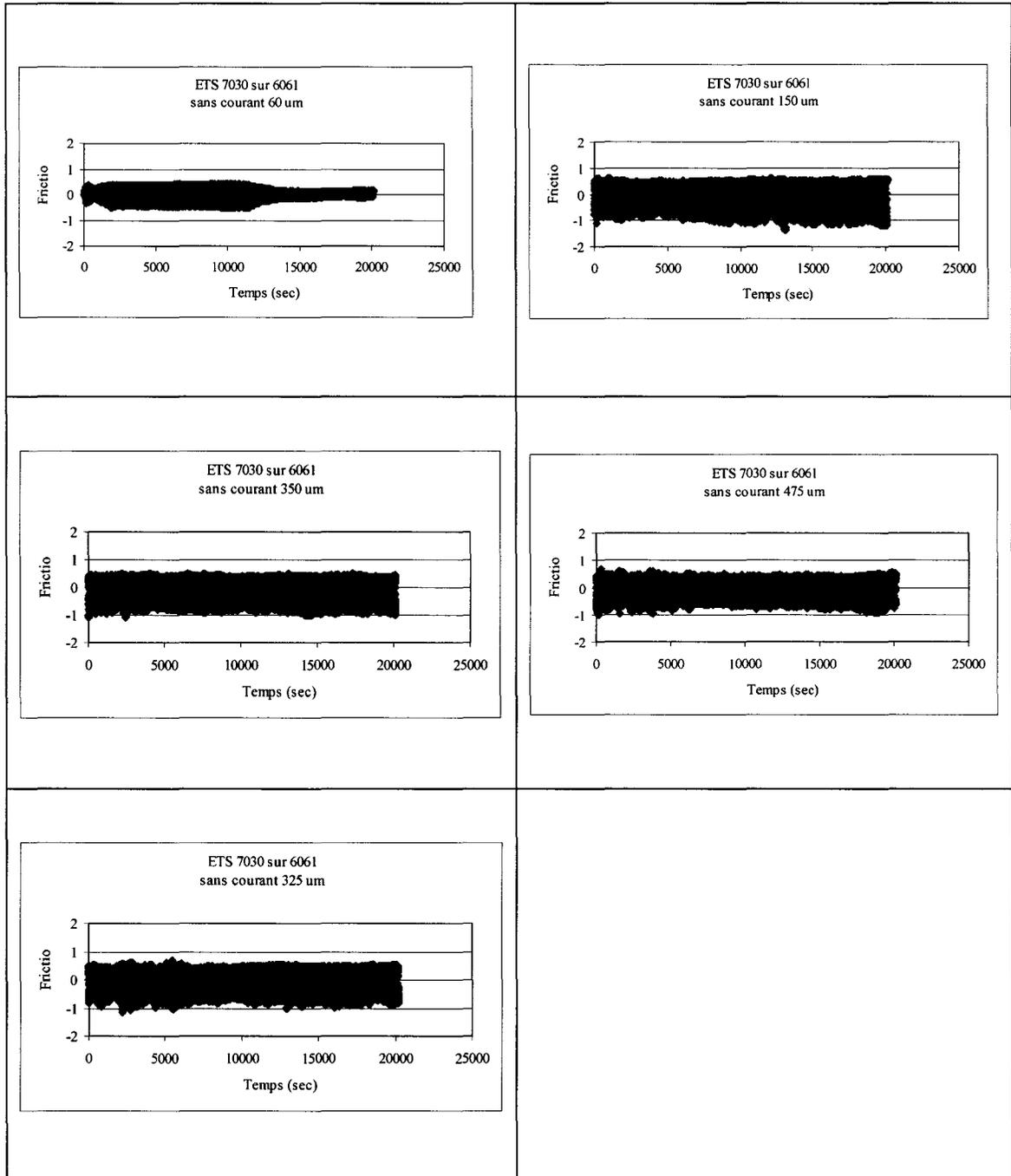
Graphe A2. 33 Sans courant, cuivre sur 316L, 50, 75, 350, 450 et 325µm



