



HAL
open science

Etudes des variations de la résistance électrique du contact Balai-Bague de l'alternateur

Philippe Chazalon

► **To cite this version:**

Philippe Chazalon. Etudes des variations de la résistance électrique du contact Balai-Bague de l'alternateur. Autre. Ecole Centrale Paris, 2013. Français. NNT : 2013ECAP0023 . tel-00969169

HAL Id: tel-00969169

<https://theses.hal.science/tel-00969169>

Submitted on 2 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

Présentée par Philippe CHAZALON

pour l'obtention du
GRADE DE DOCTEUR

École Doctorale : École Centrale Paris (ED287)

Spécialité : Sciences Pour l'Ingénieur

Laboratoire d'accueil : LISMMA (EA2336)

Étude des Variations de la Résistance Électrique du Contact Balai - Bague de l'Alternateur

Soutenue le : 12/02/2013

Devant un jury composé de :

| | | | |
|----------------------------|----------------------------|----------------|--------------------|
| M. François ROBBE-VALLOIRE | Professeur des Universités | SUPMECA | Directeur de thèse |
| M. Hamid ZAIDI | Professeur des Universités | Univ. Poitiers | Rapporteur |
| M. Rochdi EL ABDI | Professeur des Universités | Univ. Rennes 1 | Rapporteur |
| Mme Muriel QUILLIEN | Maître de Conférences | SUPMECA | Co-encadrante |
| M. Philippe DUFRENOY | Professeur des Universités | Polytech'Lille | Examineur |
| M. Grégory GODEFROY | Chef de Projet | VALEO | Examineur |
| M. Jean-Claude MIPO | Docteur | VALEO | Invité |

Etude des Variations de la Résistance Electrique
du
Contact Balai - Bague de l'Alternateur

Philippe CHAZALON

20 décembre 2012

« Il y a toujours deux raisons pour faire quelque chose : une bonne raison et la vraie raison »

Dale Carnegie, 1888-1955.

« Il ne faut pas juger un homme par ce qu'il ignore, mais par ce qu'il sait »

Luc de Clapiers, Marquis de Vauvenargues, 1715-1747.

RÉSUMÉ

Dans une automobile, les composants électriques sont alimentés par un type de générateur électrique particulier : l'Alternateur. Entraîné par le moteur du véhicule, il lui prélève donc de la puissance mécanique. Dans les périodes de chasse au gramme de CO_2 que nous connaissons, la puissance prélevée au moteur doit être minimisée pour ne pas pénaliser sa consommation. Or les besoins électriques du réseau de bord et des systèmes (éclairage, ventilation, servitudes, contrôle moteur, etc.) sont imposés par l'équipement du véhicule ! Il est apparu que dans les cas où l'alternateur est fortement sollicité, des pertes de performances peuvent être imputées au circuit d'excitation de la machine. Il comporte deux contacts électriques glissants balai-bague qui ont été incriminés. Du point de vue théorique aucun élément ne permettait d'expliquer les augmentations brutales de résistance de ces contacts, nous avons donc développé une méthode de mesure originale destinée à rechercher des paramètres influents sur leurs variations. Il nous a été impossible de faire une mesure de l'épaisseur film de transfert et d'identifier les quantités de graphite, nature et quantité des oxydes en présence dans le film. Cependant, nous avons estimé la pertinence de l'hypothèse du rôle de l'oxydation et avons surtout pu isoler le rôle du film de transfert dans l'expression des résistances de contact. Nous avons, de plus, mis en évidence la corrélation existant entre les résistances de contact et le coefficient de frottement pour les deux contacts.

Mots-Clefs :

Tribologie, Tribo-Électricité, Contacts Électriques Glissants, Balais, Graphite, Cuivre, Alternateur, Générateur de Courant, Résistance de Contact, Frottement,

ABSTRACT

The Alternator is an electrical generator especially designed to supply current to the vehicle electrical components. It is powered by the engine and takes off a part of its power. Currently, car makers are more than willing to minimize the power losses of this device in order to save fuel and reduce CO_2 emissions, but the electrical need depend only on the vehicle equipment and use. Sometimes when the alternator runs at full load, the performance could be diminished by unpredictable resistance changes in the electrical sliding contacts of the excitation circuit. There was no theory capable of explaining these phenomena. The analysis limits were the impossibility to measure transfer film thickness and to determine the amount of graphite and the nature and volume of oxides into the film. We developed an experimental method adapted to contact resistance and friction measurements with the aim to find influencing parameters. A dedicated software has been created to extract data from these measurements. We appreciated the relevancy of oxidation hypothesis and we added a study on transfer film, gauging its contribution to contact resistance. Moreover we found a significant correlation between contact resistance and friction, meaning that there are some influent hidden parameters between brush and disc/ring.

Key words :

Tribology, Electricity, Sliding Electrical Contacts, Carbon Brushes, Copper Ring, Alternator, Current Generator, Contact Resistance, Friction,

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier chaleureusement les personnes qui m'ont soutenu efficacement dans le cadre de cette étude.

J'adresse mes meilleurs sentiments à ceux que j'ai cotoyé pendant ces années, au LISMMA ou chez VALEO et qui, compagnons d'infortune, ont vécu avant ou après moi l'aventure de la thèse. Je pense en tout premier lieu à S. Cautain et A. Vauquelin, mais aussi à J. Foune, U. Guette, V. Vé, L-A. Tchoune, O. Lute, J. Rardin, A. Bdel, Li Li, R-I. Meno, et mes autres camarades et collègues présents durant cette période.

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCTION | 9 |
| Contexte, Objet et Objectifs | 9 |
| I ANALYSE DE L'ÉTAT DE L'ART ET DES CONNAISSANCES | 10 |
| 1 GÉNÉRALITÉS SUR LES MACHINES ÉLECTRIQUES | 11 |
| 1.1 La Dynamo | 12 |
| 1.2 L'Alternateur | 13 |
| 1.3 Contraintes imposées par la Résistance des Contacts Électriques Glis- sants | 16 |
| 1.4 Constat des perturbations dues aux Variations de Résistance de Contact | 17 |
| 1.5 Matériaux et Caractéristiques des Balais et Bagues | 19 |
| 1.5.1 Les balais | 19 |
| 1.5.2 Les Bagues | 21 |
| 2 LES CONTACTS ELECTRO-MÉCANIQUES GLISSANTS | 22 |
| 2.1 Tribologie Générale du Contact sans Courant | 22 |
| 2.1.1 Frottement et État de Surface | 22 |
| 2.1.2 L'Usure et le Troisième Corps | 25 |
| 2.1.3 La Théorie de Hertz | 26 |
| 2.1.4 Le Contact Graphite - Métal | 28 |
| 2.2 Le Contact Électrique Statique | 29 |
| 2.2.1 Calcul de la Résistance d'Interface (Résistance de Constriction) | 29 |
| 2.2.2 Résistance de Constriction en Conditions Réelles | 31 |
| 2.2.3 Le Contact Electrique Métal-Graphite | 33 |
| 2.3 Le Contact Électrique Cuivre-Graphite en Mouvement | 34 |
| 2.3.1 Comportement Tribo-Électrique du Contact Électrique Glissant | 34 |
| 2.3.2 Un Système Polarisé | 36 |
| 2.3.3 Frottement et Usure | 37 |
| 2.3.4 Le Film de Transfert | 38 |
| 3 MESURES DE RÉSISTANCES DE CONTACT | 39 |
| 3.1 Caractérisation de la résistivité du film à l'interface | 40 |
| 3.2 La Mesure en \mathbb{U} | 41 |
| 3.3 La Mesure en \mathbb{H} | 43 |
| CONCLUSION | 47 |

| | | |
|------------|--|------------|
| II | ÉTUDE EXPÉRIMENTALE | 48 |
| 1 | MÉTHODE DE MESURE EN Υ | 49 |
| 2 | MOYEN D'ESSAI BI-PION DU LISMMA | 50 |
| 2.1 | Principe du Tribomètre Pion-Disque | 51 |
| 2.2 | Porte-balais de référence et porte-pion pour les balais de puissance | 54 |
| 3 | CHOIX DES PARAMÈTRES D'ESSAI | 55 |
| 3.1 | Instrumentation de Mesure | 55 |
| 3.2 | Choix des matériaux et caractéristiques | 60 |
| 3.3 | Définition de l'Essai Type | 63 |
| 4 | RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX | 66 |
| 4.1 | Résultats de Résistance Statique de Contact | 66 |
| 4.2 | Résistance Statique Moyenne : Tableau de Synthèse | 70 |
| 4.3 | Résultats de Résistance Dynamique de Contact | 71 |
| 4.4 | Analyse Spectrale des Résistances de Contact | 72 |
| 4.5 | Résultats en Frottement | 73 |
| 4.6 | Analyse Spectrale des Coefficients de Frottement | 75 |
| | CONCLUSION | 77 |
| | | |
| III | ANALYSE-DISCUSSION | 78 |
| 1 | CALCUL PRÉALABLE DES RÉSISTANCES THÉORIQUES DE CONTACT STATIQUE | 79 |
| 1.1 | Résistance de Constriction et Résistances des Matériaux Utilisés | 81 |
| 1.2 | Différenciation de la Résistance des Films à l'Interface | 83 |
| 2 | ANALYSE DES RÉSULTATS EN FROTTEMENT | 84 |
| 2.1 | Rappel des Résultats | 84 |
| 2.2 | Influence des Caractéristiques des Oxydes sur le Frottement | 86 |
| 3 | INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES ET MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX | 87 |
| 3.1 | Influence de la Résistivité du Matériau | 87 |
| 3.2 | Influence de la Dureté du Matériau | 88 |
| 3.3 | Influence des Caractéristiques des Oxydes sur le Film de Surface | 89 |
| 3.4 | Influence des Caractéristiques des Oxydes sur le Film de Transfert | 90 |
| 4 | REVÊTEMENTS ET ÉTUDES DES FILMS | 91 |
| 4.1 | Résultats des Disques Revêtus | 91 |
| 4.2 | Résultats entre Résistances de Film et Oxydation | 94 |
| 5 | CORRÉLATION TEMPORELLE ENTRE RÉSISTANCE ET FROTTEMENT | 96 |
| 5.1 | Constat Graphique | 96 |
| 5.2 | Synthèse et Limites du Constat Graphique | 97 |
| 6 | INTERCORRÉLATION ENTRE RÉSISTANCE ET FROTTEMENT | 98 |
| 6.1 | Principe de l'intercorrélation | 98 |
| 6.2 | Mise en Évidence | 101 |
| 6.3 | Synthèse de L'intercorrélation | 104 |
| 7 | SYNTHÈSE GÉNÉRALE | 105 |
| 7.1 | Rôle du film de Transfert | 105 |
| 7.2 | La Lubrification | 106 |
| 7.3 | Perspectives Expérimentales | 107 |
| | CONCLUSION GÉNÉRALE | 108 |
| | | |
| | Bibliographie | 117 |

| | |
|--|-----|
| A Résultats d'intercorrélation normée des signaux de résistance et de frottement pour chaque essai | 118 |
| B Electro-tribomètres VALEO | 130 |
| C Géométrie et Tolérances de Fabrication des Disques d'Essai[L3690] | 133 |
| D Graphes d'analyse fréquentielle des résistances de contact et des coefficients de frottement | 136 |
| E Réglages du tribomètre | 143 |

Note :

Par défaut les unités des grandeurs évoquées seront conformes au système international, sauf précision expresse.

Notations et Symboles Utilisés :

Par ordre alphabétique :

| Notation | Désignation | unité |
|---|---|------------|
| a | Rayon du disque de contact | m |
| C, C', C_1, C_2, C_3 | Constantes (nombre réel) | - |
| E, E_A, E_B | Module d'élasticité (de Young) | GPa |
| e_{film} | Épaisseur de film | m |
| e_{sp} | Tension aux Bornes d'une Spire | V |
| F | Force | N |
| F_1, F_2 | Forces de frottement | N |
| F_c | Force sur le contact de Hertz | N |
| F_N | Force Normale | N |
| $F_{ressort}$ | Force | N |
| F_T | Force Tangentielle | N |
| H, HV, HB | Dureté, Dureté Vickers, Dureté Brinell | $N.m^{-2}$ |
| i, I | Courant | A |
| $I_{deb}, i_{deb}, i_{débité}$ | Courant Débité par la Machine | A |
| i_{exc}, I_{exc} | Courant d'Excitation | A |
| i_{sp} | Courant élémentaire dans une spire | A |
| J_k | Coefficient | - |
| K | Facteur de jauge | - |
| L | Longueur de mesure du paramètre de rugosité | μm |
| L | Inductance | H |
| L | Élongation de la jauge de déformations | m |
| l_A | Longueur du passage conducteur dans le disque | m |
| l_B | Longueur du passage conducteur dans le balai | m |
| l_A, l_B | Libres parcours moyens | Å |
| n | Nombre entier | - |
| P, P_0 | Pressions de vapeur | bar |
| P_k | Coefficient | - |
| $P_m, P(0), P(r)$ | Pressions de contact | MPa |
| r | Distance depuis le centre du disque de contact de Hertz | m |
| r | Résistance | Ω |
| \mathcal{R} | Résistance du stator d'un alternateur | Ω |
| $\mathcal{R}, \mathcal{R}_A, \mathcal{R}_B$ | Rayons de courbure | m |
| \mathbb{R} | Résistance propre du contact | Ω |
| $R(t), R_{systeme}, R_{contact}, R_{equ}$ | Résistances | Ω |
| R_1 | Résistance de contact d'un balai négatif | Ω |
| R_2 | Résistance de contact d'un balai positif | Ω |
| R_1^F | Résistance du film de transfert négatif | Ω |
| R_2^F | Résistance du film de transfert positif | Ω |
| R_1^{FS} | Résistance du film de surface négatif | Ω |

Table .1 - Notations latines utilisées dans ce document - 1

| | | |
|--|--|----------|
| R_2^{FS} | Résistance du film de surface positif | Ω |
| R_1^m | Moyenne de R_1^{m1} et R_1^{m2} | Ω |
| R_2^m | Moyenne de R_2^{m1} et R_2^{m2} | Ω |
| R_1^{mk} | Mesure à t=k heure(s) de résistance statique du film négatif | Ω |
| R_2^{mk} | Mesure à t=k heure(s) de résistance statique du film positif | Ω |
| Ra | Paramètre de rugosité | μm |
| R_A | Résistance du disque | Ω |
| R_B | Résistance du balai | Ω |
| $R_c(z), R_c^A(z), R_c^B(z)$ | Résistance de constriction en fonction de la hauteur z | Ω |
| R_{cal} | Résistance calibrée pour les mesures de courant | Ω |
| R_{film} | Résistance de film | Ω |
| Rm | Résistance mécanique à la rupture | MPa |
| R_{mgn} | Réductance magnétique | H^{-1} |
| R_v | Résistance variable | Ω |
| S, s | Sections | m^2 |
| s_A | Section de passage de courant dans le disque | m^2 |
| s_B | Section de passage de courant dans le balai | m^2 |
| S_r | Surface réelle de contact | m^2 |
| t | Temps | s |
| U, U_1, U_2 | Tensions | V |
| U_{B+}, U_{DYN} | Tension aux bornes de l'Alternateur, de la Dynamo | V |
| U_{F1}, U_{F2} | Tensions des mesures de force de frottement F_1 et F_2 | V |
| U_{iexc} | Tension aux bornes de la résistance calibrée utilisée | V |
| $\mathcal{X}_{corr}, \mathcal{X}_{corr}^-, \mathcal{X}_{corr}^+$ | Valeurs de corrélation | - |
| $X_{corr}, X_{corr}^-, X_{corr}^+$ | Valeurs d'intercorrélation | - |
| $X(t), Y(t)$ | Fonctions | - |
| Y | Limite élastique du matériau (Yield Strength) | MPa |
| Z | Impédance | Ω |
| $z(x)$ | Altitude du profil de rugosité au point d'abscisse x | m |
| Z_A, Z_B | Hauteur | m |

Table .2 - Notations latines utilisées dans ce document - 2

Notations et symboles grecs :

| Notation | Désignation | unité |
|---------------------|--|------------|
| α | Rayon de Holm | m |
| β, γ | Coefficients | - |
| $\theta(t)$ | Position Angulaire du Rotor | rad |
| λ | Facteur d'amortissement | - |
| μ | Coefficient de Frottement (définition d'Amonton) | - |
| ν, ν_A, ν_B | Coefficients de Poisson | - |
| ρ_A | Résistivité du disque | $\Omega.m$ |
| ρ_B | Résistivité du balai | $\Omega.m$ |
| ρ_{film} | Résistivité du film | $\Omega.m$ |
| τ_{RL} | Constante de temps de réponse du système | s |
| ϕ_{ind} | Flux Inducteur | Wb |

Table .3 - Notations grecques utilisées dans ce document.

INTRODUCTION

L'ÉLECTRICITÉ, VECTEUR D'ÉMANCIPATION Le principal rôle attribué à l'électricité est celui de libérer l'Homme (ou parfois l'animal) de l'effort nécessaire à l'accomplissement d'une tâche. À chacune d'elles (ou presque) une solution électrique existe. L'éclairage¹ ne représente ainsi que 12,6 % de la consommation électrique en France en 1992².

Longtemps méconnue, l'électricité³ apparaît très rapidement dans l'automobile avec l'allumage, puis l'éclairage. Les effets magnétiques⁴ associés au passage de courant, connus depuis le début du XIX^e siècle, ont permis la création de générateurs et de moteurs électriques donnant à l'électricité un rôle primordial dans l'automobile et même dans notre société toute entière.

Contexte, Objet et Objectifs

Le sujet proposé, l'étude des variations de la résistance de contact balai-bague, se justifie par la nécessité de maintenir les alternateurs d'automobiles au meilleur niveau de performances possible. À cette fin, le contact électrique balai-bague a une importance particulière puisque le courant débité par la machine est, par construction, proportionnel au courant d'excitation, toutes autres conditions fixées. Or le courant d'excitation est limité par ces résistances de contact comprises dans son circuit, il est donc important de les maîtriser. Afin de compléter judicieusement les progrès apportés aux alternateurs, VALEO souhaite par cette étude acquérir une meilleure compréhension du comportement tribo-électrique du contact graphite - cuivre, dans le but de prévoir et/ou de maîtriser les variations de résistance du circuit d'excitation.