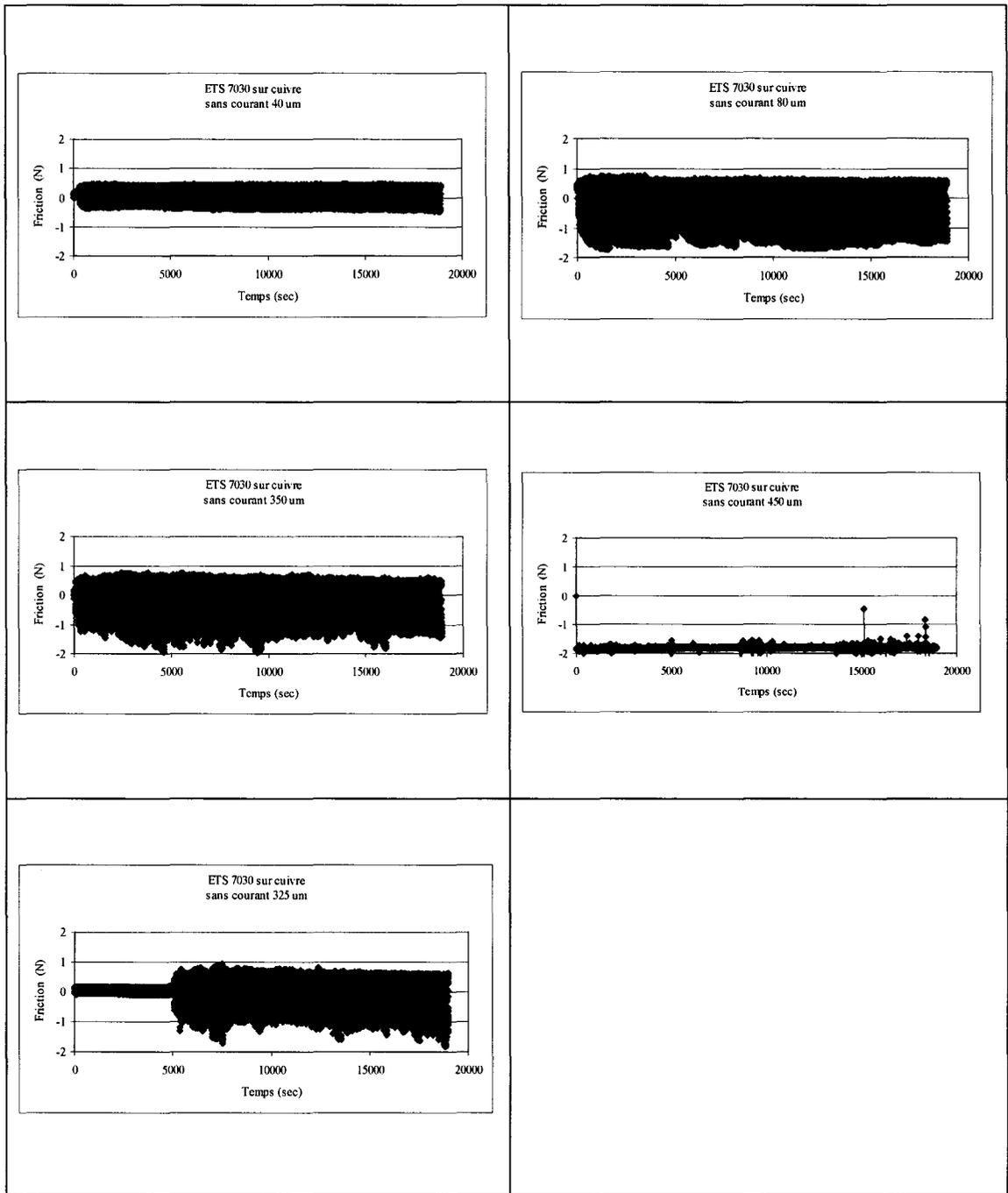
Graphe A2. 34 Sans courant, Al₂O₃ sur 316L, 50, 75, 350, 450 et 325µm



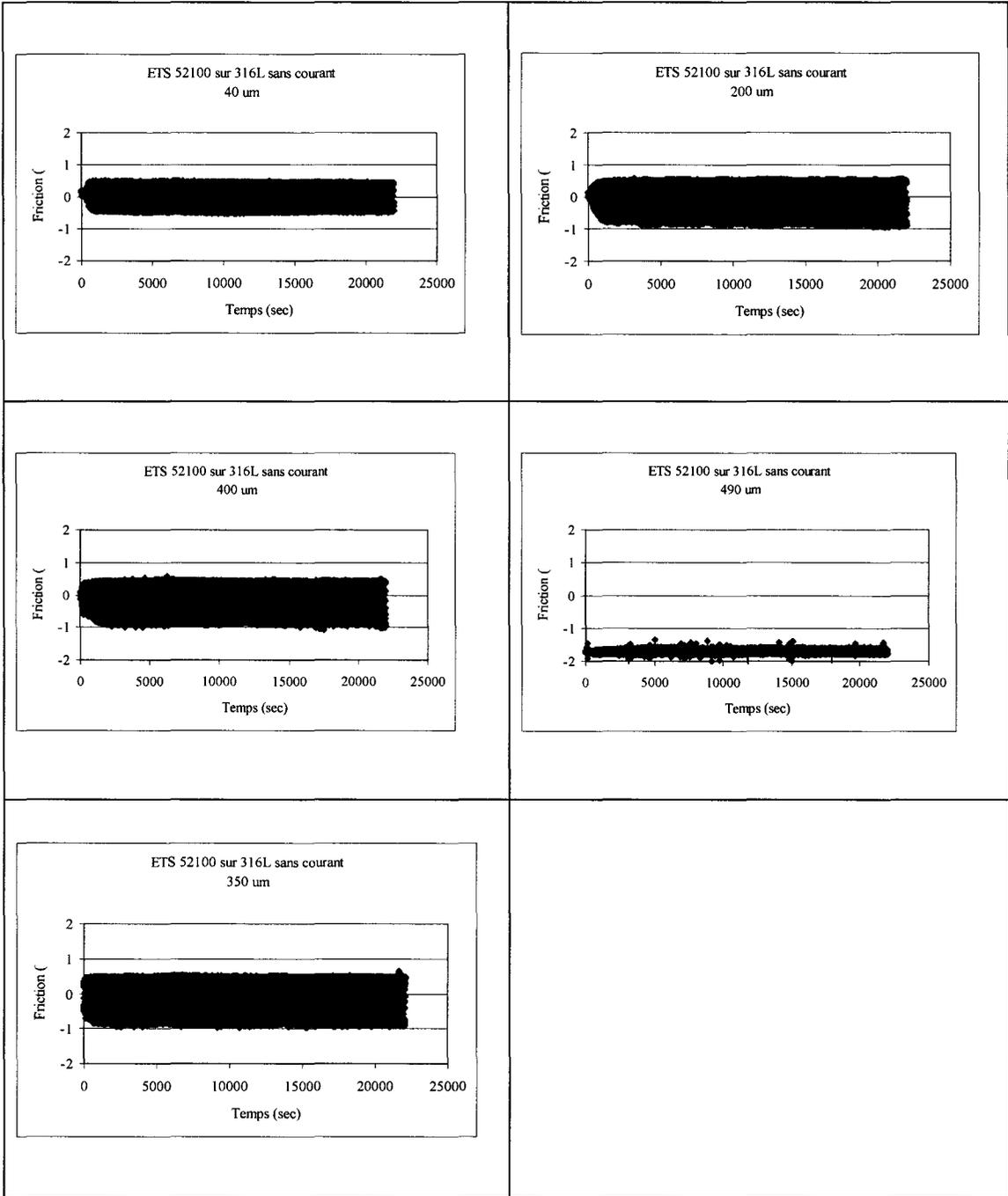
Graphe A2. 35 Sans courant, 6061 sur 6061, 50, 75, 350, 450 et 325 μ m



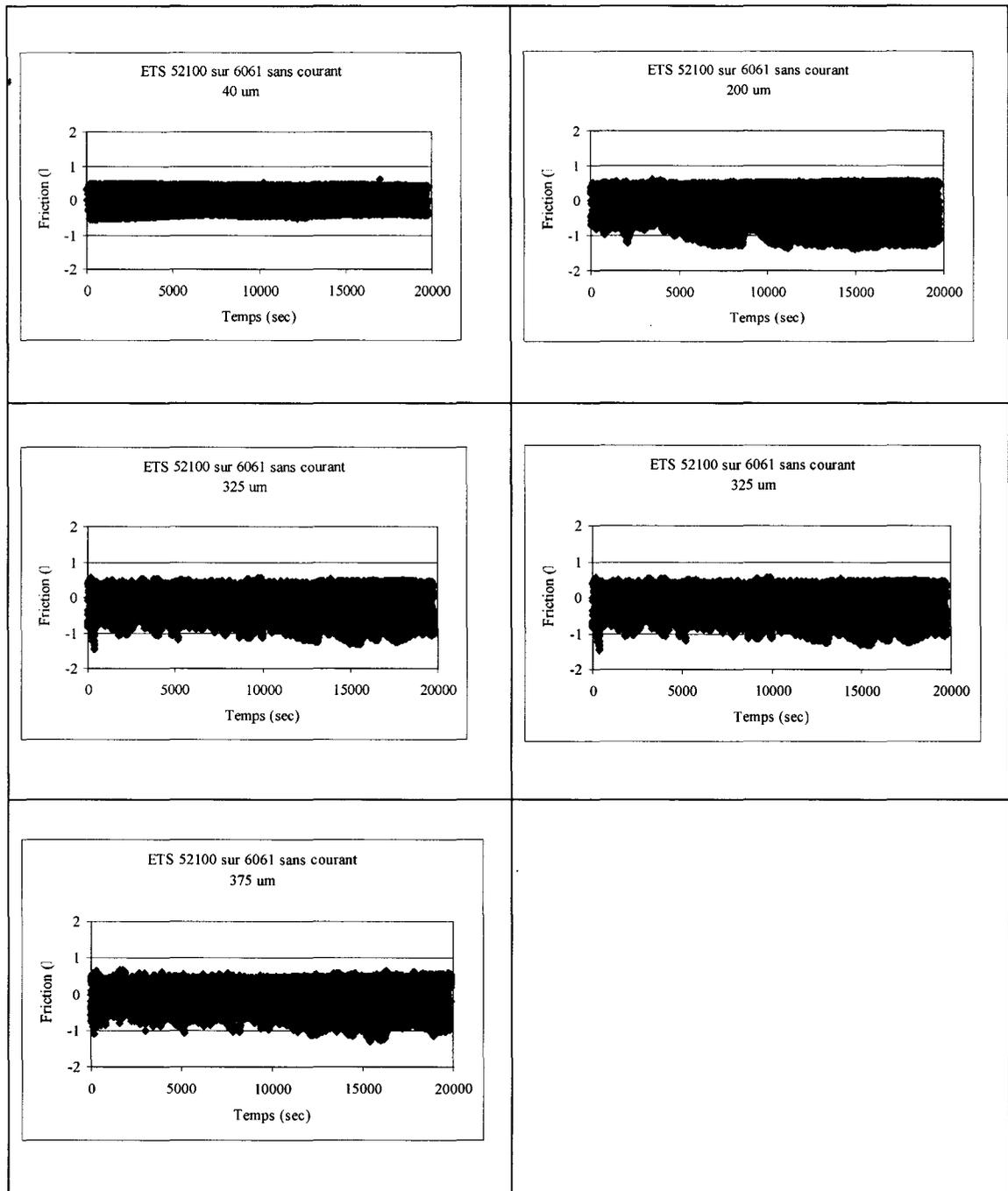
Grphe A2. 36 Sans courant, 7030 sur 6061, 50, 75, 350, 450 et 325µm