Ce mémoire présentera la situation chez VALEO (premiers constats dès la première moitié des années 1980) et y corrélera certaines découvertes et publications scientifiques proches. En effet, la problématique du contact électrique glissant ne se résume pas qu'aux alternateurs et on trouvera ainsi beaucoup de résultats d'expérimentations menées dans les années 1960 sur des dynamos par exemple. De même, le comportement tribologique du contact métal-graphite ou cuivre-graphite se retrouve dans diverses applications non automobiles. Une méthode de caractérisation sera développée, une campagne d'essais permettra de mettre en évidence les phénomènes influents et proposera des voies d'approfondissement.

Jusqu'à présent, les travaux menés sur ce sujet ont été limités par les moyens technologiques, même si quelques améliorations ont été apportées empiriquement ou expérimentalement au couple balai-bague. Il devient aujourd'hui fondamental de comprendre et d'expliquer le comportement tribo-électrique du contact, dans le but espéré de paramétrer le contact pour l'optimiser. Ce mémoire présentera une nouvelle approche de l'analyse des résultats et les conclusions sur certaines des lois influençant les phénomènes au contact.

1. La première lampe a été expérimentée par J.B. Lindsay en 1835, puis l'ampoule électrique a été mise au point et généralisée par les travaux de MM. J. SWAN et T. EDISON à la fin des années 1870

2. http://www.iddri.org/Publications/Les-cahiers-du-CLIP/clip_7.pdf

3. Electricité : de <<elektron>>, en grec ηλεκτρον ce qui signifie ambre jaune, composé naturel qui est le siège de phénomènes électrostatiques après qu'on l'a frottée [1]

4. Magnétique : des pierres de Magnésie (Grèce), ayant la propriété d'attirer les métaux ferreux [1]

Première partie

**ANALYSE DE L'ETAT DE L'ART ET DES
CONNAISSANCES**

1 GÉNÉRALITÉS SUR LES MACHINES ÉLECTRIQUES

Un générateur de courant est une machine électrique convertissant une puissance mécanique (généralement en rotation) en puissance électrique (un courant donné disponible sous une tension donnée). Les générateurs couramment montés sur les véhicules automobiles sont de deux modèles principaux : les dynamos et les alternateurs⁵. Ces deux machines se définissent et s'opposent dans leur conception par deux principes simples illustrés en figure I.1.

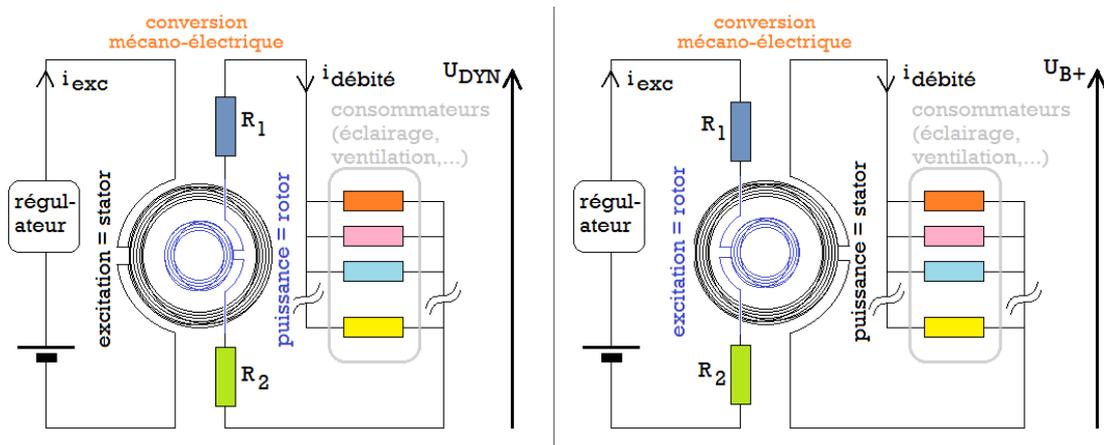


Figure I.1 - Présentation du principe général de fonctionnement de la dynamo et de l'alternateur faisant apparaître la position des résistances de contact variables R_1 et R_2 qui nous intéressent.

À Gauche - La dynamo : les contacts électriques glissants de résistance R_1 et R_2 se trouvent dans le circuit de puissance.

À Droite - L'alternateur : les contacts électriques glissants de résistance R_1 et R_2 se trouvent dans le circuit d'excitation.

Premier principe :

- La dynamo génère dans sa partie **fixe** (stator = inducteur) un champ magnétique **fixe** en direction et variable en valeur qui baigne la partie **mobile** (rotor = induit) qui est le siège des courants induits
- L'alternateur génère dans sa partie **mobile** (rotor = inducteur) un champ magnétique **tournant** et variable en valeur qui baigne la partie **fixe** (stator = induit) qui est le siège des courants induits

Deuxième principe :

- Dans la dynamo, le courant **induit** (= courant débité) traverse les contacts électriques glissants de résistance variable.
- Dans l'alternateur, le courant **inducteur** (= courant d'excitation) traverse les contacts électriques glissants de résistance variable.

Les différences de principe de fonctionnement de chaque type de générateur entraîne une construction spécifique que nous allons détailler afin de percevoir à la fois les différences

5. La dynamo à 3 balais dont l'excitation est reprise par un courant inter-spires de l'induit, l'alternateur sans balais où le bobinage excitateur est fixe et les machines à excitation constante comme les volants magnétiques ne seront pas abordés dans ce document

essentielles mais aussi les points communs entre elles. Ces points communs permettront d'extrapoler pour l'alternateur des bases de connaissances issues de la bibliographie existant sur les contacts électriques glissants de l'époque des dynamos.

1.1 La Dynamo

La dynamo, ou générateur dynamoélectrique, fonctionne suivant un procédé mis au point en 1869 par Zénobe Gramme d'après des travaux d'Antonio Pacinotti. La machine se compose d'un rotor (figure I.2), l'induit, et d'un stator, l'inducteur. La machine est à flux radial, créé par les deux, trois ou quatre pôles répartis angulairement.

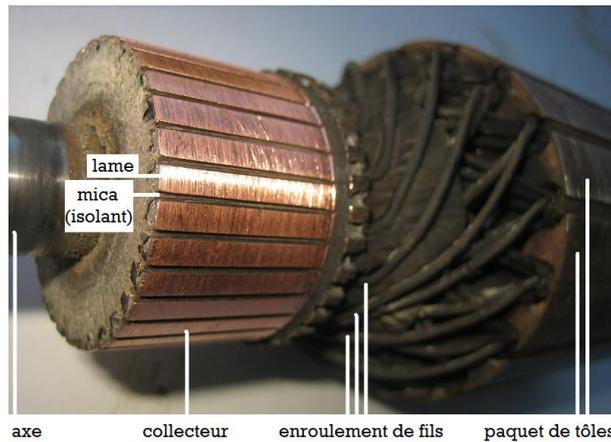


Figure I.2 - Rotor (induit) de la dynamo: vue de détail

FONCTIONNEMENT : Lorsqu'un courant d'excitation I_{exc} parcourt les inducteurs de la dynamo, ces derniers créent un champ magnétique dont le flux $\phi_{ind} = \frac{nI_{exc}}{R_{mgn}}$ (avec R_{mgn} la réluctance magnétique du circuit et n le nombre de spires de l'inducteur) se déplace diamétralement d'un pôle à l'autre en traversant l'induit et les entrefers, avant de boucler via la carcasse de la dynamo. Au centre de la machine, la spire active de l'induit va voir un flux variable au cours de sa rotation, et la tension e_{sp} générée à ses bornes vaut dans tous les cas :

$$e_{sp} = -\frac{d\phi_{ind}}{dt} \quad (1)$$

Si un consommateur est présent dans le circuit de la spire, un courant induit i_{sp} le traversera. La commutation⁶ d'une spire active à l'autre est nécessaire pour que la spire active voie la tension à ses bornes e_{sp} toujours du même signe et ceci permet d'assurer grâce au nombre élevé de spires une tension quasi-constante (à vitesse de rotation donnée) égale à U_{DYN} . C'est le collecteur à lames en cuivre visible sur la figure I.2 qui assure cette commutation.

Les balais glissant sur le collecteur (figure I.3) assurent dans ce cas un contact de puissance : ils sont larges (15 à 20 mm) et épais (6 à 8 mm) afin de maintenir une densité de

6. La commutation est le phénomène de renversement forcé du courant dans la spire lorsque le flux à travers celle-ci s'annule (la spire tournant dans le champ, elle se retrouve parfois dans le même plan que la direction du champ) afin que le champ magnétique induit génère dans cette spire un courant induit qui soit toujours dans le même sens quelle que soit la position angulaire de la dite spire

courant de l'ordre de 20 à 40 Ampères/cm² à travers la surface apparente de contact. Ils sont usuellement composés de 40 à 60% de cuivre, le complément étant du graphite avec éventuellement quelques additifs pour stabiliser l'évolution de la résistance au cours du temps, l'oxydation, etc. Au niveau du contact balai-collecteur, des arcs électriques visibles (à l'œil nu) peuvent se produire en cas de commutation difficile, entraînant une usure électrique accélérée. L'usure mécanique est essentiellement influencée par les défauts géométriques du collecteur (retrait ou dépassement d'une lame en cuivre par rapport à ses voisines) et par le passage parfois un peu irrégulier du balai d'une lame à la suivante au cours du fonctionnement.

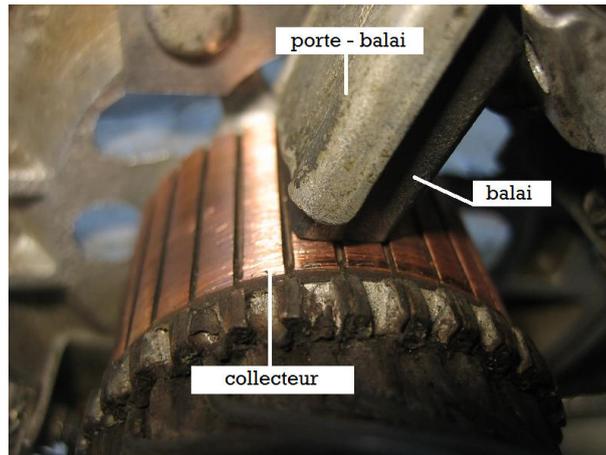


Figure I.3 - Le contact balai-collecteur à l'arrière de la dynamo

La dynamo nécessite un conjoncteur-disjoncteur pour l'isoler à bas régime, et elle est régulée via un régulateur de tension qui hache le courant d'excitation à un rapport cyclique compris entre 0 (surtension) et 100% (débit maximal). Un régulateur de courant limite le courant maximal afin d'éviter la détérioration de la machine.

1.2 L'Alternateur

Un alternateur est un générateur électrique dont le principe a été mis au point en 1831 par Michael Faraday. La machine se compose d'un rotor, ou inducteur, et d'un stator, l'induit (figure I.4). Le rotor est constitué d'un enroulement de fils de cuivre, un bobinage et de pièces métalliques appelées cornes polaires enveloppant ce bobinage et guidant le flux magnétique créé par le bobinage lorsqu'il est parcouru par un courant. Le stator est une pièce cylindrique composée de boucles de fils de cuivre cheminant dans une pièce constituée de feuilles de tôle ferromagnétique juxtaposées (paquet de tôles) qui est traversée par le flux venant du rotor. Le flux traversant des boucles (spires) de fil conducteur, elles créent une tension induite aux bornes de chaque boucle. Le stator est très proche du rotor, l'espace entre les deux étant appelé entrefer et n'excédant pas quelques dixièmes de millimètres.

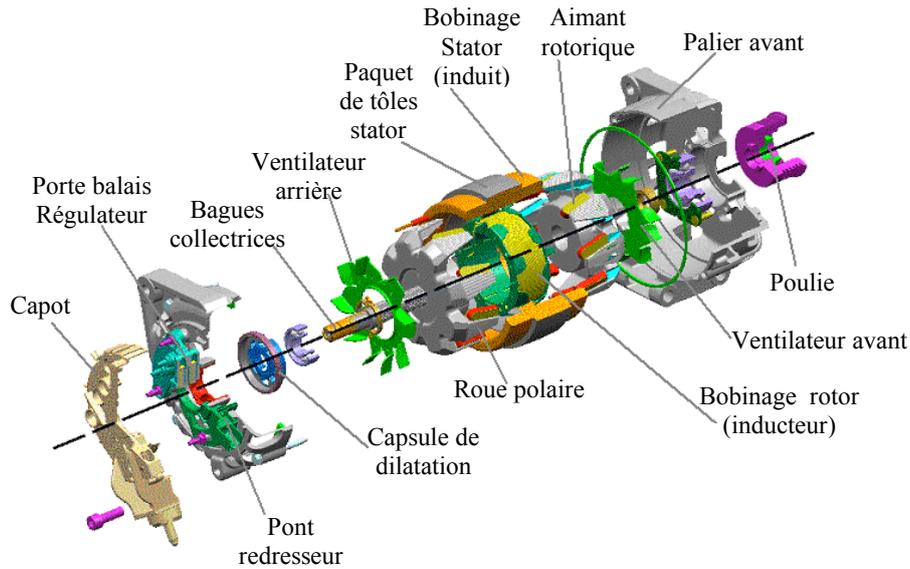


Figure I.4 - Architecture générale d'un alternateur

FONCTIONNEMENT : Lorsque l'enroulement de la bobine est parcouru par un courant I_{exc} constant, il y a création d'un champ magnétique (proportionnel à I_{exc}) qui est canalisé par les cornes polaires vers le stator. Le rotor étant en rotation, le stator voit un champ variable et dans chacune des spires du bobinage stator est induite une tension :

$$e_{sp} = -\frac{d\phi_{ind}}{dt} \quad (2)$$

Si un consommateur est connecté aux bornes de cette spire, un courant débité i_{sp} alternatif peut être mesuré. S'il y a plusieurs spires baignées par ce flux inducteur, e_{sp} et i_{sp} seront d'autant plus élevés. Plusieurs spires formant un groupe appelé **phase**, s'il y a une ou plusieurs phases décalées angulairement sur le stator, l'ensemble de ces courants subit une dernière transformation ; on effectue ce que l'on appelle un redressement double alternance par pont de diodes. Cette opération permet que le courant de sortie soit toujours positif et on ne garde ensuite que la partie supérieure à la tension du réseau de bord. Les phases multiples régulièrement réparties sur la machine permettent de limiter les ondulations de courant et de tension aux bornes de la machine (voir principe figure I.5).

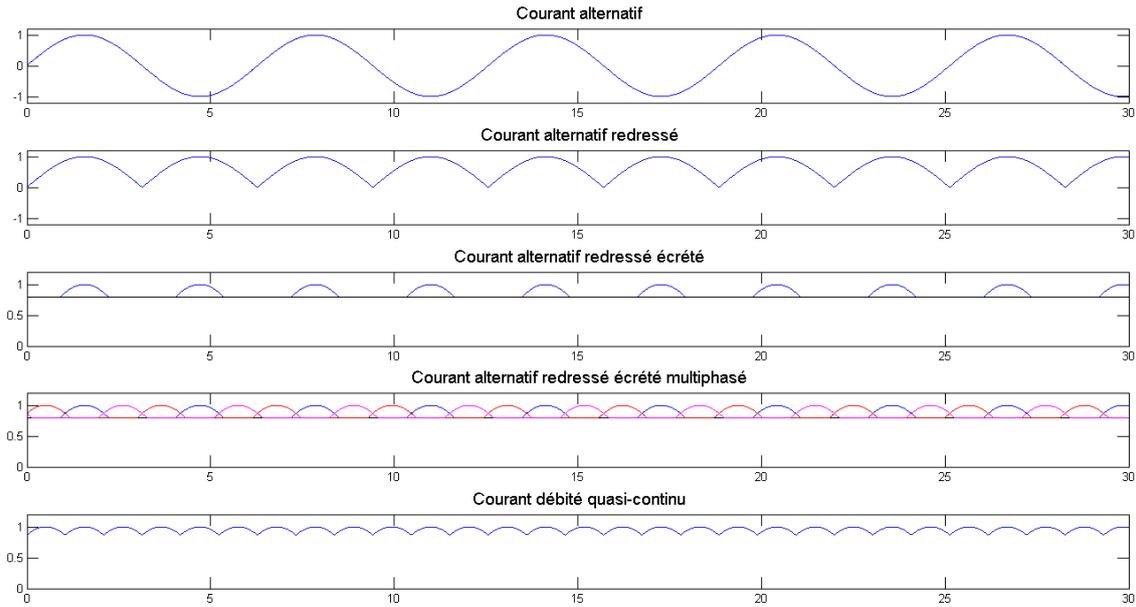


Figure I.5 - Principe du redressement du courant induit dans le stator

En définissant \mathcal{R} comme la résistance du stator et de l'ensemble des consommateurs qui y sont potentiellement branchés, C' une constante et $\theta(t)$ la position angulaire de la machine, nous pouvons exprimer une relation caractéristique entre I_{exc} et la tension U_{B+} aux bornes de l'alternateur :

$$U_{B+} = \mathcal{R}i_{débité} = C' I_{exc} \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

Pour éviter une surtension et maintenir la tension débitée constante, on cherche à contrôler $i_{débité}$ (puisque \mathcal{R} est dépendante des besoins en courant des consommateurs alimentés par l'alternateur et n'est pas pilotable) et pour ce faire on ne peut pas influencer sur les paramètres machine ni sur $\frac{d\theta}{dt}$ qui ne dépend que de la vitesse de rotation du moteur. On règle donc la machine en contrôlant l'intensité d'excitation. À cette fin, le régulateur assure une correction électronique de la valeur du courant d'excitation, afin de corriger U_{B+} .