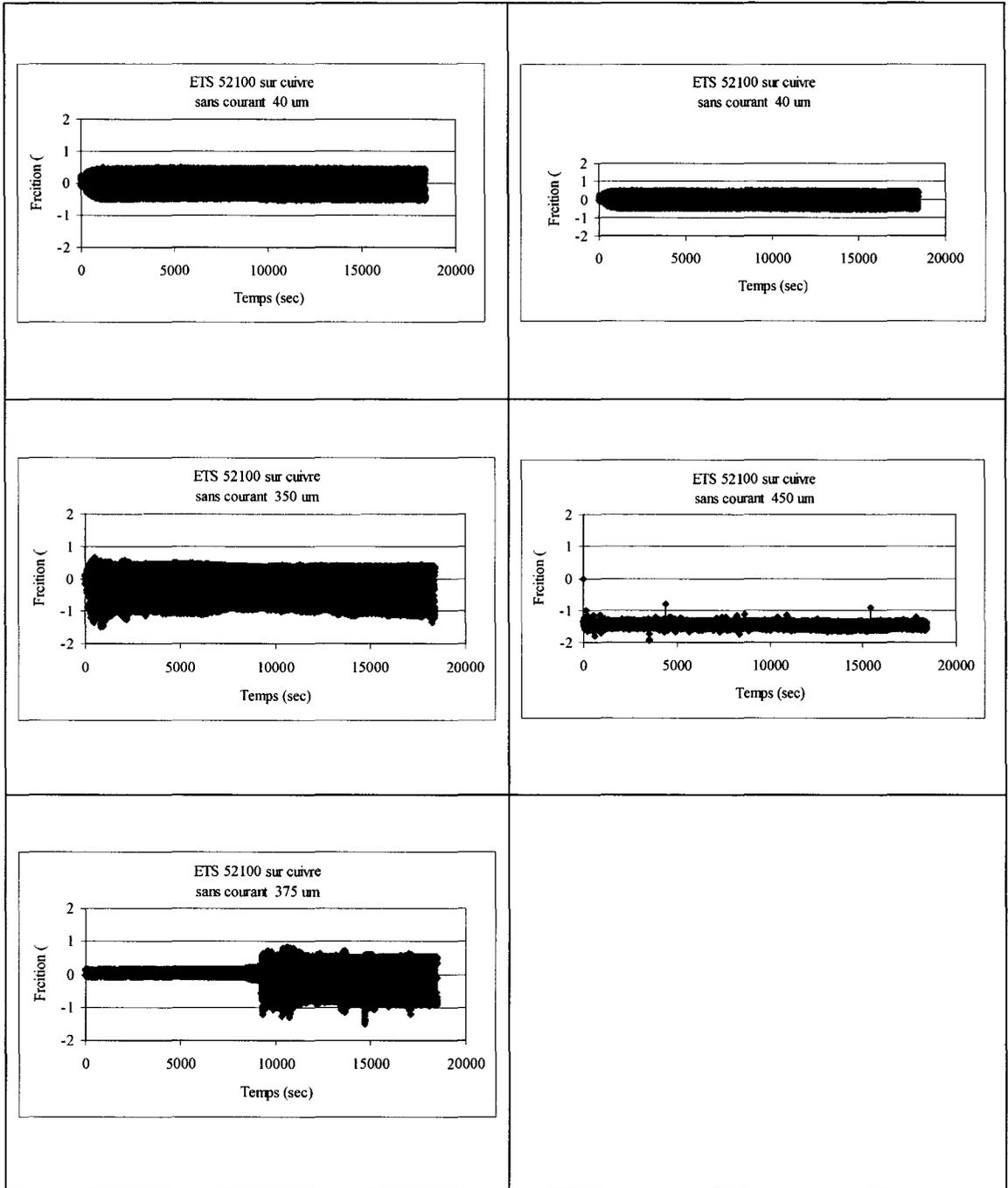
Graphe A2. 37 Sans courant, 7030 sur cuivre, 50, 75, 350, 450 et 325μm



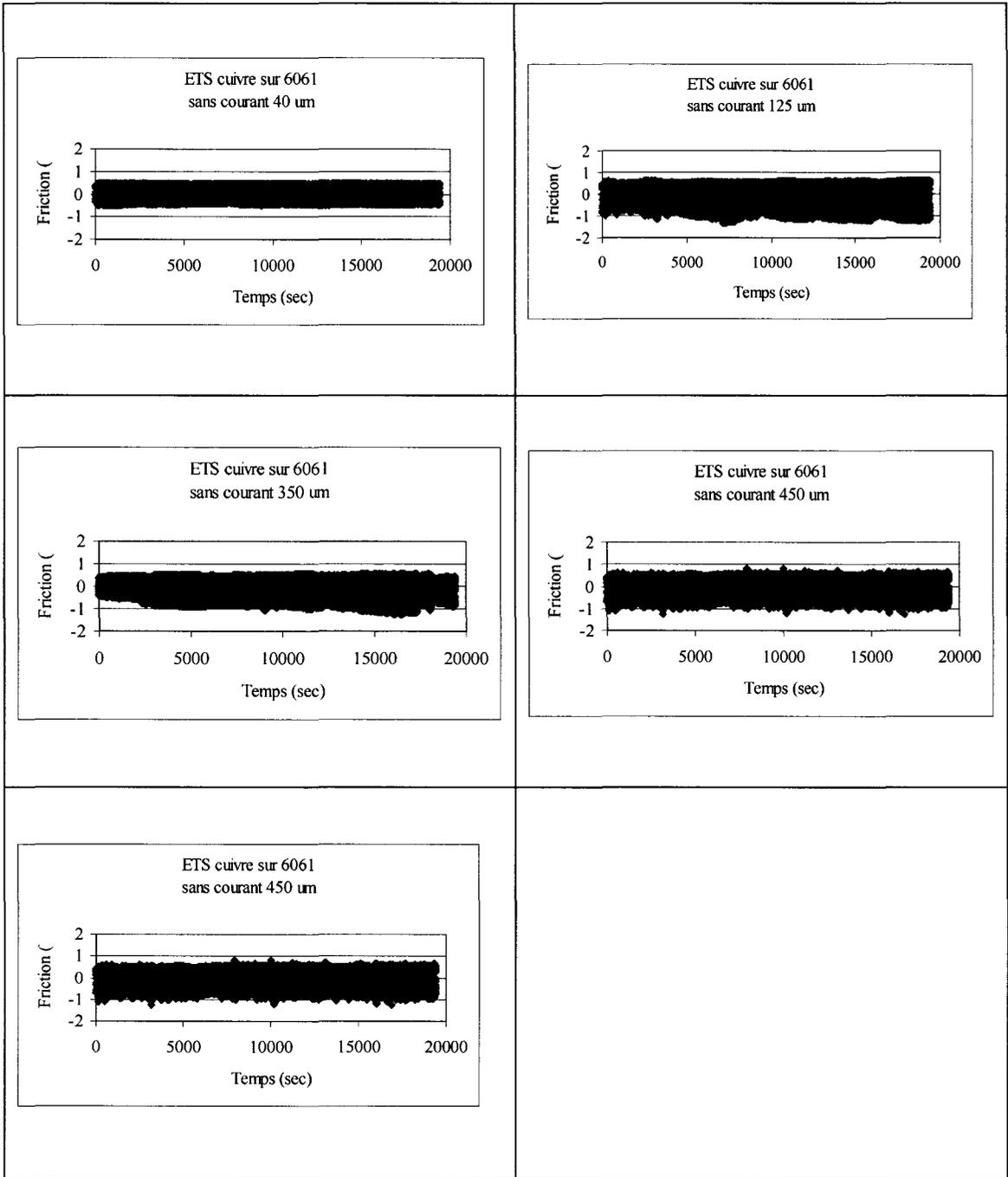
Graphe A2. 38 Sans courant, 52100 sur 316L, 50, 75, 350, 450 et 325μm



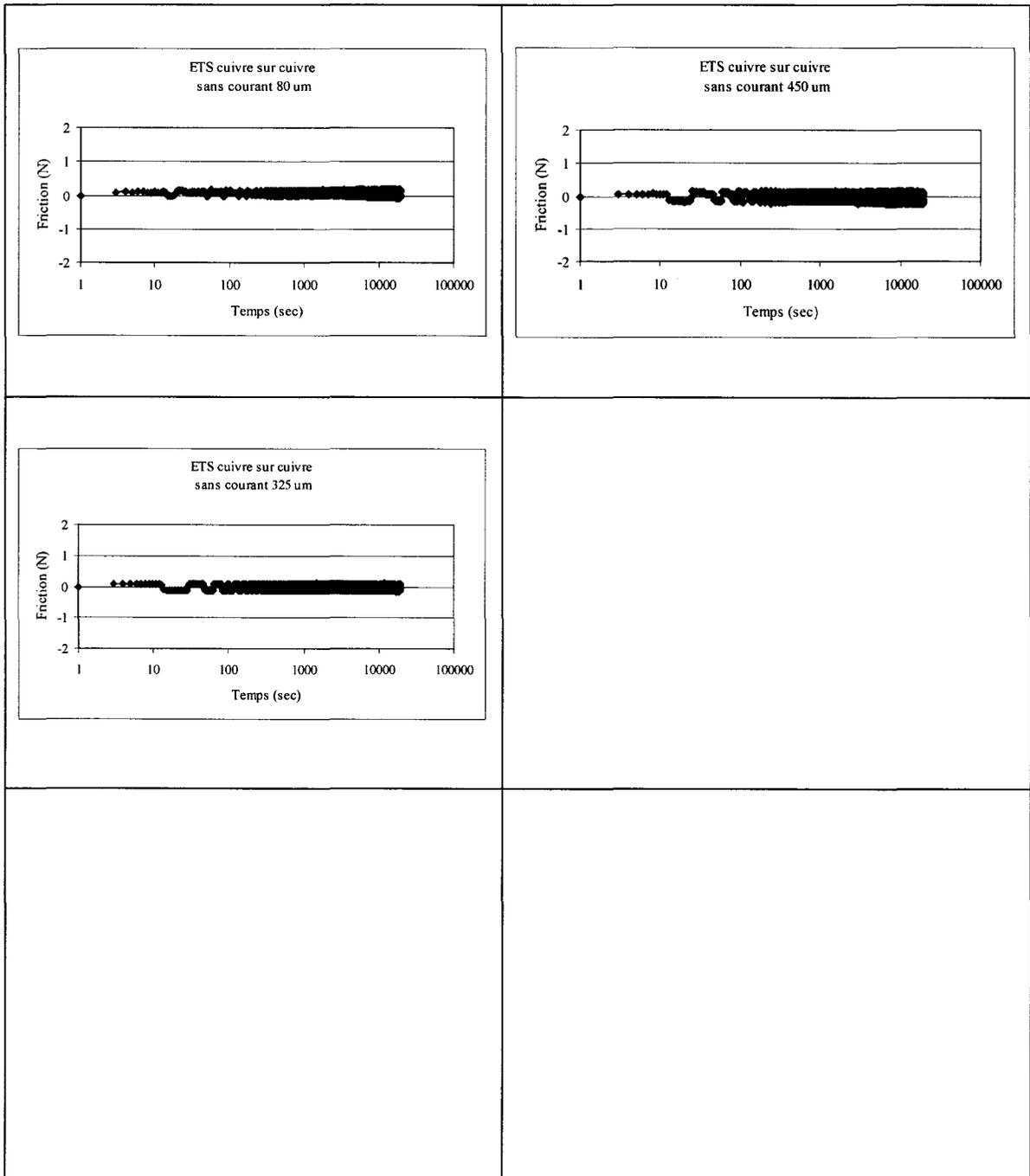
Grphe A2. 39 Sans courant, 52100 sur 6061, 50, 75, 350, 450 et 325 μ m