Si la résistance des consommateurs est suffisamment élevée pour que la machine ne soit pas à pleine charge, le régulateur mesure U_{B+} et corrige I_{exc} pour maintenir U_{B+} constant. C'est une régulation en mode $CV = Constant Voltage$ c'est à dire à tension constante. Si la résistance équivalente des consommateurs est trop faible, la tension U_{B+} chute et le régulateur ne règle plus I_{exc} qui devient maximal. C'est un mode de fonctionnement dit $CC = Constant Current$, c'est à dire à courant d'excitation (quasi-)constant et maximal. Si la résistance équivalente augmente à nouveau on repasse en régulation de mode CV .

La tension du circuit d'excitation ayant un maximum égal à U_{B+} , on déduit de l'expression (3) qu'en cas de variations de la résistance du circuit d'excitation, nous aurons comme conséquences des variations de I_{exc} et donc des variations de débit de la machine si celle si se trouve à pleine charge et à excitation maximale.

Le courant d'excitation est amené à la bobine excitatrice par un jeu de contacts glissants situés à l'arrière de la machine (figure I.6). Ces contacts sont formés d'un balai fritté glissant sur une bague en alliage de cuivre. Le balai est constitué d'environ 30% de cuivre et de 70% de graphite, le tout compacté suivant la verticale. Une tresse souple assure le passage du courant du régulateur au balai, et un ressort maintient un effort (2,8 N à 2 N en fin de vie du balai) plaquant le balai sur la bague tout au long de sa vie. La défaillance d'un balai se caractérise d'ailleurs par la perte du contact ainsi formé. Les balais assurent sur le passage d'un courant de quelques ampères, soit une densité de courant faible, inférieure à 15 A/cm². Le schéma du montage est visible sur la figure I.7.

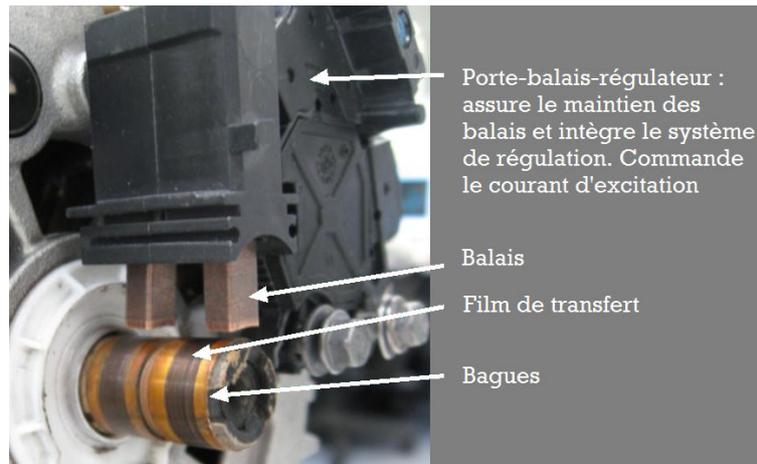


Figure I.6 - Vue arrière de l'alternateur: paire de contacts balai-bague

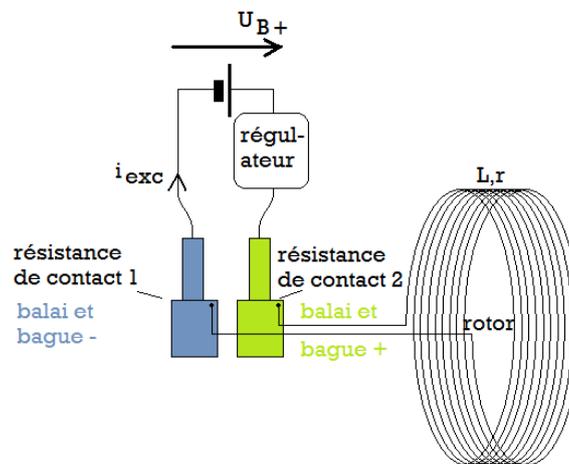


Figure I.7 - Schéma électrique de l'alimentation du rotor

1.3 Contraintes imposées par la Résistance des Contacts Électriques Glissants

Nous avons vu précédemment que sur l'alternateur $C' i_{exc} \frac{d\theta}{dt} = \mathcal{R} i_{débité}$ (équation (3)). On a donc pour l'alternateur une proportionnalité entre i_{exc} et $i_{débité}$. Or toute augmentation de résistance de contact entraîne une baisse du courant d'excitation, donc une baisse du courant débité et une baisse des performances de l'alternateur.

Les résistances de contact jouent par conséquent un rôle de premier ordre dans le maintien des performances pendant le fonctionnement des alternateurs. C'est la raison pour laquelle depuis de nombreuses années, les scientifiques ont réalisé des travaux sur les pertes par résistance de contact, dont beaucoup ont été menés sur les Machines à Courant Continu (dynamos y compris).

Par ailleurs, les besoins en énergie électrique ont crû de manière presque exponentielle au cours des dernières décennies : les puissances des générateurs ont suivi, de 105W en 1935 à 750 W en 1975 et 3500 W aujourd'hui, sur des autos haut de gamme. Ces augmentations ont imposé aux constructeurs d'améliorer leurs machines, pour alimenter un nombre de composants toujours plus important tout en limitant la puissance mécanique prélevée. De surcroît, les équipements électroniques omniprésents sont très sensibles à des variations de tension.

Il est donc extrêmement important de créer à la fois une grande quantité de courant électrique et de le faire à une tension toujours plus stable et toujours mieux régulée lors des variations de charge du circuit électrique. Toute non-performance est très négativement perçue par l'utilisateur, et donc également par le constructeur du véhicule qui, aux yeux de l'automobiliste, en a la responsabilité.

Aujourd'hui les contacts électriques glissants sont devenus un verrou technologique de par l'optimisation déjà très poussée des autres parties de la machine, et de par les contraintes de fonctionnement et d'encombrement qui empêchent tout sur-dimensionnement.

1.4 Constat des perturbations dues aux Variations de Résistance de Contact

Dès le milieu des années 1980, des rapports internes des sociétés du groupe VALEO (Ducellier, Paris-Rhône ou SEV-Marchal) montrent que l'on constate parfois des variations inhabituelles du débit de la machine lorsque celle-ci, quelque modèle que ce soit, se trouve en plein champ. Ces variations sont parfaitement mises en évidence, par exemple par l'essai suivant (voir figure I.8) réalisé sur deux machines comparables.

L'essai de l'alternateur se déroule à 100°C de température ambiante et plein champ (excitation maximale). L'alternateur est entraîné à différentes vitesses correspondant à chacun des paliers visibles sur la courbe : premier palier de 30 min à 1800 tr/min, deuxième palier de 30 min à 3000 tr/min, troisième palier de 30 min à 6000 tr/min et quatrième palier de 30 min à 12000 tr/min.

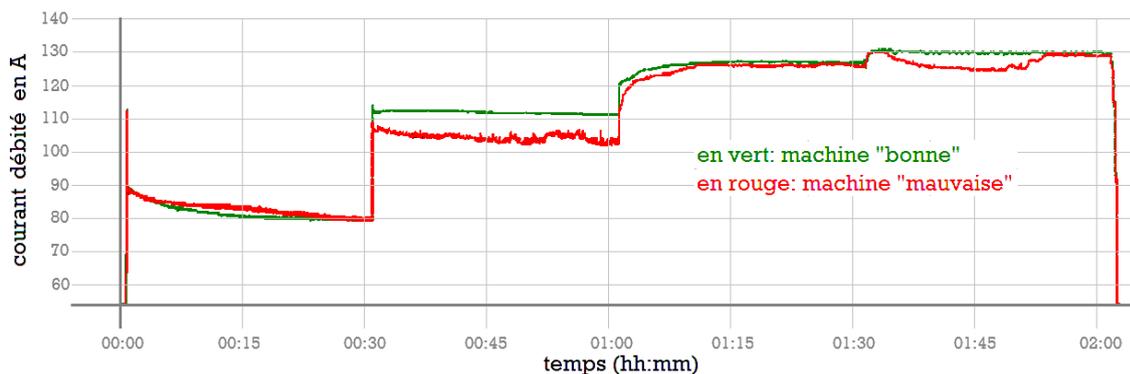


Figure I.8 - Superposition de deux courbes de débit. Machines identiques, conditions expérimentales identiques

Le courant débité est mesuré pendant l'essai et ses variations se manifestent de trois manières représentées schématiquement ci-dessous figure I.9 : variations de débit, chute de débit et combinaison des deux. Nous pouvons constater sur la figure I.8 des différences singulières de fonctionnement entre les 2 machines testées et dont les courbes de courant débité sont présentées.

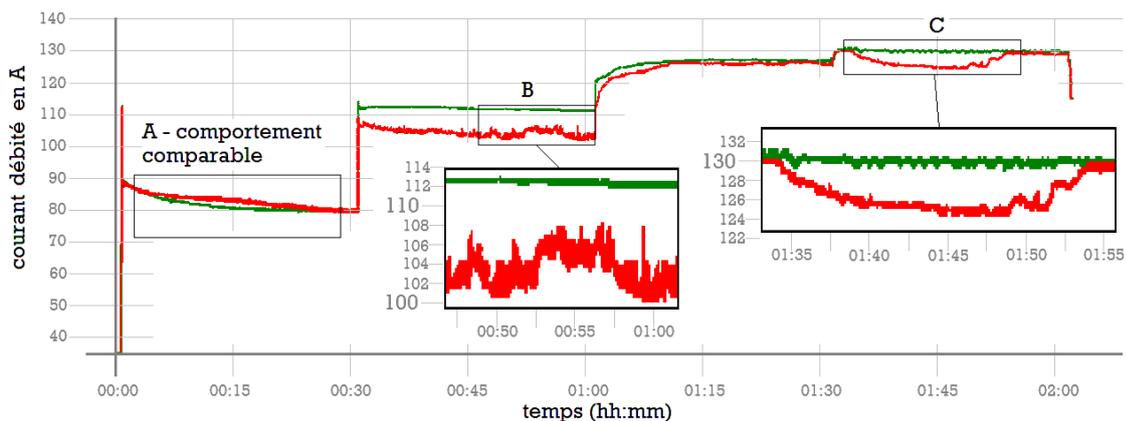


Figure I.9 - Zoom sur les différents cas de figure

Un zoom sur les zones d'anomalies (figure I.9) permet la comparaison entre "bon" et "mauvais" comportement :

- En **zone A** le comportement des deux machines est comparable. Une petite différence de performance est admissible d'une machine à l'autre de la population.
- En **zone B** il y a une perte de débit : près de 103 A (en moyenne) au lieu de 113 A environ. La perte représente près de 9 %. Il y a aussi une forte variabilité du débit entre 100 et 108 A.
- En **zone C** il y a une perte de débit élevée pendant près de 18 minutes avec un minimum à 124 A environ au lieu de 131. Ce phénomène est typique des "décrochements" visibles à haute vitesse. Les décrochements peuvent survenir aléatoirement, durer de quelques dizaines de secondes à quelques minutes, puis disparaître avant de réapparaître éventuellement.

L'origine de la perturbation a pu être progressivement isolée et elle est apparue comme étant localisée au contact balai-bague du circuit d'excitation. En effet, en effectuant une mesure de la chute de tension au contact, on constate que les variations de cette tension de contact sont concomitantes aux variations du courant débité.

Le courant d'excitation I_{exc} n'étant pas régulé dans le cas de fonctionnement plein champ et le phénomène étant apparu sur tous types de régulateurs de toutes catégories de puissance, il apparaît que le mode de fonctionnement du régulateur n'influence pas les variations de résistance de contact.

On ne constate aucun déphasage entre les variations de courant d'excitation et les variations de la tension de contact, on peut évincer l'hypothèse d'un comportement globalement capacitif ou globalement inductif du contact (nous rappelons que le courant traversant un condensateur vaut $i = C \frac{dU}{dt}$ avec C la capacité du condensateur). La variation de la résistance de contact semble la cause la plus probable de ce phénomène et des pertes de performances qu'il génère. C'est donc sur les variations de résistance de contact que nous axerons nos travaux qui débiteront dans le paragraphe suivant par une description des balais et bagues utilisés actuellement sur les alternateurs VALEO. .

1.5 Matériaux et Caractéristiques des Balais et Bagues

Le contact balai-bague est situé à l'arrière de l'alternateur. Le porte-balai-régulateur en matière plastique noire maintient les balais tout en les isolant électriquement entre eux. Le système est démontable et balais et bagues vont être présentés successivement.

1.5.1 Les balais

Le balai actuellement utilisé sur les applications alternateur de VALEO est une nuance fournie par AVO-Carbon, anciennement Carbone-Lorraine, la nuance C7364 composée de, en masse :

- 30% de cuivre
- un graphoïde amenant à un taux de graphite proche de 70%
- un agent polissant de nature non-connue (quelques pourcents)

Le graphite a un liant dont les caractéristiques ne sont pas en notre possession. La figure I.10 représente un balai série avec ses dimensions caractéristiques.

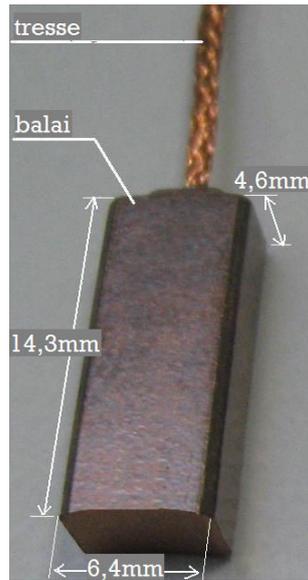


Figure I.10 - Balai Carbone-Lorraine C7364

La figure suivante I.11 représente une vue en coupe du balai selon un plan normal à l'axe du rotor dans sa position de fonctionnement, qui permet de mettre en évidence l'arrangement interne de cuivre et de graphite.

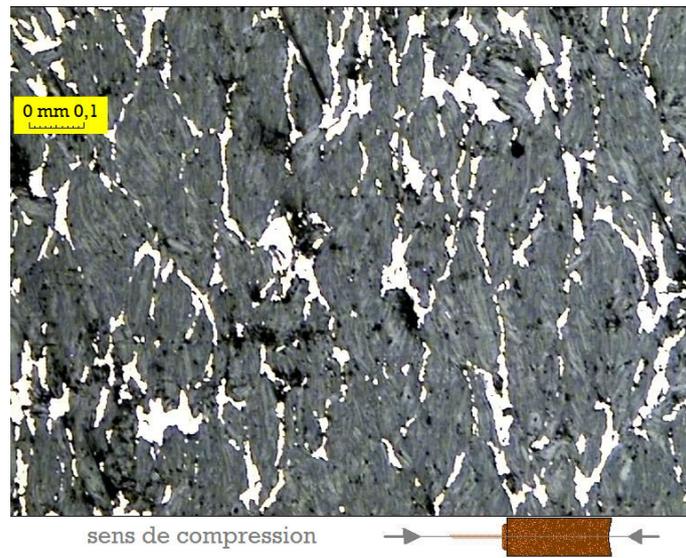


Figure I.11 - Balai Carbone-Lorraine C7364 en coupe

Afin de caractériser l'apparition du phénomène de variations des Résistances de Contacts ou pas en fonction du taux de cuivre dans le balai, différentes nuances ont été étudiées chez VALEO. Composées de 40, 60, 70, 75, 80, 85, 90 et 95% de cuivre (en masse), ces nuances conservent la même géométrie que le balai série C7364, à la longueur près qui peut parfois être de 15,3 mm contre 14,3 mm. Deux nuances sont présentées ci-dessous en coupe suivant le même plan que l'image du balai de série présentée en figure I.11.

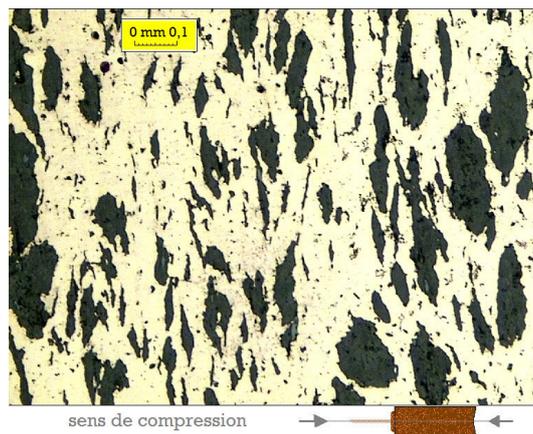


Figure I.12 - Vue en coupe de la nuance C8673-02 composée de 80% de cuivre.

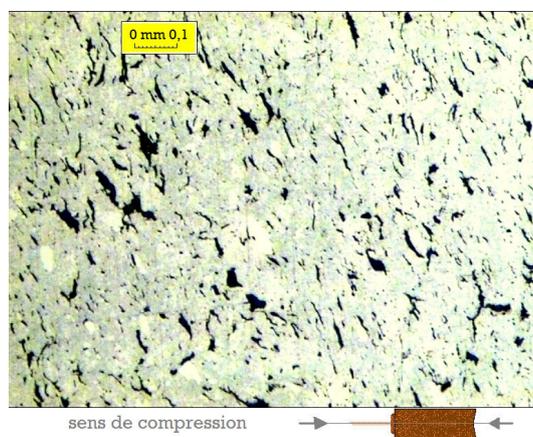


Figure I.13 - Vue en coupe de la nuance D7492 composée de 95% de cuivre.

Les figures précédentes I.12 et I.13 donnent un aperçu de la répartition cuivre (en clair) et graphite (en sombre) en fonction du taux de cuivre ,et ce, par rapport au balai série précédemment présenté. Les balais fortement chargés en cuivre ont montré de bons résultats en terme de résistance électrique de contact avec la bague, mais les plus fortes nuances (90 et 95% de cuivre) ont été interdites d'utilisation.

En fonctionnement, le contact générait de très fortes étincelles causées par les soudures et ruptures des points de contact adhésif (phénomène de grippage). L'échauffement local important et l'usure extrême de cette configuration entraînaient, par ailleurs, une défaillance rapide du contact.

1.5.2 Les Bagues

La bague sur laquelle frotte le balai est solidaire du rotor (pièce en rotation). C'est une pièce massive usinée qui est composée de cuivre désoxydé au phosphore Cw024a norme DIN EN 12449 et est maintenue par un surmoulage (thermoplastique ou thermodurcissable) réalisant les fonctions de support mécanique et d'isolation électrique de la bague. Les dimensions de la bague sont données ci-dessous en figure I.14 .