Grphe A2. 40 Sans courant, 52100 sur cuivre, 50, 75, 350, 450 et 325 μm



Graphe A2. 41 Sans courant, cuivre sur 6061, 50, 75, 350, 450 et 325 μm



Grphe A2. 42 Sans courant, cuivre sur cuivre, 80, 450 et 325 μ m

BIBLIOGRAPHIE

- [3M04] 3M. 3M™, *Composite Conductors Deliver up to 3 Times More Power*, [En ligne].
<http://www.3m.com/market/industrial/mmc/accr/> (Consulté juin 2004).
- [Abb97] Abbott, B. (1984). Time distribution of intermittents versus contact resistance for tin-tin connector interfaces during low amplitude motion. *IEEE Trans CHMT-7(1)* p. 107-111.
- [AIM04] Aim Solder Inc., *Lead-Free Soldering Guide*, [En ligne].
[http://www.aimsolder.com/techarticles/Lead-free soldering guide.pdf](http://www.aimsolder.com/techarticles/Lead-free%20soldering%20guide.pdf) (Consulté janvier 2003).
- [Antl63] Antler, M. (1963) The lubrication of gold. *Wear*, p. 44.
- [Antl82] Antler, M., Sproles, E.S. (1982). Effect of fretting on the contact resistance of palladium. *IEEE Trans. CHMT-5 (1)* p. 158.
- [Antl85-1] Antler, M. (1985). Electrical Effects of Fretting Connector Contact Materials: a Review. *Wear*, 106, p. 533.
- [Antl85-2] Antler, M. (1984). Survey of contact fretting in Electrical connectors Proc. Of the twelfth International conference on Electrical Contacts phenomena and thirtieth Annual conference Holm Conference on electrical contacts, & IEEE Trans CHMT-8 no.1, p. 87-104.
- [Antl87] Antler, M. (1987). Sliding studies of new connector lubricant, *IEEE Trans. Comp. Hybris, Manufact. Technol.*, vol. CHMT-10, no. 1. pp. 24-31.
- [Arnell01] Arnell, S., Andersson, G. (2001). Silver iodine as a solid lubricant for Power contacts, *Conf. Proceedings of the 47th Holm Conference on Electrical Contacts*. 239-244.
- [ASM18] ASM (1992). ASM HANDBOOK: Friction lubrication and wear technology, Vol. 18, p. 238-256

- [Aukl03] Aukland, N., Harrington, C., Drew, G., Wright, C.D., Wheeler, G. (2003). Frictional Work as a sliding wear evaluation parameter, *Conf. Proceedings of the 49th Holm Conference on Electrical Contacts*.
- [Bahal01] Bahal, A., James P., McBride J. (2001). Photovoltaic Connector behaviour under accelerated testing regimes. *Conf. Proceedings of the 47th Holm Conference on Electrical Contacts*, p. 203-214.
- [Bandy90] Bandyopadhyay, A.K., Sen, S.K. (1990). A Study of Compound Formation in a Copper-Tin Bimetallic Couples, *J. Appl. Phys.*, 67, p. 36-81.
- [Bauer76] C.L. Bauer, C.L., Lessmann C.C. (1976). Metal-Joining Methods, *Annual Review of Materials Sci.*, 6, p. 361-387.
- [Bock74] Bock, E.M. Whitley, J.M. (1974). *Electric Contacts –1974*, Illinois Institute of Technology, Chicago, IL, p. 128-138
- [Brau04] Braunovic, M., Gagnon, D. (2004). Formation of Intermetallic in Lead-Free Systems. 22nd International Conference on Electrical Contacts / 50th IEEE Holm Conference Seattle, WA USA en attente pour IEEE Trans CPMT 2004
- [Brau05] Braunovic, M., Gagnon, D., Masounave, J. (2005) Effect of thermal aging on fretting performance in Lead-Free Systems, Abstract à soumettre avant 12/2004 pour: 51st IEEE Holm Conference Chicago USA sept 2005 et si accepté, article sera soumis à IEEE CPMT Transactions 2005
- [Brau77] Braunovic, M. (1976). Fretting Corrosion Between Aluminum and Different Contact Materials, *Electric Contacts-1977*, IIT, p. 223.
- [Brau86] Braunovic, M. (1985). Evaluation of Different Types of Mechanical Contact Devices for Aluminum-to-Aluminum Connections *Proc. 13th ICEC-1986*, Lausanne, p. 107.
- [Brau88] Braunovic, M., (1988). Degradation of Al-Al and Al-Cu Connections due to Fretting, *Wear*, vol. 125, p. 53.
- [Brau89] Braunovic, M. (1989). Fretting in Tin-Plated Aluminum and Copper Connectors". *IEEE Trans. CHMT*, 12 (2) p. 215.

- [Brau90] Braunovic, M. (1989). Fretting in Nickel-Coated Aluminum Conductors, *Proc. 15th ICEC*, p. 461.
- [Brau92] Braunovic, M. (1992). Effect of contact aid compounds on the performance of bolted aluminium-to-copper joints under current cycling conditions. *IEEE Trans. Comp. Hybrids, Manuf. Technol.*, vol. CHMT-15, p.216.
- [Brau94] Braunovic, M., Alexandrov, N. (1994). Intermetallic Compounds at Aluminum-to-Copper Electrical Interfaces: Effect of Temperature and Electric Current, *IEEE Trans. CPMT*, Part A, vol 17, p. 78.
- [Brau99] Braunovic, M. (1999). Further studies of different contact aid compounds for aluminum-to-copper connections. *Proc. 45th Holm Conference on electrical contacts*, p.53
- [Camp53] Campbell, W.E. (1953). Symp on Fretting Corrosion, *ASTM Spec. Tech. Publ.* No. 144, p. 3.
- [Castel84] Castel, P.H., Menet, M., Carballeira A. (1984). Fretting Corrosion in low level electrical contacts: A quantitative analysis of significant variables. *Proc of the twelfth International conference on Electrical contact phenomena and thirtieth Annual Holm Conference on Electrical Contacts* pp. 75-81.
- [Chud02] Chudnovsky, B. (2002). Degradation of power contacts in industrial atmosphere: silver corrosion and whiskers, Conf. Proc of the 48th Holm Conference on Electrical contacts. pp. 140-148.
- [Dimfeld90] Dimfeld S. F., Ramon, J.J. (1990). Microstructure Investigation of Copper-Tin Intermetallics and the Influence of Layer Thickness on Shear Strength, *Weld. Res.* p. 373.
- [Eng05] Informations sur les jauges de contraintes tirées du site internet <http://www.engineersedge.com/> consulté en juin 2004
- [Fair64] Fairweather, F., Lazenby, J., Parker, A. (1964). Development of Resistance and Microphone Noise at a Disturbed Contact. *Proc. 2nd Int. Symp. On Electrical Contact Phenomena*, Graz, Technische Hochschule, pp. 316-338.

- [Fields04] Fields, R.J., Low, S.R. (2004). Physical and Mechanical Properties of Intermetallics Compounds Commonly Found in solder Joints NIST Publication
- [Fouvry00] Fouvry, Kapsa, Vincent. (2000). fretting wear and fretting fatigue :relation through a mapping concept. Fretting fatigue, current technologies and practice, *ASTM STP 1367, DW HOEPPNER, V.CHANDRASEKARAN, and C.B. Elliots, EDS. American society for testing and materials. PA.*
- [Frei76] Freitag, W.O. (1976). Lubricants for seperable connectors. *Proc. Conf. Electrical Contacts-1976.* p. 57.
- [Gabel01] Gabel, N., Hardee, H., Lees, P. (2001) Comparaison of coefficient of friction and contact resistance during sliding wear on clad gold-nickel Surfaces. *Conf. Proceedings of the 47th Holm Conference on Electrical Contacts.* pp. 271-281.
- [Gagn00] Gagnon, D., Braunovic, M. (2000). Fretting in Copper-to-Copper Contacts under AC and DC Current Conditions. *46th Holm Conference on electrical contacts et IEEE Trans CPMT.* pp. 247.
- [Gagn02] Gagnon, D., Braunovic, M. (2002). High Temperature lubricants for power connectors operating at extreme conditions. *Conf. Proceedings of the 48th Holm Conference on Electrical Contacts.*
- [Gagn02] Gagnon, D., Braunovic, M., Masounave, J. (2002). La dégradation par le fretting des contacts électriques, développement de montages expérimentaux, *Journées annuelles du GST Tribologie de l'AFM Senlis, France.*
- [Gagn03] Gagnon,D. (2003). Rapport final étape 2, Projet Nouveaux conducteurs, *Hydro Québec Rapport IREQ-2003-126 Confidentiel* juin 2003.
- [Gagn04] Gagnon, D., Braunovic, M. (2004). Effect of Fretting in Lead-Free Systems, 22nd International Conference on ElectricalContacts/50th IEEE Holm En attente pour IEEE CPMT Transactions 2004.
- [Gagn05] Gagnon, D., Masounave, J., Braunovic, M., (2005) The influence of electrical contact intermittence on friction coefficient for Cu-Cu and Al-Al contacts, *Abstract à soumettre avant 10/12/2004 pour: 51st IEEE Holm Conference Chicago USA sept 2005 et si accepté article sera soumis à IEEE CPMT Transactions 2005.*

- [Ghasemi93] Ghasemi, H.M., Furey, M.J., Kajdas, C. (1993). Surface Temperature and Fretting Corrosion of Steel under Conditions of Fretting Contacts. *Wear*, 162-164 p. 357
- [Gjosten73] Gjosten, N.A. (1973). Diffusion. *ASM*. p. 241
- [Gole74] Golego, N. L., Alyabev A. Y., Shevelya, V. (1974). Fretting Corrosion of Metals. *Tekhnika, Kiev* (1974), (En Russe).
- [Hain89] Hain, M. W. (1989). Monitoring Material Property Transformations with Electrical Resistivity, *Mater. Eval.*, vol. 47, p. 619.
- [Hills94] Hills P. A., Nowell D., (1994). *Mechanics of fretting fatigue*, Klumer academic publishers, Solid mechanics and its applications series, pp. 3-7
- [Holm67] Holm, R., (1967). *Electric Contacts*, N.Y., Springer Verlag .
- [Hoo87] Hooyer J.M., Peeksto, K (1987). The Influence of Practical Contact Parameters on Fretting Corrosion of Tin-Base Low-Level Connector Contacts. *Electric Contacts-1987, IEEE-Holm*, p. 43.
- [Hu00] Q. Hu, I.R. Mc Coll, S.J. Harris, R.B. (2000). The role of debris in the fretting wear of a SiC reinforced aluminium matrix composite , *Waterhouse, wear* 245 (2000) 10-21
- [Hub99] Hubner-Oberland, F., Minuth J. (1999). A new test equipment for high dynamic real-time measuring of contact resistances. *Conf. Proceedings of the 45th Holm Conference on Electrical Contacts*, pp. 193-202.
- [Hunt74] Huntington, H.B. (1974). *Electromigration in Metals in Diffusion in Solids: Recent Developments*, Eds. A.S. Nowick, and J.J. Burton, NY, Academic Press, Chapter 6.
- [Hurr70] Hurricks, P.L. (1970). The Mechanism of Fretting: A Review, *Wear*, 15 pp. 389-409.
- [Hurr76] Hurricks, P.L. (1976). The Mechanism of Fretting and the Influence of Temperature. *Indust. Lubrication and Technology*, pp. 9-17

- [Jian01] Jian-Zhong, Y., Yin-Shun, W., Jiu-Qing, L. Lin, Z. (2001). Dependence of fretting damage on time, *corrosion science section, Vol. 57, No 7*
- [Kawa91] Kawakami, K. (1991). Properties of heat-resistant Aluminum-Alloy Conductor for overhead Power Transmission lines. *Furukawa review no. 9* pp. 81.
- [Kongs78] Kongsjorden, H., Kulsetas, J., Sletbak, J. (1978). Degradation of Electrical Contacts Caused by Oscillatory Micromotion Between the Contact Members. *Electrical Contacts-1978*, p. 87.
- [Lead04-1] NIST, Database for Solder Properties with Emphasis on New Lead-free Solders, <http://www.boulder.nist.gov> [En ligne]. (Consulté en mars 2004).
- [Lead04-2] Soldertec, Lead Free Soldering Technology Centre [En ligne] www.lead-free.org/ et <http://www.solderworld.com/> (Consulté en février 2004).
- [Lee87] Lee, M., Mamrick, M. (1987). Fretting Corrosion of Tin-Plated Copper Alloy", *IEEE Trans. CHMT-10*, p. 63
- [Lind75] Lindborg, U., Asthner, B., Lind, L., Revay, L. (1975). Intermetallic Growth and Contact Resistance of Tin Contacts after Aging, *Electric Contacts-1975*, IIT, Chicago, p. 25.
- [Mall00] Malluci, R. D., (2000). Possible mechanism for observed dynamic resistance. *Conf. Proceedings of the 46th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pp. 254-267.
- [Mall03] Malluci, R. D. (2003). Fretting corrosion degradation threshold behaviour and contact instability. *Conf. Proceedings of the 49th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. pp. 2-15.
- [Mall96] Malluci, R. D. (1996). Impact of fretting parameters on contact degradation. *Conf. Proceedings of the 42th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pp. 395-403.
- [Mall97] Malluci, R. D. (1997). Accelerated testing of tin plated copper alloy contacts. *Conf. Proceedings of the 43th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pp. 138-151.