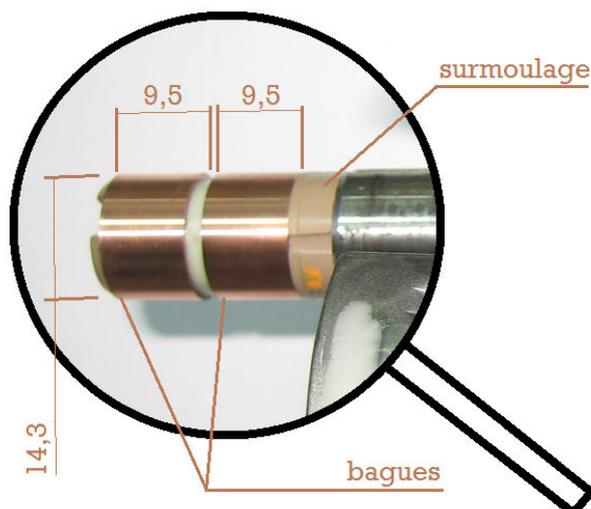


Figure I.14 - Zoom sur les bagues en partie arrière du rotor et dimensions de celles-ci.

Le matériau de la bague est un standard généralisé chez VALEO à toute la gamme d'alternateurs pour automobiles. Cependant, à titre expérimental, des bagues constituées de matériaux différents sont néanmoins réalisables en toutes petites séries (quelques pièces à quelques dizaines de pièces) pour des essais de recherche.

2 LES CONTACTS ELECTRO-MÉCANIQUES GLISSANTS

Après la présentation des éléments mécaniques du contact électrique glissant que nous étudions, nous allons présenter un état de l'art des contacts électriques glissants. Ce type de contact est composé de deux éléments qui sont en mouvement relatif et qui doivent, de plus, assurer une continuité électrique pendant le fonctionnement. Aux contraintes mécaniques que nous allons présenter dans un premier temps s'ajoutent des contraintes purement électriques que nous aborderons ensuite. Enfin, nous présenterons les interactions fortes entre elles, leurs effets sur le contact et les phénomènes les plus importants.

2.1 Tribologie Générale du Contact sans Courant

La tribologie étudie les contacts entre matériaux, en statique et en dynamique, ainsi que le frottement, l'usure et la lubrification éventuelle de ces contacts. La mécanique d'un contact glissant sans courant relève des lois de tribologie générale. Ces lois dépendent du matériau considéré (caractéristiques propres) et de son antagoniste (influence sur le mode de frottement, d'usure, etc.). En effet la notion de **couple** est extrêmement importante en tribologie.

2.1.1 Frottement et État de Surface

Le frottement résulte de la mise en contact de deux matériaux. Pour avoir un glissement relatif, si l'un des deux est fixe, une force doit être appliquée sur l'autre (le poids peut suffire si le système est en pente ou soumis à la force centrifuge par exemple). On appelle force

tangentielle F_T la force nécessaire au glissement appliquée suivant la tangente au contact. On appelle force normale F_N (non nulle) la force appliquée normalement sur le contact (poids et/ou forces extérieures).

Dans le cas général, F_N est connue et on mesure F_T . F_T résulte des interactions entre les surfaces en contact et dépend en général de la vitesse de glissement, de la présence de lubrifiant, de la température [27], de la phase dans laquelle se trouve le contact (rodage, régime établi, grippage, etc.).

La force tangentielle F_T peut être décomposée en deux forces additionnées que sont la composante adhésive de la force tangentielle et la force de déformation plastique [27] qui est, en d'autres termes, la force due au phénomène d'abrasion par le matériau le plus dur sur le matériau antagoniste. La figure I.15 montre le schéma de principe d'un contact tribologique en mouvement.

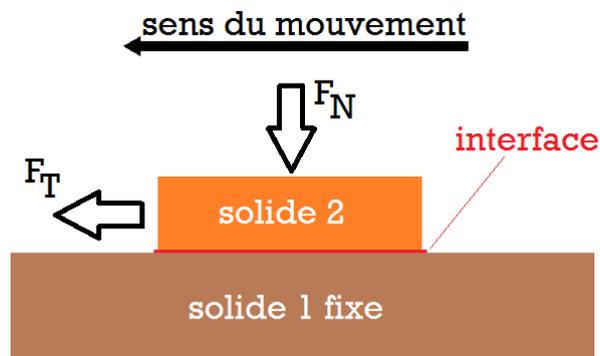


Figure I.15 - Schématisation d'un contact tribologique à une seule direction de mouvement

Amonton définit le **coefficient de frottement** μ comme le rapport de ces deux forces :

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} \quad (4)$$

Si $F_T = 0$ il n'y a pas de frottement, μ n'a pas de définition. Dans le cas général $\mu \in]0; 1]$. Si l'on considère qu'il y a un déplacement d'un solide couvert d'aspérités sur un deuxième solide également couvert d'aspérités, il y a création et disparition de zones de contact. Les zones en question se déforment localement élastiquement et/ou plastiquement. Le coefficient de frottement est un moyen de caractériser l'interaction de frottement globale des matériaux lors du déplacement relatif de ceux-ci.

Lorsque F_N est appliquée sur les éléments en contact, les aspérités en contact se déforment sous les contraintes de contact pour assurer la portance et la surface réelle de contact dépend donc des caractéristiques mécaniques (module d'élasticité E , limite à la rupture R_m) des matériaux et de l'état de la surface : type et répartition des aspérités et des défauts de forme, défauts d'ondulation, dureté superficielle. Il est couramment admis que la surface réelle de contact S_r peut être approximée par :

$$S_r = \frac{F_N}{HB} \quad (5)$$

où HB est la dureté Brinell du matériau le plus doux/tendre/mou [27]. Le nombre de points de contact augmente lors du mouvement (cisaillement de contact), c'est caractéristique de la phase de rodage (accommodation des surfaces en contact). Demkin [32] précise que le gain en termes de nombre de points de contact mécanique augmente de 10 à 15% en mouvement par rapport au contact statique.

Les différents modèles font intervenir F_N comme un facteur de premier ordre sur l'aire de la surface mécanique de contact et dans le même temps, la force de frottement est également liée à la surface **réelle** de contact [27]. On a donc une dépendance multiple des paramètres F_T , F_N , S_r . Il est même postulé que pour $C = \text{constante}$ $F_T = CS_r$ où S_r est une fonction de F_N .

En posant Y la limite élastique du matériau (*Yield Strength*) Bowden & Tabor [31] définissent la dépendance de F_T à F_N comme :

$$F_T = YS_r = \frac{Y}{HB} F_N \quad (6)$$

Ce qui revient à dire que :

$$S_r = \frac{F_T}{Y} \quad (7)$$

et aussi que le coefficient de frottement tel que défini par Amonton vaut également

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} = \frac{Y}{HB} \quad (8)$$

Le coefficient de frottement ne dépend donc pas en première approximation, des conditions expérimentales, mais seulement des matériaux, de leur état cristallographique, état de surface et rugosité, ainsi que de F_N . Le coefficient de frottement ne dépend même pas de la géométrie des matériaux en jeu. La dépendance aux conditions expérimentales n'est importante que si l'on change de régime de fonctionnement : frottement sec ou lubrifié, adhésion ou abrasion, etc.

Chaque surface dispose de caractéristiques qui lui sont propres, dont certaines découlent du choix du procédé de mise en forme. Les défauts géométriques, la rugosité, la cristallographie, les propriétés mécaniques et l'état de contraintes peuvent ainsi être modifiés par les différentes opérations appliquées sur un matériaux, que ce soit des opérations mécaniques (usinage, polissage, découpe), chimiques (décapage, oxydation, diffusion moléculaire) ou thermiques (trempe, recuit, revenu).

Parmi elles, la rugosité⁷ est un paramètre de qualité qui caractérise les variations d'altitude des points de la surface d'un matériau. Ce paramètre est couramment mesuré en

7. Le lecteur pourra se référer aux normes ISO 4287 et 4288, ISO12085 et 13565 pour davantage de détails sur les mesures et la caractérisation des profils de rugosité

déplaçant un palpeur sur la surface, palpeur qui associe à chaque pas de déplacement x l'altitude $z(x)$ mesurée.

Un des principaux paramètres de rugosité est le Ra , associé à une longueur de base L , défini comme suit :

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \quad (9)$$

Cette valeur est la moyenne arithmétique des écarts à la ligne moyenne sur la longueur de profil L [37], [30]. La rugosité des bagues est imposée par construction, c'est un paramètre important du contact. Le Ra des bagues, mesuré suivant une génératrice du cylindre que forme la bague, doit en toutes circonstances être compris entre 0,8 et 1,6 μm .

Thomson & Turner [9] ont mis en évidence que le défaut de forme de la bague, même de faible amplitude, peut générer suffisamment de sauts de balai pour causer de gros dommages aux surfaces du balai et de la bague par araquage excessif.

Les recherches VALEO ont révélé que ce sont les défauts de forme locaux qui sont la cause des sauts de balais et pas les défauts de forme globaux [16]. C'est la raison pour laquelle VALEO impose un défaut maximum de 6 μm sur 15 ° d'angle sur les bagues (et 0,02 mm sur 360 °).

2.1.2 L'Usure et le Troisième Corps

La mise en mouvement du contact électro-mécanique va générer un nouvel élément, appelé troisième corps, qui va fortement influencer l'évolution des caractéristiques mécaniques (et électriques) du contact. Ce troisième corps est essentiellement composé de débris issus des deux solides en contact (résultat de l'usure due au frottement) et peut contenir des éléments résultant d'une pollution extérieure (environnement de fonctionnement de la machine électrique).

L'usure et l'adhésion entre matériaux peut générer à l'interface du contact un film de transfert également appelé patine. On en retrouve sur les deux éléments en contact, mais il peut avoir une composition différente sur chacun. D'après Féchant [45], le frottement sec détruit les écrans de surface des solides en contact, c'est le "décapage".

Les particules arrachées de l'une et l'autre des surfaces en contact sont transposées dans l'interface et sont retenues dans le contact (ce qui entraîne la création du film de transfert), ou bien éliminées (c'est "l'usure" que l'on constate par accumulation de débris hors de la zone de contact) ou remises en circulation dans le contact (c'est le troisième corps). Il apparaît donc important de bien connaître les surfaces en contact pour évaluer les caractéristiques du film de transfert.

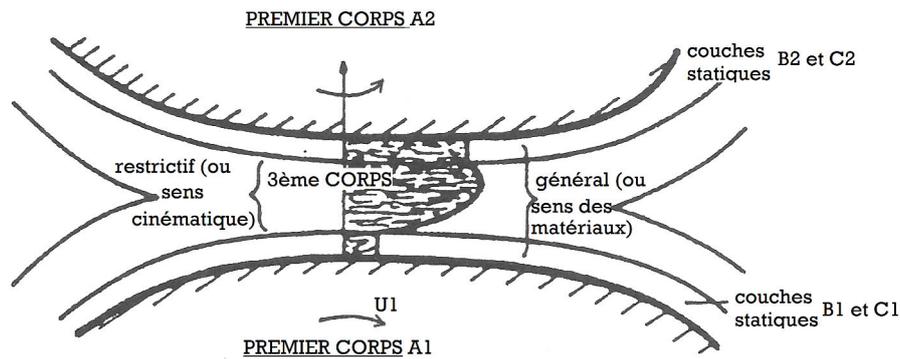


Figure I.16 - D'après [45], [46] Représentation schématique d'un système avec troisième corps. A1 et A2 sont les solides en contact, B1-C1 et B2-C2 sont les films de transfert respectivement déposés sur A1 et A2, le troisième corps (suivant la définition cinématique) est le siège du gradient de vitesse visant à accommoder les vitesses de surface U1 et U2 des couches statiques B1-C1 et B2-C2.

2.1.3 La Théorie de Hertz

La rugosité est une succession de pics et de creux mesurés suivant une direction donnée. Vue en trois dimensions, une surface est constituée d'une multitude de pics et de creux, à des altitudes différentes. En zoomant sur ceux-ci, chaque pic est une aspérité dont le plus courant modèle est celui d'une protubérance à extrémité sphérique. Or, lorsqu'un solide sphérique ou cylindrique est en contact avec un deuxième solide plan, sphérique ou cylindrique, la théorie de Hertz [38] peut être utilisée pour le calcul des surfaces de contact, des pressions et contraintes résultantes dans des conditions dont les hypothèses sont rappelées ci-après⁸ :

- Les surfaces en contact sont topographiquement lisses, continues et non conformes (c'est-à-dire que leurs rayons de courbures ne sont pas très proches).
- Les déformations induites restent de petites déformations et dans le domaine élastique des matériaux.
- Les déformations n'engendrent pas de frottements
- Les solides en contact sont semi-infinis (c'est-à-dire que les dimensions du massif portant les zones de contact sont très grandes devant les dimensions des zones de contact)

En considérant un contact aspérité bague contre aspérité balai avec des aspérités hémisphériques, Hertz donne un modèle équivalent de type contact sphère-plan où le rayon de courbure de la sphère équivalente est donné par :

$$\frac{1}{\mathcal{R}} = \frac{1}{\mathcal{R}_A} + \frac{1}{\mathcal{R}_B} \quad (10)$$

avec \mathcal{R}_A et \mathcal{R}_B les rayons de courbure des aspérités de la bague et du balai qui sont en contact l'une avec l'autre. Ce modèle équivalent sphère-plan est représenté figure I.17. Le

8. Nota : la théorie de Hertz peut s'appliquer à un contact macroscopique ou microscopique tant que les hypothèses sont vérifiées

modèle de Hertz donne un disque de contact entre les deux solides tel que $a \ll \mathcal{R}$ le rayon du disque est petit devant \mathcal{R} le rayon de courbure du contact ($a \ll \mathcal{R}$).

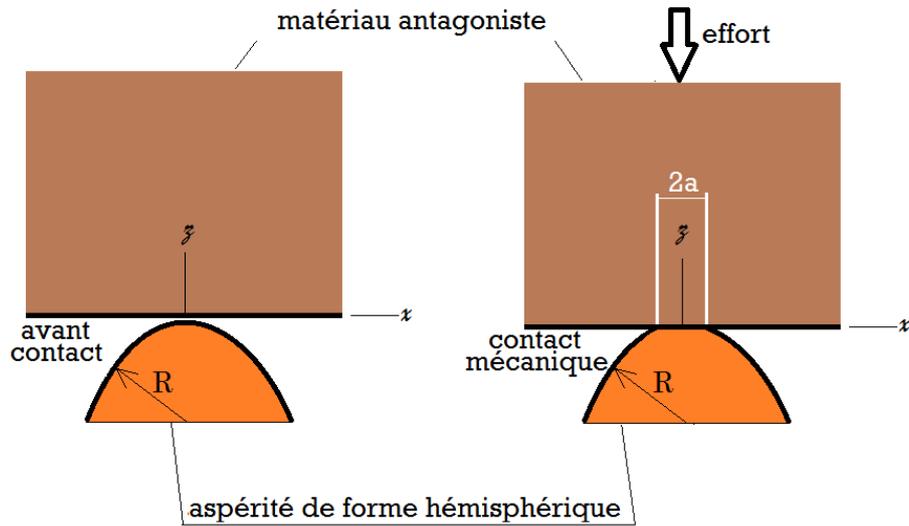


Figure I.17 - Modèle d'aspérité hémisphérique en contact de Hertz sphère-plan

La théorie de Hertz dans un domaine purement élastique donne alors sous l'effet d'une force F_c appliquée suivant la normale au contact :

E le module de Young équivalent :

$$\frac{1}{E} = \frac{1 - \nu_A^2}{E_A} + \frac{1 - \nu_B^2}{E_B} \quad (11)$$

a le rayon du disque de contact :

$$a = \left(\frac{3F_c \mathcal{R}}{4E} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

la pression moyenne de contact P_m :

$$P_m = P(0) = \frac{F_c}{\pi a^2} = \frac{2}{3} \left(\frac{6F_c E^2}{\pi^3 \mathcal{R}^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

la pression de contact $P(r)$ pour un point du disque de contact à une distance r de son centre

$$P(r) = \frac{3F_c}{2\pi a^2} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right) \quad (14)$$

avec, donc, une pression nulle sur la limite entre surfaces libre et surface de contact et la pression maximale égale à :

$$P(0) = \frac{3F_c}{2\pi a^2} \quad (15)$$

La connaissance du rayon du disque de contact a est notamment utile pour la définition de la résistance de constriction qui existe dans un contact électrique de type aspérité sphérique contre aspérité sphérique.

2.1.4 Le Contact Graphite - Métal

Le graphite a une structure cristallographique de type Hexagonal Compact. L'oxygène et la vapeur d'eau mettent en évidence une faible énergie de liaison entre couches de graphite, ce qui explique l'effet lubrifiant du graphite dans l'air, effet bien moindre dans le vide [10]. De plus, l'effet de la vapeur dans les liaisons intercrystallines du graphite du balai est la cause du pouvoir lubrifiant de celui-ci. L'affaiblissement des liaisons permettrait en effet aux grains de tourner pour s'aligner dans le sens du mouvement. À ce moment là, le taux d'usure relativement élevé s'explique par la faible résistance au cisaillement du matériau ainsi orienté [12], [45].

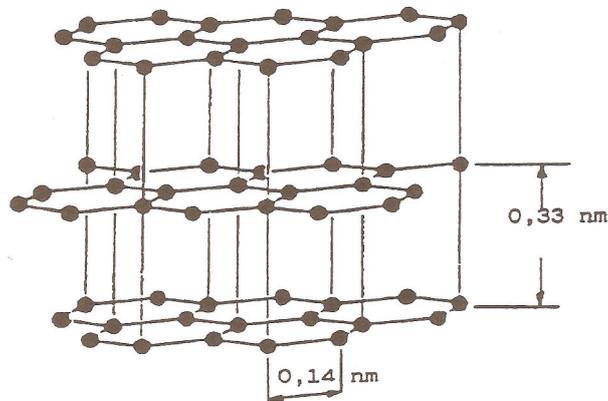


Figure I.18 - D'après [45] Représentation de l'arrangement cristallographique du graphite en Hexagonal Compact

Ce n'est pas la seule explication proposée car il peut y avoir des effets thermiques conduisant également à la rotation des grains. On rappelle que la température de contact peut atteindre et dépasser globalement 400 à 500 °C [2] et localement bien plus lors de la conduction électrique par effet tunnel, jusqu'à 3500-4000 °C [43]. Dans ce cas, la température de contact permet par déformation plastique la rotation des grains de graphite afin que l'alignement des plans facilite le glissement et la vapeur d'eau pourrait être un affaiblissant des liaisons intergranulaires (de même que la température) permettant cette rotation [6], [45].