- [Mall99] Malluci, R. D. (1995). Characteristics of film developed in fretting experiments on tin contacts, *Conf. Proceedings of the 45th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pp. 175-185.
- [Mill87] Miller, K. J. (1987). The behaviour of short fatigue cracks and their initiation, Part II A general summary, *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.* , 10. 93.
- [Mindl49] Mindlin, R.D., (1949) Compliance of elastic bodies in contact, *Jnl. Appl. Mech.*, 16, 259-268.
- [Nam02] Namjoshi, S.A., Mall, S., Jain, V.K., Jin, . (2002). Effects of process variables on fretting fatigue crack initiation in Ti-6Al-4V, *journal of stain analysis* vol 37, No 6.
- [Naza94] Nakazawa, K., Sumita, M., Maruyama, N., (1994). Effect of relative slip amplitude on fretting fatigue of high strength steel, *fatigue fract. Engng mater. Struct.* Vol. 17, No 7, 751-759, (1994).
- [Noël01] Noël, S, Lécaudé N. D. Alamarguy, L. Tristani, (2001). Lubrication mechanism of hot-dipped tin separable electrical contacts, *Conf. Proceedings of the 47th Holm Conference on Electrical Contacts*, pp. 197.
- [Noël99] Noel, S, Lécaudé N., Bodin C. Boyer L. (1999). Electrical and tribological properties of hot-dipped tin separable contacts with fluorinated lubricant layers, *Conf. Proceedings of the 45th Holm Conference on Electrical Contacts*, pp. 225-235.
- [Roub01] Roubaud, P., Prasad, S., Bulwith, R., Kamath, S., Garcia, A. (2001). Impact of Intermetallic Growth on the Mechanical Strength of Lead-Free BGA Assemblies, *IPC SMEMA Council*, Apex 2001. p. LF2-3.
- [Rudol97] Rudolphi, A. K., Jacobons, S. (1997) Stationary loading, fretting and sliding of silver coated copper contacts – influence of corrosion films and corrosive atmosphere, *Tribology International* Volume 30, number 3, p. 165-175
- [Shev99] Shevelya, V.V., Kalda, g.S. (1999). Influence of fretting on fatigue resistance of metals. Part II combined tests, *journal of friction and wear*, Vol. 20, No 3, p. 79-82

- [Slade99] Slade, P. (1999). *Electrical contacts principles and applications*, New York, Marcel Dekker, p. 300-359
- [Smits58] Smits, F.M. (1958). Measurements of Sheet Resistivities with the Four-Point Probe, *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 37, p. 711
- [Souter88] Souter, J.W., Staunton, W. (1988). The fretting wear of electrodeposited contact coatings. *Trans. Inst. Met. Finish.* 66(1) p.8
- [Take80] Takehiko, S, Yuji, M., Masanori, O. (1980). Palladium with a gold layer as a sliding contact material, *Conf. Proceedings of the 26th Holm Conference on Electrical Contacts*, 1980 pp.41-47
- [Tian91] Tian, H., Saka, N., Rabinowicz, E. (1991). Fretting fatigue of electroplated gold contacts. *Wear* p. 142
- [Tom27] Tomlinson, A. (1927). The rusting of steel surfaces in contact. *Proc. Royal society (London) A*, vol 115, p. 472, 483
- [Trud96] Trudeau, M., Braunovic, M., Bryden, K.J., Ying, J.Y. (1996). Fretting studies of nanocrystalline Pd, Pd-Ag and Pd-Y films. *Electrical Contacts-1996*, p.383
- [Tuns01] Tunstall, M. J. (2001). High temperature, low sag conductor for upgrading National's grid transmission lines, *Conf Proc. FIILE 2001, Paris*, p. 66
- [Urquhart76] Urquhart, W. (1976). Interdiffusion Studies on Contact Plating Materials, *Electrical Contacts -1976*, ITT, p. 185.
- [Vings88] Vingsbo, Sodenberg (1988). On fretting Maps, *Wear*, Vol. 126 p131- 147.
- [Wate72] Waterhouse, R.B. (1972). *Fretting Corrosion*, Pergamon Press, Oxford.
- [Whitlam86] Whitlam, K.S. (1986). Gold flashed palladium nickel for electronic contacts, *Trans Inst Met Finish* p. 64.
- [Zak72] Zakraysek, L. (1972). Intermetallic Growth in Tin-Rich Solders'. *Welding Research Suppl.*, November 1972. p. 537.

- [Zheng00] Zheng, Y., Hillman, C., McCluskey, P. (2000). Intermetallic Growth on PWB Soldered with Sn3.8Ag0.7Cu. *Proc. 52nd ECTC, San Diego USA*, pp. 1226-1231.
- [Zhou93] Zhou, Z. R., Vincent, L. (1993). Effect of external loading on wear maps of aluminium alloys, *Wear*, vol. 162-164, n° 1, pp. 619-623.