À la température critique de contact, la quantité de vapeur présente dans l'environnement du contact n'est plus suffisante pour être adsorbée sur les surfaces fraîchement décapées par le processus d'usure. La quantité de vapeur adsorbée est contrôlée par la pression de vapeur P , relative à la pression de saturation P_0 et le ratio $\frac{P}{P_0}$ est divisé par 100 sur la gamme de température 20-170 °C. À 170 °C, $\frac{P}{P_0} = 0,015$, c'est à dire 40 fois moins que nécessaire pour éviter l'abrasion accélérée des balais dans le vide [17].

Le mode de dégradation du graphite est la rupture fragile [7] et le frottement du graphite se présente sous une forme de délaminage (arrachement de plans basaux) ou d'arrachement d'écaillés qui s'enroulent sur elles-mêmes pour former de petits tubes [6]. Cette présence de

tubes sur lesquels roule le balai est également un élément qui va dans le sens de la baisse du coefficient de frottement du contact lorsqu'il est bien graphité. Hélas, au-delà de 185°C, le graphite s'oxyde en CO_2 et les liaisons carbone ainsi libérées augmentent adhésion et usure [47].

En ce qui concerne le frottement, le graphite déposé par le balai à l'interface peut agir comme un lubrifiant solide, mais sa plage de bon fonctionnement est donc limitée. En revanche, dans tous les cas où il existe un dépôt de film de transfert, le frottement est au moins partiellement de type graphite-graphite sur les zones non décapées au cours du mouvement.

La qualité du film de transfert est dans ce cas un vecteur limitant pour le taux d'usure, mais pas le seul : l'addition de certains composés chimiques, par exemple le $(NH_4)_2HPO_4$, réduit à la fois le coefficient de frottement (de 0,3 à 0,6 jusqu'à des valeurs inférieures à 0,2) et le taux d'usure [17] en améliorant très sensiblement la durée de vie du balai. L'usure du balai va générer des particules de graphite, de cuivre et ses oxydes puisque le balai en contient et quelques résidus (résines).

On retrouve ces éléments sur la partie du balai en contact avec l'interface de frottement. Le film de transfert sera donc essentiellement composé de cuivre, de ses oxydes et de graphite et le troisième corps sera composé des mêmes éléments plus quelques éventuelles pollutions externes.

2.2 Le Contact Électrique Statique

À défaut de modèle plus représentatif, c'est un modèle statique qui est utilisé pour décrire le contact électrique glissant [2], [45]. Au niveau microscopique d'une aspérité, il est possible de caractériser statiquement le comportement en développant notamment la notion de résistance de constriction. D'après Féchant [45], un facteur 0.3 appliqué à la surface de conduction réelle du cas statique permet de s'approcher des caractéristiques du cas dynamique.

2.2.1 Calcul de la Résistance d'Interface (Résistance de Constriction)

La caractérisation électrique d'un contact statique est réalisée par le calcul de résistance propre et de résistance d'interface des différentes couches empilées. Ces résistances d'interface sont appelées des résistances de constriction⁹

À cause de la rugosité et du faible nombre d'aspérités en contact entre les solides, nous l'avons déjà évoqué, la surface réelle de contact électrique ne représente qu'une faible part de la surface réelle de contact mécanique. Cette surface de contact électrique est donc la somme des surfaces de n surfaces de contact locales des n spots de contact entre aspérités de chacun des deux solides.

A l'échelle microscopique, chaque contact peut être représenté comme sur la figure I.19. Sous des conditions de charge données et en respectant les hypothèses de la théorie de Hertz, le rayon du cercle de contact a est égal au rayon du disque de contact calculé précédemment, sous réserve que la zone de contact et de passage du courant soit parfaitement conductrice (première hypothèse de travail).

9. Par analogie avec la mécanique des fluides on peut imaginer que la résistance de constriction d'un contact de section s sur un matériau de section S est semblable à un goulet d'étranglement s qui serait placé sur un tube S véhiculant un fluide, la différence de potentiel s'apparentant à une différence de pression et le courant à un débit.

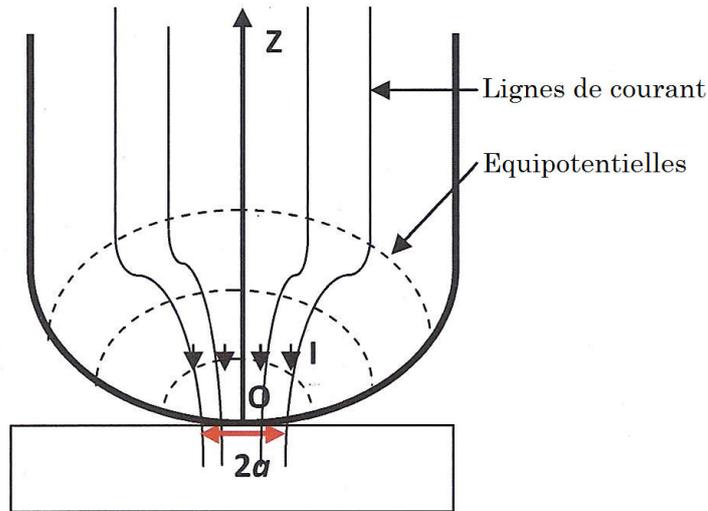


Figure I.19 - D'après [39] - Lignes de courant et équipotentiellles d'un contact électrique parfait entre deux solides conducteurs

Chacun des deux solides, que nous nommerons A et B comme précédemment, a sa propre résistance ohmique et son propre libre parcours moyen électronique.

libres parcours moyens électroniques égaux à $l_A = 387 \text{ \AA}$ pour le cuivre [41] et $l_B = 235 \text{ \AA}$ pour le graphite [40].

résistivités ρ_A et ρ_B pour le cuivre et le graphite.

Pour $l_{AouB} \gg a$ la loi d'Ohm (modèle de Maxwell) s'applique et Essone Obame [39] montre que la résistance de constriction $R_c(z)$ en fonction de la hauteur z_A ou z_B du point considéré dans chaque solide suivant l'axe vertical (voir figure I.19) vaut :

$$\begin{cases} R_c^A(z) = \frac{\rho_A}{2\pi a} \operatorname{atan}\left(\frac{z_A}{a}\right) \\ R_c^B(z) = \frac{\rho_B}{2\pi a} \operatorname{atan}\left(\frac{z_B}{a}\right) \end{cases} \quad (16)$$

Si on considère la résistance de constriction entre un point loin du contact et le contact (c'est-à-dire $z_A \gg 10a$ et $z_B \gg 10a$), on déduit des expressions précédentes les expressions simplifiées qui suivent :

$$\begin{cases} R_c^A = \frac{\rho_A}{4a} \\ R_c^B = \frac{\rho_B}{4a} \end{cases} \quad (17)$$

Et la résistance de constriction globale du contact direct A-B, R_c , entre les deux solides vaut :

$$R_c = \frac{\rho_A + \rho_B}{4a} \quad (18)$$

Or dans le contact réel il y a une multitude de spots de contact tels que celui étudié. On constate que la résistance de constriction est inversement proportionnelle à la circonférence

du spot de contact et non à son aire de contact. La résistance de constriction globale du contact direct entre les deux solides vaut [39] :

$$R_c = \frac{\rho_A + \rho_B}{4\alpha} \quad (19)$$

où α est le rayon de Holm, défini comme le rayon équivalent de l'ensemble des contacts entre les deux solides en question. Ce rayon en question vaut [42], [43] :

$$\alpha = \sqrt{\frac{F}{\pi H}} \quad (20)$$

avec F l'effort appliqué sur le contact et H la dureté du matériau. α est homogène à une longueur.

Nous retiendrons, d'après 19 et 20 :

$$R_c = \frac{\rho_A + \rho_B}{4} \sqrt{\frac{\pi H}{F}} \quad (21)$$

Nota : l'expression (21) traduit que la "résistance" de constriction R_c est bien homogène à une résistance (en Ω). En effet les duretés sont exprimées de manière homogènes à des contraintes en $[N].[m]^{-2}$:

$$R_c = [\Omega][m] \sqrt{\frac{[N]}{[m]^2} \frac{1}{[N]}} = [\Omega]$$

2.2.2 Résistance de Constriction en Conditions Réelles

Le contact entre les matériaux n'est hélas jamais direct car un film composé d'oxydes et/ou d'impuretés (provenant de l'environnement ou des débris des d'usure des solides) se forme très rapidement à la surface des matériaux. La résistance globale du contact devient donc la somme des résistances de constriction, des résistances propres de matériaux et de la résistance du film de transfert. En prenant en compte la résistivité de ce film ρ_{film} , son épaisseur e_{film} , sa résistance propre vaut, puisqu'elle est inversement proportionnelle à la section de la zone conductrice :

$$R_{film} = \frac{\rho_{film} e_{film}}{\pi \alpha^2} \quad (22)$$

et donc la résistance globale constriction matériau A + film d'oxyde + constriction matériau B vaut, d'après [48] et les équations 19 et 22 :

$$R_{contact} = \frac{\rho_A + \rho_B}{4\alpha} + \frac{\rho_{film} e_{film}}{\pi \alpha^2} \quad (23)$$

Enfin, si on tient compte de la résistance de chacun des conducteurs, c'est-à-dire leur résistance propre égale respectivement à $R_A = \frac{\rho_A l_A}{S_A}$ et $R_B = \frac{\rho_B l_B}{S_B}$, avec respectivement l_A , S_A , l_B , S_B les longueurs et section des solides conducteurs A et B de notre système, alors la résistance du système vaut :

$$R_{systeme} = R_A + R_B + R_c + R_{film} \quad (24)$$

$$\Rightarrow R_{systeme} = R_A + R_B + \frac{\rho_A + \rho_B}{4\alpha} + \frac{\rho_{film} e_{film}}{\pi \alpha^2} \quad (25)$$

$$\Rightarrow R_{systeme} = R_A + R_B + \frac{\rho_A + \rho_B}{4} \sqrt{\frac{\pi H}{F}} + \frac{\rho_{film} e_{film} H}{F} \quad (26)$$

Nota : l'expression (26) traduit que la "résistance" $R_{systeme}$ est bien homogène à une résistance (en Ω). En effet :

$$R_{systeme} = [\Omega] + [\Omega] + [\Omega][m] \sqrt{\frac{[N]}{[m]^2} \frac{1}{[N]}} + \frac{[\Omega][m][m]}{[N]} \frac{[N]}{[m]^2} = [\Omega]$$

$$\Rightarrow R_{systeme} = C_1 + \frac{1}{\sqrt{F}} C_2 + \frac{1}{F} C_3 \quad (27)$$

Nous venons de démontrer mathématiquement un constat bien connu : l'application d'une force croissante sur le contact permet de faire décroître la valeur de la résistance du système jusqu'à une valeur seuil représentant essentiellement la résistance des matériaux, la résistance de constriction en $\frac{1}{\sqrt{F}}$ et la résistance du film d'oxyde en $\frac{1}{F}$ (voir figure 1.20). Cela rejoint les constatations de Casstevens [14] qui avait remarqué qu'à vitesse et courant constants la tension de contact diminuait lorsqu'on augmentait le charge sur le balai, mais sans pouvoir le justifier.

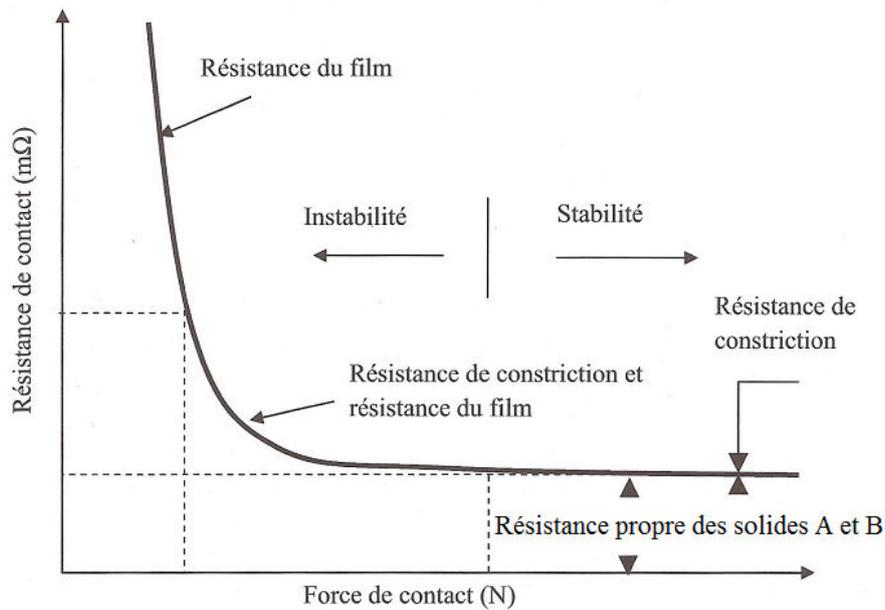


Figure I.20 - D'après [39] Variation de la résistance de contact en fonction de l'effort normal sur le contact.

2.2.3 Le Contact Electrique Métal-Graphite

Lorsque deux matériaux conducteurs sont en contact mécanique, une différence de potentiel appliquée entre ceux-ci, même très faible, suffit à faire transiter les électrons de l'un à l'autre. Ceci est également vrai dans le cas où les matériaux en contact sont des métaux recouverts d'une couche d'oxyde [45]. Deux phénomènes sont essentiellement présents : micro-effet tunnel et conduction thermo-électrique.

Dans le cas de la conduction par micro-effet tunnel, il est nécessaire que les surfaces en contact soient à moins de 20 Å. Au-delà de cette valeur la conductivité décroît pour devenir nulle à partir de 10 nm de distance environ [45]. La jonction est assurée par du métal entraîné au contact du balai pour générer une conduction métallique.

Habituellement, on constate des tensions de contact de l'ordre de 0,05 V à 0,2 V, dont l'origine se trouve dans la résistance au passage du courant de cette multitude de petits passages conductifs et des zones environnantes (qui se comportent comme des semi-conducteurs). Les densités de courant sur les zones de contact électrique peuvent atteindre 10^5 A/cm² [2].

Le passage du courant au travers des petites aires de contact cause, de plus, la rétraction du film d'oxyde, formant de plus larges points de contact [18], [20]. Un équilibre est naturellement trouvé lorsque l'aire de contact électrique est assez grande pour que la résistance de contact, l'échauffement et le gradient de tension dans la couche d'oxyde soient suffisamment faibles pour ne pas générer de nouvelles jonction par micro-effet tunnel. La résistance ohmique du balai ne contribue aucunement à la rupture du film d'oxyde. Dans un cas de faible polarisation (inférieure à 0.5 V) le comportement reste ohmique [45].

Pour cette conduction par micro-effet tunnel, Bowden & Williamson [4] précisent qu'il existe une valeur seuil de densité de courant au-delà de laquelle la chaleur générée par effet Joule en un point de contact peut devenir suffisante pour que la contrainte de contact outrepassse la limite d'élasticité du contact, le déforme plastiquement et ainsi accroisse la surface de contact électrique.

Dans le cas d'une barrière épaisse (exemple une couche d'oxyde en surface du matériau) le comportement est proche de celui d'un semi-conducteur : on notera que le gradient de tension nécessaire à la rupture d'un film d'oxyde régulier (c'est-à-dire stœchiométriquement constitué, sans trous, etc...) est de l'ordre de 10^5 à 10^6 V/mm [2] et celui-ci est le seuil à partir duquel la barrière épaisse devient "conductrice". Ce comportement est évidemment non-ohmique.

2.3 Le Contact Électrique Cuivre-Graphite en Mouvement

Le contact électrique ne peut pas exister sans contact mécanique. Nous allons présenter les conditions et caractéristiques des matériaux et des surfaces qui influencent le contact mécanique entre ceux-ci. Une fois le contact mécanique établi entre les solides, le fait de les soumettre à une différence de potentiel va entraîner un passage de courant d'un des solides à l'autre.

Ce courant va modifier les caractéristiques du contact et la connaissance des valeurs de tension aux bornes du contact et de courant va permettre de déterminer la résistance électrique au passage de celui-ci à travers le contact.

2.3.1 Comportement Tribo-Électrique du Contact Électrique Glissant

Le besoin de connaître la résistance de contact du couple balai-bague a été mis en évidence de longue date [2], engendrant des campagnes de mesures utiles aux machines à courant continu, moteurs et générateurs [2], [5], [12], [18] et [20]. La problématique est cependant différente sur ces machines puisque les contacts balais-collecteur voient des densités de courant élevées (40 à 200 A/cm²) et les contacts électriques formés font l'objet d'un renversement du sens de passage du courant : la commutation (voir page 12).

Dans les alternateurs, machines à collecteurs lisses appelés bagues, le contact électrique balai-bague voit une densité de courant plus faible, inférieure à 20 A/cm² et le courant est toujours dans le même sens.

E.I.Shobert a longuement travaillé sur les problématiques de contact électrique glissant balai-cuivre, et rappelle que la surface de contact mécanique réelle est inférieure à 10% de l'aire apparente de contact (surface de Hertz), or l'aire de contact électrique est égale à environ 1% à 10% de la surface de contact réelle, mais à faible charge elle peut descendre à 0.1% de celle-ci. La surface de contact électrique est donc de 0,01 à 0,1% de la surface de contact de Hertz [2], ce qui est très faible.

D'après Holm [44] et Féchant [45] seuls 5 à 20 points conducteurs existent dans une configuration balai-collecteur. Ils représentent de 10^{-6} à 10^{-3} de la surface de contact apparente du balai et en régime stationnaire ils représentent une surface quasi-constante [35].

Il existe essentiellement deux cas de figure caractérisant le contact électrique entre le balai et la bague. Le premier est représenté par le modèle A "model A" de la figure I.21. Dans ce cas, la couche d'oxyde naturellement présente à la surface du matériau de la bague se trouve avoir été décapée ou rompue par les contraintes de fonctionnement : frottement/abrasion, champ électrique, effets thermiques. La conduction est assurée par le contact direct entre l'aspérité du matériau et le balai. Le rayon a du contact de l'aspérité est déterminé par l'équilibre entre le décapage et la ré-oxydation du contact.

Le deuxième cas est représenté par le modèle B "model B", où le film d'oxyde présent n'a pas été décapé/rompu et où la conduction se fait donc via par le contact du balai et de l'oxyde puis par la liaison entre l'oxyde et le matériau de la bague. Dans les deux cas la portance est assurée partiellement par l'aspérité (et son oxyde) et partiellement par le film de transfert déposé entre les aspérités. L'épaisseur d'oxyde et donc la résistance du contact découlent de l'équilibre entre usure électro-mécanique du contact et vitesse de ré-oxydation [9].

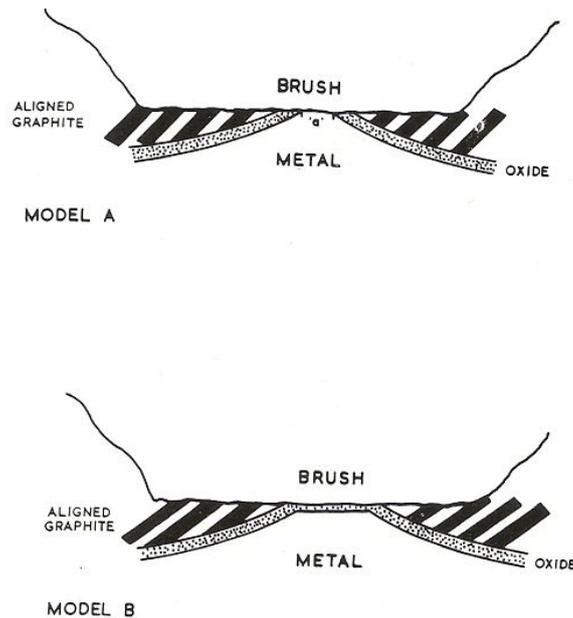


Figure I.21 - D'après [9] L'interface d'un contact électrique graphite - métal. En A, le cas où l'oxyde est éliminé de l'aspérité, en B le cas où l'oxyde est maintenu.

Le cas général d'un contact macroscopique entre le balai et la bague est constitué par un mélange de points de contact direct métal - balai (modèle A) et de points de contact indirect métal - oxyde - balai (modèle B). La fraction de chaque type de contact est dépendante des conditions mécaniques au contact (rugosité, charge normale, dureté des matériaux, vitesse, effets thermiques) et des conditions électro-chimiques (champ électrique, vitesse d'oxydation, densité de courant).

Dans les contacts du modèle B, le passage de courant dans ces points de résistivité élevée va générer une forte chaleur très localisée à l'environnement direct du contact et suffisante pour atteindre le point de fusion du métal et assurer une conduction par micro-effet tunnel [2]. Ce passage conductif peut néanmoins être interrompu par cisaillement de la jonction (ce qui est le cas dans le cas des contacts glissants ou soumis à des vibrations), ou par une

ré-oxydation totale et rapide.

On a bien un phénomène local à la surface de contact et il est important que la ré-oxydation ne soit pas plus productive que la rupture du film à chaque passage, pour atteindre un équilibre convenable.

2.3.2 Un Système Polarisé

Notre étude ne concerne pas seulement un contact macroscopique unique mais un couple de contacts traversés successivement par le courant. Il y a donc un contact balai vers bague suivi d'un contact bague vers balai et il en résulte une polarisation du système. A la cathode¹⁰ (contact dit positif ou +), le gradient de tension conduit les ions métalliques vers le contact à travers le film de transfert (également appelé patine). Le taux d'oxydation est augmenté, l'oxydation va plus vite, elle est rapide et permanente, apparemment aidée par la migration des ions métalliques positifs à travers la couche d'oxyde préalablement formée, sous l'influence du champ électrique.

A l'anode¹¹ (contact dit négatif ou -) en revanche, l'oxydation est ralentie par le champ électrique et le dépôt de graphite est fortement favorisé. On n'y constate pas ou très peu de variations des tensions de contact. Shobert en déduit que la polarité influe sur l'oxydation [2] et relève de surcroît que le taux d'oxydation est bien plus élevé sous le balai + que lors de l'exposition à l'air libre.

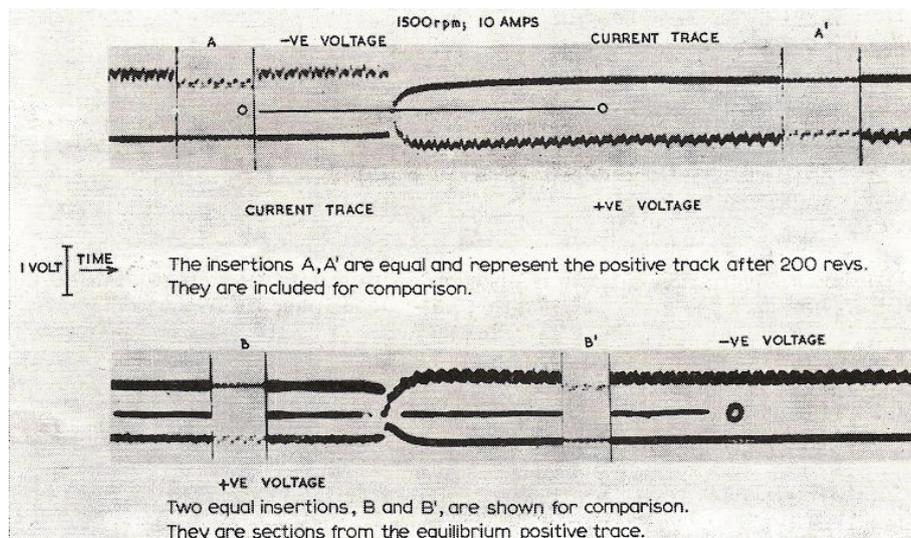


Figure I.22 - D'après [9] Graphes de renversement de sens de passage du courant. En haut et en simultané: Courant et Tension lors d'un passage de polarité négative à positive. En bas et en simultané: Courant et Tension lors d'un passage de polarité positive à négative.

La polarisation du système est confirmée par sa dissymétrie de comportement.

10. On appelle anode l'électrode d'où sort le courant conventionnel électrique, ou où entrent les électrons en courant électronique.

11. On appelle anode l'électrode par laquelle entre le courant conventionnel électrique, ou d'où sortent les électrons en courant électronique.

[- vers +] La figure I.22 montre que le renversement de passage du courant génère en valeur absolue une diminution de la tension de contact et donc de la résistance de contact, le courant demeurant le même en valeur absolue.

[+ vers -] La même figure montre qu'en cas de renversement de polarité + vers - on obtient une augmentation de la tension de contact et donc de la résistance de contact.

Nous retrouvons ici les résultats connus suivant lesquels la résistance de contact du balai négatif est plus élevée que celle du balai positif [2], [9], [14]. Ceci peut être partiellement expliqué par la grande résistance de constriction du graphite [45] qui se trouve en quantité plus importante dans le film de transfert du balai négatif.

Néanmoins, le temps nécessaire à retrouver la situation de l'autre polarité est bien plus long dans le cas - vers +. En effet il est bien plus facile au balai devenu négatif de déposer son film de transfert qu'au balai devenu positif d'ôter le film précédemment déposé par abrasion [5], [9]. Enfin, Spry & Scherer soutiennent qu'il n'y a pas de corrélation entre polarité et coefficient de frottement [5], pourtant nous verrons plus tard que cette affirmation peut être remise en question.

On retrouve également au niveau de l'usure (dans laquelle la présence de particules dures d'oxydes métalliques participe à l'abrasion des bague et balai) des effets de polarité. L'usure plus élevée du balai + que celle du balai - s'explique car les débris de graphite ne restent pas sur la piste, ce qui aurait pu lubrifier le contact et ralentir l'usure comme c'est le cas au balai - où le sens du champ électrique y est favorable [2].

2.3.3 Frottement et Usure

La condition d'équilibre entre le décapage de l'oxyde par le courant et la ré-oxydation après la fin du contact avec le balai est contrôlée par les paramètres du contact [9]. Il n'est alors pas possible de déterminer si l'oxyde était entièrement décapé du sommet de l'aspérité ou seulement diminuée en épaisseur par le passage du balai au contact.

Contrairement à un contact purement mécanique où les caractéristiques peuvent être convenablement approximées par les travaux d'Archard (entre autres), le passage du courant entraîne de fortes perturbations du comportement tribologique. Parmi elles, il est important de noter que le coefficient de frottement du balai - est supérieur à celui du balai + [43].

Shobert a constaté une augmentation d'usure apparaissant lorsque la température permet l'épaississement de la couche d'oxyde (peu décapée par un balai qui n'appuie pas fort) jusqu'à un point critique où le passage du courant ne peut se faire que par arcs électriques : cela détériore la surface et augmente les contraintes locales dans le matériau [17] tout en attaquant les liaisons carbonées, en sublimant le carbone et en consommant les matériaux d'imprégnation [45]. Les arcs électriques créent de surcroît des particules sphériques à la surface des matériaux, engendrant des perturbations de frottement et de résistance de contact [43].

À de plus fortes charges, la chute du taux d'usure avec le passage du courant peut être expliquée par la perte de débris à l'interface et la formation d'un film de transfert lubrifiant [16]. Les effets électriques font baisser le taux d'usure lorsque le courant croît au balai +, mais il demeure constant en fonction du courant sous le balai - [12]. L'usure ne relève donc pas seulement d'effets mécaniques, mais d'effets électro-mécaniques.

L'épaisseur plus importante de film de transfert sous le balai négatif est la cause de la baisse de la résistance de contact + lorsque la vitesse augmente [9], [14]. La vitesse n'a pas d'effet sur la résistance de contact - même s'il apparaît cependant des variations brutales attribuées aux ruptures du film d'oxyde, qui sont donc plus fréquentes à haute vitesse [9].

De plus, une augmentation de la résistance électrique du contact a été mesurée simultanément à une baisse du coefficient de frottement par Bouchoucha et col. [43] et ils expliquent cela par la création sur les surfaces de ce que nous pouvons appeler un troisième corps composé d'un mélange d'oxydes métalliques et de particules d'usure provenant des solides, troisième corps qui jouerait le rôle de lubrifiant. D'après Braunovic [35] les variations de résistance de contact sont liées aux variations de rayon des spots de contact. La résistance de contact est maximale au début du glissement Dans les deux cas la résistance a bien une variation qui dépend de l'état tribo-mécanique du contact.

Par opposition, une augmentation du coefficient de frottement est corrélée à une baisse de résistance de contact, supposée être la conséquence d'une rupture du film d'oxydes en surface assurant à la fois un bon contact électrique métallique avec le balai mais aussi un fort frottement.

On retrouve également au niveau de l'usure (dans laquelle la présence de particules dures d'oxydes métalliques participe à l'abrasion des bague et balai) des effets de polarité. L'usure plus élevée du balai + que celle du balai - s'explique car les débris de graphite ne restent pas sur la piste, ce qui aurait pu lubrifier le contact et ralentir l'usure comme c'est le cas au balai - où le sens du champ électrique y est favorable [2].

2.3.4 Le Film de Transfert

On constate après usinage qu'un film d'oxyde cuivreux Cu_2O d'une épaisseur de 5 strates moléculaires environ se forme instantanément sur le cuivre pur (la bague est en cuivre pur à 99,5 %). Après quelques heures il atteint 15 strates, puis après quelques jours d'exposition, le film atteint 25 strates moléculaires avec une couleur légèrement brune.

Une oxydation plus importante se compose d'augmentation d'épaisseur et de brunissage par apparition de CuO (oxyde cuivrique) [2]. Spry & Scherer ont cependant découvert que l'oxyde le plus présent sur le collecteur est en général l'oxyde cuivreux Cu_2O [5]. Nous aurons donc du cuivre Cu et des oxydes de cuivre, du Cu_2O essentiellement et un peu de CuO en provenance de la bague dans la film de transfert.

Le Cu_2O est amorphe lorsqu'il est formé à basse température, et cristallin à haute température. De plus le frottement au contact occasionne des élévations de température, et l'accroissement de résistance de contact (dû à l'oxydation généralisée) augmente l'effet Joule. L'augmentation de température augmente le taux d'oxydation. La température va donc influencer les propriétés du film de transfert.

Quelque soit le modèle d'aspérité retenu (sphérique, conique, cylindrique, élastique, plastique ou élasto-plastique), la diminution de la rugosité entraîne statistiquement une augmentation du nombre de points de contact. La dépendance du nombre de points de contact à la rugosité est clairement non linéaire [27]. Cette situation a une incidence sur la qualité et les conditions du contact électrique, dont il a été montré qu'il n'est établi que sur une partie seulement des points de contact mécanique [2].

À l'Interface - Pour son décapage, l'oxyde peut être abrasé, rompu en proximité du contact et/ou repoussé. En effet pour les densités de courant qui nous intéressent (0 à 20 A/cm²), la couche d'oxyde est facilement détachable du substrat [43]. La nature du film influence également le comportement, car elle détermine la taille des débris d'usure, desquels dépend la résistance de contact [3]. Les variations de résistances ne sont donc pas nécessairement liées à la rupture complète ou pas du film d'oxyde.

La polarité du comportement du contact a pour conséquence un effet dissymétrique sur les films de transfert et sur les tensions et résistances de contact. Même si les propriétés mécaniques du contact ne sont pas influencées par la polarité du contact [5], la tension de contact négative est plus élevée que celle au contact positif [9]. L'épaisseur plus importante de film de transfert sous le balai négatif (différence causée par la polarité du système) en est la cause.

La présence d'humidité dans l'environnement est nécessaire pour le dépôt de la patine et elle serait composée de 2/3 d'oxyde de cuivre Cu_2O , 1/4 de graphite et le reste de résidus et pollutions divers [2]. La vapeur d'eau et/ou l'oxygène sont des éléments indispensables à la bonne lubrification du contact. Même si la variation du taux d'humidité dans le film de transfert peut générer des variations de résistance de contact [35], ces éléments permettent le maintien du film de glissement à faible coefficient de frottement [2], alors que, sans humidité ou alors dans le vide, le coefficient de frottement peut atteindre 1.

Plus précisément, la présence de vapeur d'eau à une pression de 3 mbar permet un bon fonctionnement du pouvoir lubrifiant du graphite [47], mais l'hydrogène, l'azote et le monoxyde de carbone jusqu'à des pressions de l'ordre de 0.8 bar (autres gaz contenus dans l'air ambiant) amènent l'usure à une valeur semblable à celle obtenue dans le vide [6].

3 MESURES DE RÉSISTANCES DE CONTACT

Nota : La caractérisation des résistances de contact traduit un phénomène polarisé, néanmoins dans l'intégralité de ce document nous traiterons les tensions de contact, les courants et les résistances de contact en valeur absolue.

Les calculs de résistances de contact présentés précédemment sont prévus par les modèles pour être valables en cas de contact statique. Aucun modèle dynamique ne permet d'extrapoler ces résultats en tenant compte de l'ensemble des paramètres en jeu (température, vitesse, matériaux, oxydation, environnement, etc.). De plus, la validité des modèles statiques appliqués à des cas dynamiques est sujette à caution.

Il n'existe pas de contact parfait à 2 corps, les matériaux sont rarement homogènes et continus, le frottement et la température associée occasionnent des modifications structurales et physico-chimiques des matériaux en contact [45]. Enfin, les contacts statiques sont modélisés avec un contact quasi-ponctuel (exemple sphère-plan) alors que les contacts dynamiques sont surfaciques puisque il y a une déformation élastique ou plastique apparaissant sous l'effet du déplacement.

Une mesure expérimentale est donc nécessaire pour déterminer empiriquement la déviation entre le modèle statique (inadapté) et le cas réel qui nous intéresse.

3.1 Caractérisation de la résistivité du film à l'interface

La mesure de résistivité d'un film se fait en appliquant un champ électrique au voisinage du contact. Pour un champ électrique faible le film de surface se comporte comme une résistance ohmique [24], [45]. Cette méthode peut être appliquée microscopiquement (Résiscope) ou macroscopiquement (mesure de chute de tension entre deux solides en contact parcourus par un courant). Compte tenu des réserves de Féchant quant à l'application d'un modèle statique à un cas dynamique et compte-tenu de la géométrie et du mode de fonctionnement de notre application, c'est une méthode macroscopique que nous avons choisi d'adopter.

Si l'on trace une caractéristique $U=f(I)$ avec U la tension et I le courant, la pente nous donne la résistance de contact. Si l'on trace $R(t) = \frac{U(t)}{I(t)}$ alors nous obtenons la résistance de contact du couple considéré au cours de l'essai et ce à chaque instant.

Pour caractériser le comportement électrique du contact balai-bague, nous avons donc choisi d'opter pour une mesure de la résistance de contact entre ces deux pièces. De par la configuration de la machine, représentée figure I.23 ci-dessous, une méthode de mesure doit être spécifiquement adaptée à son architecture. La mesure à effectuer doit être dynamique et évidemment non-destructive, elle doit également être répétable et ne pas perturber le système sur la plage de fonctionnement nominale de la machine.

Pour les différents types de mesures que nous allons présenter, il est important de caractériser les variations et perturbations possibles, qu'elles soient tribo-mécaniques, thermiques, électriques, etc. Enfin, la mesure doit permettre d'obtenir des signaux correspondants aux valeurs des résistances de contact négative et positive $R_1(t)$ et $R_2(t)$. Nous choisissons les codes couleurs et l'identification suivante :

- La caractéristique K du contact négatif sera annotée K_1 en toutes circonstances et son code couleur associé sera bleu.
- La caractéristique K du contact positif sera annotée K_2 en toutes circonstances et son code couleur associé sera vert.

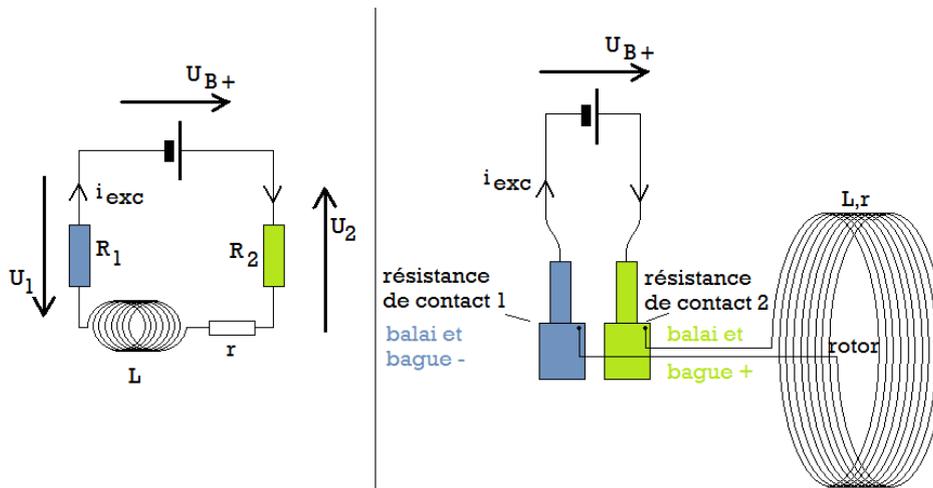


Figure I.23 - Schémas électriques du rotor

À Gauche - le schéma électrique du circuit d'excitation.

À Droite - le schéma de principe du circuit d'excitation avec représentation des composants réels.

Nous allons présenter les différentes mesures possibles, les analyser et leur apporter successivement les améliorations nécessaires pour isoler les informations relatives aux résistances de contact tout en évinçant les potentielles perturbations issues de l'extérieur ou de la méthode de mesure. L'objectif est de pouvoir transposer de manière fiable le principe à un tribomètre de type pion-disque.

3.2 La Mesure sur alternateur complet : mesure en \mathbb{U}

C'est la mesure la plus simple, la plus rapide car elle peut être mise en œuvre sur l'alternateur complet et sans le modifier. Elle est basée sur la mesure simultanée de courant i_{exc} parcourant le circuit d'excitation et de tension U_{B+} aux bornes des balais. Le schéma électrique équivalent, présenté figure I.24, permet d'écrire $U_{B+}(t) = (R_1(t) + R_2(t) + r) i_{exc} + L \frac{di_{exc}}{dt}$. U_{B+} est fixée par les conditions d'essai à 14V.

La résistance interne du générateur de tension est supposée négligeable devant les résistances en jeu.

Nota : Cette mesure est appelée "Mesure en \mathbb{U} " car si on imagine les branches du \mathbb{U} comme étant les balais et le fond du \mathbb{U} comme étant l'ensemble rotor-collecteur sur le schéma électrique figure I.24, on effectue alors la mesure de la tension entre les extrémités hautes des branches du \mathbb{U} .

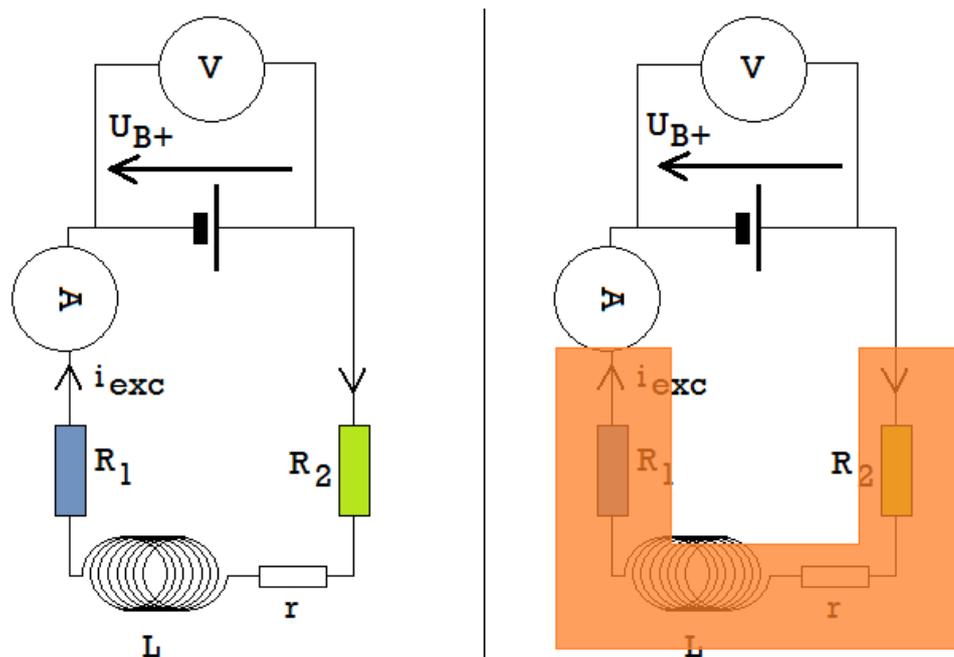


Figure I.24 - Mesure (en \mathbb{U}) de la résistance équivalente du circuit d'excitation.

À Gauche - Mesure deux pointes appliquée à notre cas.

À Droite - Raison de l'appellation *Mesure en \mathbb{U}* .

Le voltmètre mesure la tension U_{B+} aux bornes du dipôle équivalent $R_1 + r + R_2$. A l'ampèremètre mesure le courant i_{exc}

Calcul Théorique de la mesure en \mathbb{U}

$$U_{B+} = (R_1(t) + R_2(t) + r)i_{exc} + L \frac{di_{exc}}{dt} \quad (28)$$

$$(29)$$

$$\Rightarrow R_1(t) + R_2(t) = \frac{U_{B+} - L \frac{di_{exc}}{dt}}{i_{exc} - r} \quad (30)$$

Or, rigoureusement, r la résistance rotorique n'est pas strictement constante car elle dépend de la température du rotor (l'évolution est approximée au premier ordre par $r(\theta) = r_0(1 + \frac{2}{3}a(\theta - \theta_0))$ avec $r(\theta)$ la résistance du conducteur en fonction de θ la température absolue, r_{r0} étant la résistance de référence à la température θ_0 et a le coefficient directeur thermique [48]).

De plus, la résistance rotorique r n'est pas rigoureusement la même entre toutes les machines d'une population. Enfin, θ la température rotorique est influencée, toutes autres conditions fixées, par la dissipation thermique P_{th} par effet Joule $P_{th} = r(\theta) i_{exc}^2(\theta, t)$ du courant $i_{exc}(\theta, t)$ traversant le rotor. Il s'en suit un fort couplage entre résistance du circuit et température d'équilibre du rotor.

La mesure ne permet pas de distinguer $R_1(t)$ et $R_2(t)$ dont on ne connaît par cette méthode que la valeur de la somme et sa variation globale. Les deux résistances sont pourtant fortement influencées par la polarisation du système [2], [3], [5], [9], [43], [45].

La variation de $i_{exc}(\theta, t)$ engendre des variations de la tension aux bornes de la bobine, dont on ne peut pas dissocier l'effet amortissant sur les variations du courant. La part de variation de résistance mesurée due à la bobine est donc indétectable. L'inductance du rotor vaut, par construction, $L=100$ à 150 mH (*données VALEO*) et pour un circuit de type RL, je rappelle les valeurs [21] de constante de temps τ_{RL} :

$$\tau_{RL} = \frac{L}{r} \simeq 0,04 \text{ à } 0,05 \text{ s} \quad (31)$$

et du facteur d'amortissement λ :

$$\lambda = \frac{r}{2L} \simeq 9 \text{ à } 14 \quad (32)$$

La valeur de τ_{RL} indique, par définition, que la réponse du système met, lorsque le système est soumis à un échelon de courant, $0,04$ à $0,05$ s pour atteindre 63 % de la valeur asymptotique en régime établi, $3 \tau_{RL}$ (soit $0,12$ à $0,15$ s) pour atteindre 95 % et $5 \tau_{RL}$ (soit $0,2$ à $0,3$ s) pour atteindre 99 % de cette même valeur. La mesure étant effectuée à la fréquence de 5 Hz (un point de mesure toutes les $0,2$ s), les amortissements des variations de courant seront détectés par le moyen de mesure.

La valeur de λ est élevée ($\lambda = 0$ correspond à un système non amorti) et confirme le rôle fortement amortissant de la bobine sur les variations du courant i_{exc} du réseau.

Mise en Œuvre

La mesure en \mathbb{U} n'amène pas au résultat attendu car elle est trop globale et ne permet pas de dissocier $R_1(t)$ et $R_2(t)$, alors que la bibliographie met en évidence la différence de comportement des deux contacts. Des variations dues aux variations de résistance du rotor et aux variations de température influençant fortement i_{exc} et ne sont pas quantifiables et, de plus, l'inductance rotorique et les variations de i_{exc} génèrent des perturbations (amortissement) des variations de i_{exc} qui, elles, sont détectables par le moyen de mesure mais impossible à isoler dans la mesure.

La résistance et l'inductance rotoriques étant données suivant une répartition statistique sur une population de machines, cela rend la mesure non comparable. La résistance rotorique r est proche de 2Ω et R_1 et R_2 sont globalement cent fois moindre : la détection de leur variation est impossible, surtout si on considère que la mesure est toujours effectuée dans un environnement complexe et méconnu, aux paramètres multiples (vibrations, champ électromagnétique, répartition de température, humidité, flux aérauliques générés par la ventilation de la machine, etc.) dont on n'a pas pu caractériser l'influence et qui peuvent varier d'une machine à l'autre, d'un modèle à l'autre.

3.3 La Mesure sur alternateur complet : mesure en \mathbb{H}

Dans le cas d'un contact électrique dynamique le mouvement de la bague empêche d'y fixer une sonde permettant la mesure de potentiel. Une solution a été mise en place pour contourner ce problème, en créant un deuxième contact glissant, un contact dit "de référence" à l'aide d'un petit balai frotteur, également en contact avec le collecteur, et fixe par rapport au porte-balais. Le schéma de principe électrique de cette mesure est présenté figure I.25. Le montage associé est présenté figure I.26.

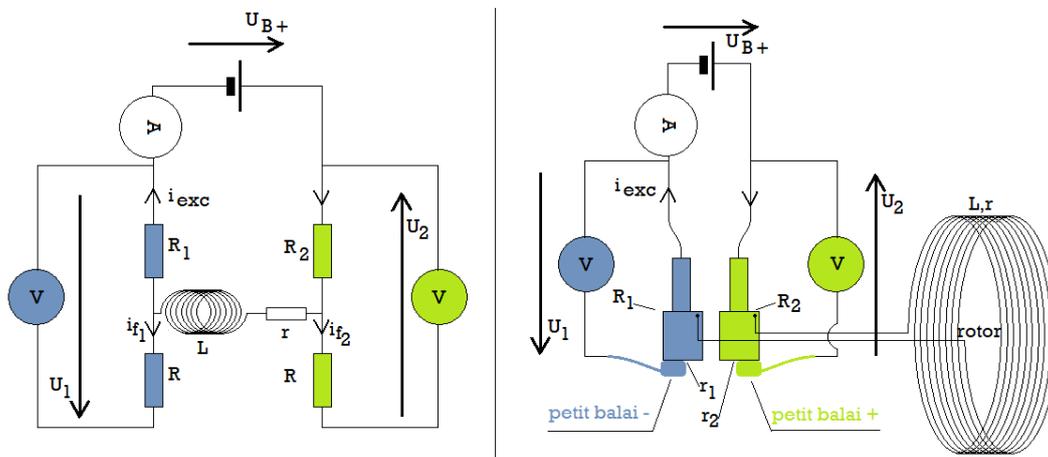


Figure I.25 - Schémas de la mesure en \mathbb{H} avec petits balais

À Gauche - Le schéma électrique.

À Droite - Le schéma de principe.

Les résistances R et R' correspondent aux résistances de contact des petits balais, R_1 et R_2 aux résistances de contact recherchées, i_{f1} et i_{f2} sont les courants "de fuite" utilisés pour la mesure par les voltmètres

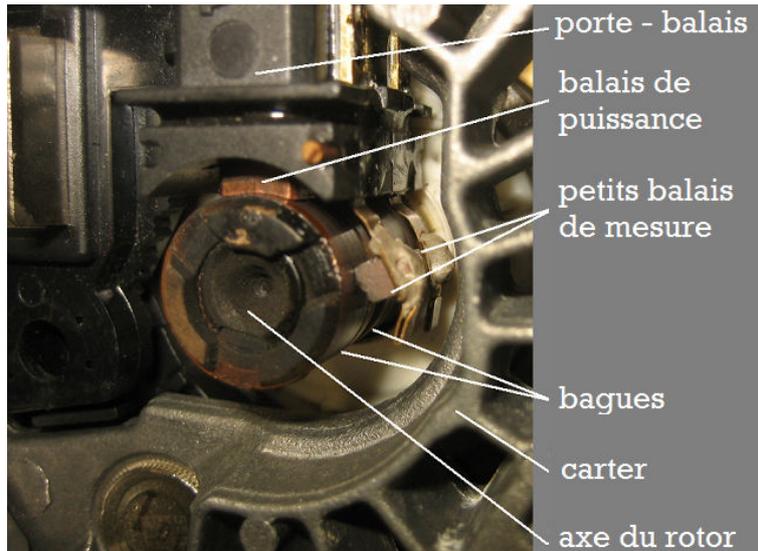


Figure I.26 - Montage des "petits balais"

Nota : Cette mesure est appelée "mesure en H" car si on imagine les branches supérieures du H comme étant les balais, les branches inférieures étant les balais de référence et la barre centrale du H le collecteur, on effectue alors la mesure de la tension entre les extrémités haute et basse des branches du H figure I.27

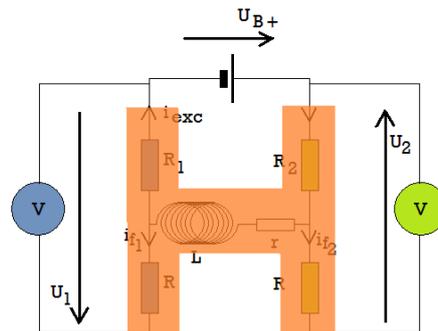


Figure I.27 - Mesure en H

Calcul Théorique de la mesure en H

On appellera U_1 et U_2 les tensions de contact, respectivement entre balai négatif et référence et entre balai positif et référence. U_1 et U_2 sont mesurées par des voltmètres dont l'impédance Z est de l'ordre de $10^6 \Omega$. On a donc, suivant le schéma de la figure (I.25) :

$$U_1 = R_1 i_{exc} - (r_1 + Z) i_{f1} \quad (33)$$

$$U_2 = -R_2 i_{exc} + (r_2 + Z) i_{f2} \quad (34)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} R_1 = \frac{U_1}{i_{exc}} + (r_1 + Z) \frac{i_{f1}}{i_{exc}} \\ R_2 = \frac{U_2}{i_{exc}} + (r_2 + Z) \frac{i_{f2}}{i_{exc}} \end{cases} \quad (35)$$

Les valeurs absolues des tensions U_1 et U_2 mesurées par cette méthode oscillaient toutes les deux entre 0,12 et 0,20 V [Voir tableau de mesures qui apparaîtra dans la section "Résultats"]. Par mesure de U_{B+} (imposée à 14 V) et de i_{exc} et en tenant compte de la loi d'Ohm ainsi que de la loi des mailles de Kirchhoff, le circuit d'excitation vérifie :

$$U_{B+} - R_1 i_{exc} - L \frac{di_{exc}}{dt} - r i_{exc} - R_2 i_{exc} = 0 \quad (36)$$

En régime stabilisé c'est à dire lorsque la bobine se comporte comme un simple conducteur :

$$U_{B+} - R_1 i_{exc} - r i_{exc} - R_2 i_{exc} = 0 \Rightarrow R_1 + R_2 + r \leq \frac{U_{B+}}{i_{exc}} \quad (37)$$

Or $U_{B+} = 14$ V (par définition), $r = 2$ à $2,2 \Omega$ (par construction) et $i_{exc} \in]0; 5A]$,

$$\Rightarrow R_1 + R_2 + r \leq 2,8 \Omega \quad (38)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} R_1 \leq 0,8 \Omega \\ R_2 \leq 0,8 \Omega \end{cases} \quad (39)$$

Car dans ce système les résistances sont toutes positives ou nulles.

Or, en reprenant l'équation [34] et en rappelant que $i_{exc} \leq 5A$:

$$\frac{i_{f1}}{i_{exc}} \leq \frac{R_{1,max} i_{exc,max} - U_{1,max}}{(r_1 + Z)} \quad (40)$$

$$\Rightarrow \frac{i_{f1}}{i_{exc}} \leq 10^{-5} \quad (41)$$

Un raisonnement semblable nous amène à :

$$\frac{i_{f2}}{i_{exc}} \leq 10^{-5} \quad (42)$$

Les courants utilisés par les voltmètres 1 et 2 sont donc négligeables devant le courant d'excitation i et une simplification des expressions de U_1 et U_2 est possible. Nous obtenons :

$$\begin{cases} R_1 \# - \frac{U_1}{i_{exc}} \\ R_2 \# - \frac{U_2}{i_{exc}} \end{cases} \quad (43)$$

avec une erreur relative inférieure ou égale à $1.10^{-3}\%$.

Nous obtenons la justification que les mesures U_1 , U_2 et i_{exc} amènent bien à l'expression des valeurs de résistances de contact recherchées suivant l'expression obtenue en (43).

Cette méthode de mesure, en \mathbb{H} , permet cependant de mesurer indépendamment R_1 et R_2 , mais certains problèmes subsistent. Ainsi en premier lieu le contact est perturbé tribo-mécaniquement par le frottement des balais additionnels sur la même piste que les balais de puissance, cela génère échauffement, dépôt de film de transfert non maîtrisé, etc.

De plus, le courant d'excitation i_{exc} et ses variations sont fortement couplées aux variations de résistance du rotor et aux variations de température et ceci est accentué par la variabilité statistique des résistance et inductance rotoriques sur une population de machines, rendant la mesure non comparable d'un alternateur à l'autre. De plus, l'inductance rotorique génère un amortissement des variations de i_{exc} détectables par le moyen de mesure.

Comme la mesure en \mathbb{U} , la mesure en \mathbb{H} nécessite autant d'alternateurs complets que de mesures à réaliser (cela a un coût non négligeable et demande beaucoup de place de stockage). Enfin, l'environnement demeure complexe et méconnu avec de multiples paramètres (vibrations propres de la machine, du banc, champs électrique et magnétique, flux aéroliques, etc.).

Mise en Œuvre

La mesure en \mathbb{H} constitue un perfectionnement intéressant de la mesure en \mathbb{U} mais ne suffit pas à satisfaire notre nécessité de répétabilité, de neutralité et de maîtrise des conditions d'essai. Elle ne nous apporte pas la certitude que le résultat de la mesure correspond bien à la valeur que nous voulons caractériser. En nous basant sur un moyen existant nous avons développé une nouvelle méthode qui a par la suite été transposée à un tribomètre au LISMMA.

CONCLUSION

Il ressort de ces recherches préalables que la configuration du système est multi-physique (figure (I.28)) : elle sollicite la mécanique, l'électricité et la physico-chimie.

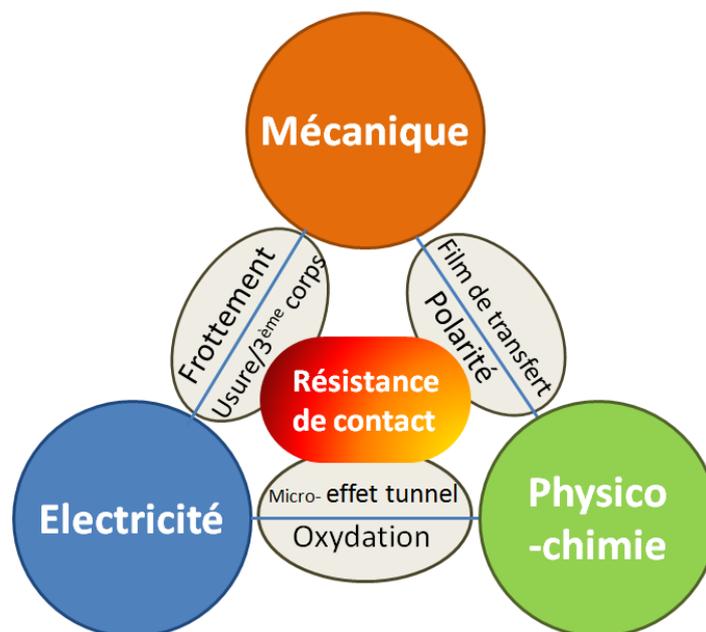


Figure I.28 - Représentation du système Multi-physique constitué par le couple balai-bague

Le système est également multi-échelles car si la première approche est macroscopique (système global soit une échelle en mm et mm²), il est important de retenir que nous venons de voir dans ce chapitre que beaucoup de phénomènes se situent à une échelle 1000 fois plus faible (proche du micron et μm^2). C'est notamment le cas des surfaces de contact électriques, c'est également le cas des épaisseurs de formation d'oxydes, ainsi que des profils de rugosité et des particules contenues dans le film de transfert. Les enjeux de cette étude sont multiples : acquérir une solide connaissance générale des phénomènes pouvant se produire au contact afin de choisir avec justesse les essais à mener pour tenter d'isoler les phénomènes et caractériser, ainsi, leur pondération dans la perturbation du système telle que constatée chez VALEO.

La configuration multi-physique et multi-échelles n'est pas sans soulever des problèmes quant à l'isolement des sources de perturbations entre elles. Les méthodes de mesure présentées ne sont pas satisfaisantes et ne permettent pas d'effectuer une mesure de résistance de contact amenant à une meilleure compréhension des phénomènes en jeu. Compte-tenu de la forte interaction entre les matériaux et propriétés tribo-électriques du contact, nous avons besoin d'une nouvelle méthode expérimentale et d'évaluer l'influence de différentes propriétés de différents matériaux sur le comportement du contact.

À cette fin, nous disposons au LISMMA d'un tribomètre pour la mesure de frottement et d'un moyen dédié à la mesure de résistance de contact chez VALEO. Sur le tribomètre du LISMMA nous pourrions caractériser les résistances de contact et le coefficient de frottement en temps réel pour plusieurs types de matériaux dont les caractéristiques seront présentées plus loin.

Nous allons décrire la méthode de mesure retenue et son application au tribomètre, nous présenterons ensuite la gamme et les paramètres des essais retenus et enfin les résultats obtenus.

Deuxième partie

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

INTRODUCTION - La première partie de cette étude nous permet d'aborder la problématique du contact électrique glissant balai-bague en s'appuyant sur les recherches précédemment effectuées. Nous avons donc utilisé ces connaissances préalables pour développer une méthode de mesure spéciale permettant de tester différents matériaux dont le choix est basé sur leurs propriétés électriques et mécaniques. Une fois équipé, le banc d'essais nous permet de réaliser la campagne d'essai qui a été choisie, dans l'objectif de réaliser des mesures limitant l'impact des facteurs extérieurs et réduisant au minimum l'interaction entre les paramètres, de manière à évaluer chaque partie (frottement, résistance, etc) avec le maximum d'indépendance et ce pour l'ensemble des matériaux dont le choix sera justifié.

1 MÉTHODE DE MESURE EN Υ

Inspiré par la méthode de mesure en \mathbb{H} , le principe d'un balai "de mesure" est conservé. Cependant afin d'éviter les perturbations tribo-mécaniques dénoncées précédemment, il faut qu'il glisse sur une piste différente de celle des balais. Une nouvelle configuration est conçue pour permettre au balai de référence de frotter sur une piste différente de celle des balais de puissance, elle est présentée ci-dessous (figure II.29) :

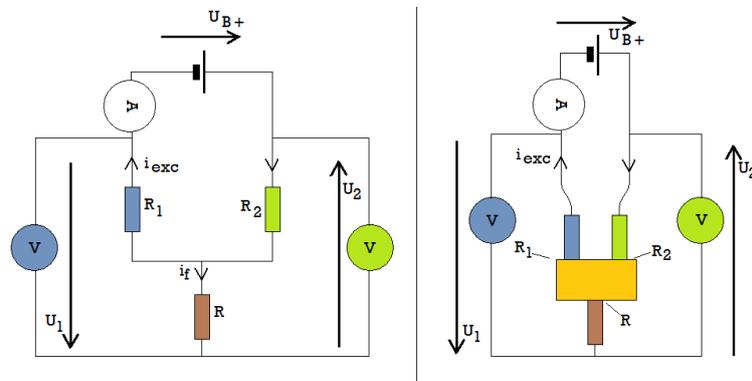


Figure II.29 - Principe de la mesure en Υ

Nota : Cette mesure est appelée "mesure en Υ " car si on imagine les branches du Υ comme étant les balais et la pointe du Υ étant le balai référence utilisé pour la mesure, on effectue alors la mesure de la tension entre la pointe du Υ et chacune des extrémités de ses branches (figure II.30).

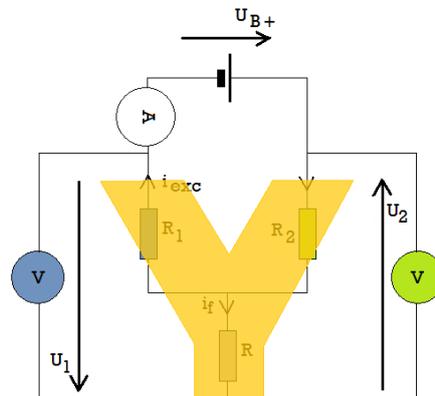


Figure II.30 - Mesure en Υ

Calcul Théorique de la mesure en \mathbb{Y}

Dans cette configuration, la mesure fait également intervenir la différence de potentiel propre à la bague et influencée par sa résistivité. La bague étant faite en matériau métallique, généralement du cuivre (mais certaines ont été prototypées en aluminium, acier,...), les résistivités des bagues sont comprises entre 22.10^{-9} et $250.10^{-9} \Omega.m$ (tableaux II.4 à II.9). Cela correspond au maximum à une chute de tension de la bague de l'ordre de $70.10^{-9} V$. Cette tension est négligeable devant les tensions U_1 et U_2 proches de 0,1 à 0,2 V que nous mesurons.

Nous pouvons donc maintenir les équations simplifiées des résistances de contact (43).

On appelle toujours U_1 et U_2 les tensions de contact, respectivement entre balai négatif et référence et entre balai positif et référence. Comme nous négligeons la résistivité de la bague, l'expression des résistances de contact est donc toujours :

$$\begin{cases} R_1 \# - \frac{U_1}{i_{exc}} \\ R_2 \# - \frac{U_2}{i_{exc}} \end{cases}$$

avec une erreur relative de calcul inférieure ou égale à $1.10^{-3}\%$.

Cette méthode de mesure en \mathbb{Y} permet de résoudre les difficultés de la mesure en \mathbb{H} . Elle en garde le principal intérêt qui est de permettre une mesure différenciée de R_1 et R_2 . Par rapport à la mesure en \mathbb{H} elle assure principalement que le contact des balais de puissance avec la bague n'est pas perturbé tribo-mécaniquement par le frottement du(des) balai(s) de mesure.

Elle permet, de plus, de supprimer l'influence sur i_{exc} de la variation de résistance du rotor en fonction de la température et l'amortissement des variations de i_{exc} par la bobine du rotor. Les besoins (et coûts associés) en pièces d'essai sont limités à des jeux de bagues et non plus à des alternateurs complets et la variabilité des caractéristiques électro-mécaniques des alternateurs d'une population est évincée.

Enfin, comme on n'utilise plus d'alternateur complet, l'influence des paramètres machine (modes propres de l'alternateur, champs électrique et magnétique, flux aéroliques, etc.) est supprimée.

Mise en Œuvre

Pour une mesure sur des pièces VALEO réelles, la place manque sur les bagues pour faire glisser un balai de référence sur chacune d'elles. En les prélevant dans le processus de fabrication, nous pouvons disposer de bagues uniques larges (dites mono-bagues ou bagues mono-pièce) permettant de faire frotter le balai de référence en position centrale **entre** les pistes des balais de puissance¹². Cette méthode de mesure prend la forme suivante présentée à la figure II.29 :

La mesure en \mathbb{Y} est la quintessence du principe de la mesure en \mathbb{H} , elle satisfait nos besoins et nos attentes. La méthode de mesure en \mathbb{Y} , appliquée aux électro-tribomètres VALEO (voir annexe B) va désormais être transposée à notre tribomètre au LISMMA.

2 MOYEN D'ESSAI BI-PION DU LISMMA

Le tribomètre du LISMMA sur lequel les essais sont réalisés est un tribomètre de type pion-disque. Nous allons en présenter le principe puis les modifications apportées pour le mettre en adéquation avec nos besoins de mesure.

12. Lors de la fabrication, ces bagues ne forment qu'une seule pièce qui est découpée ensuite en deux lors de l'usinage final du rotor et de la mise aux cotes. Nous prélevons donc les pièces avant qu'elles passent la phase d'usinage final

2.1 Principe du Tribomètre Pion-Disque

Le tribomètre pion-disque dont nous allons présenter le principe est celui visible sur le figure II.31 ci-dessous. C'est en fait un tribomètre bi-pion, c'est à dire que deux pions peuvent être montés pour un frottement simultané sur le disque. Néanmoins le principe général est semblable à celui d'un tribomètre pion-disque classique.



Figure II.31 - Tribomètre bi-pion du LISMA

L'architecture d'un Tribomètre pion-disque est très répandue et bien connue (voir figure II.32) : un moteur (a) placé suivant un axe vertical entraîne directement en rotation la broche porte-disque (b) et par conséquent le disque (c). Un capteur de force à jauge de déformations permet la mesure de l'effort tangentiel F_T tandis que les bras (e) et (e'), parfaitement équilibrés au repos, se voient chargés d'une masse (m) connue permettant d'appliquer sur le balai l'effort normal F_N .

La caractéristique principale de ce banc est de disposer de **deux** bras porte-pion (e et e'), exactement identiques et placés symétriquement de manière à ce que les deux pions frottent de part et d'autre du diamètre du disque, et à une distance r réglable de l'axe de rotation.

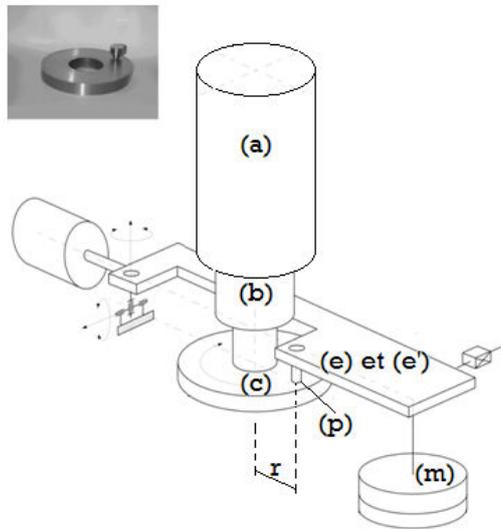


Figure II.32 - Schéma de principe du tribomètre pion-disque. Un seul bras porte-pion est représenté pour plus de clarté.

Afin de réaliser la mesure en Υ , nous disposons donc de ce tribomètre bi-pion, muni de deux bras identiques montés symétriquement par rapport à l'axe de révolution et permettant un réglage de la distance entre l'axe de rotation et le pion. Ces bras sont totalement indépendants et instrumentés séparément. La position diamétralement opposée des pions est intéressante lorsque l'on souhaite séparer ou superposer les pistes de chacun des deux bras en fonction des besoins d'essai. Dans notre cas, les pistes seront juxtaposées et séparées par une zone non frottée de 1 à 2 mm de largeur. Cette possibilité de frottement à deux pions sans perturbation mutuelle est particulièrement intéressante dans le cadre de notre étude car elle reproduit la configuration nécessaire pour la mesure des tensions de contact des balais positif et négatif.

La figure II.33 présente sur un plan la disposition réelle des deux bras symétriques du tribomètre bi-pion dont le principe vient d'être présenté [50]. La figure II.34 montre la configuration mécanique du disque et des balais.

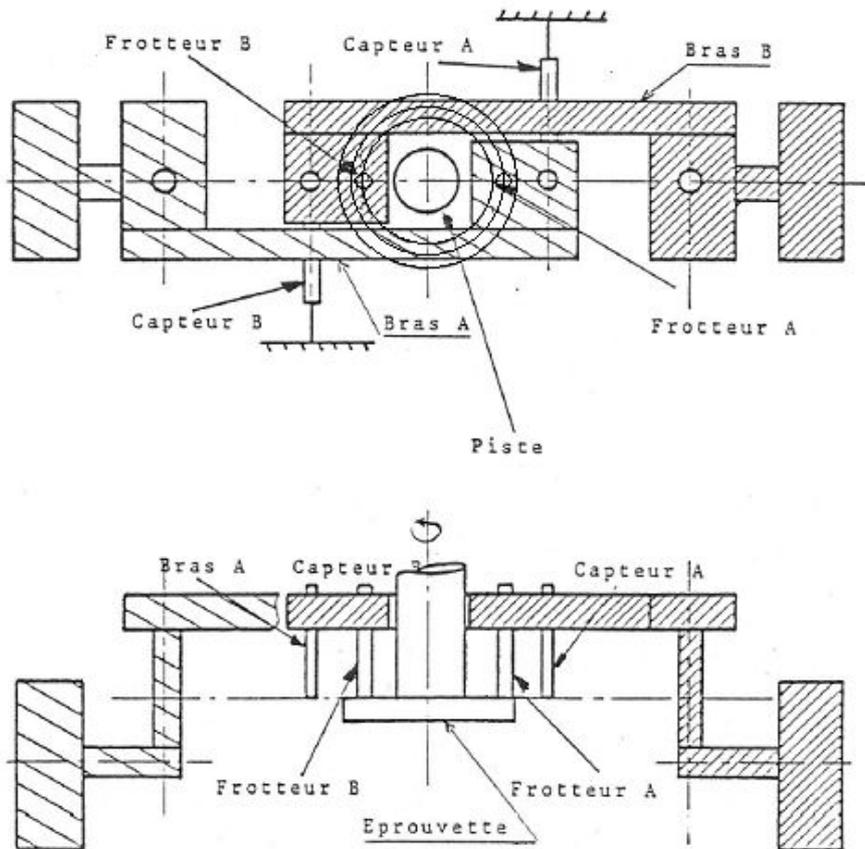


Figure II.33 - D'après [50] - Configuration et positionnement théorique des deux bras du tribomètre bi-pion du LISMA

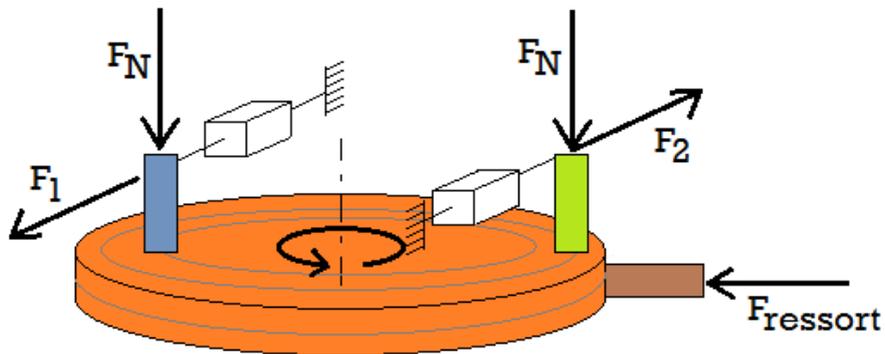


Figure II.34 - Schéma de principe mécanique du montage disque et balais + balai de référence de mesure

F_N est la charge normale appliquée sur le contact

F_1 et F_2 sont les forces tangentielles de frottement, respectivement du balai négatif et positif

$F_{ressort}$ est l'effort normal (dirigé suivant un rayon du disque) appliqué sur le balai de mesure

2.2 Porte-balais de référence et porte-pion pour les balais de puissance

Des porte-pion spécifiques ont été réalisés pour assurer la fixation du balai standard VALEO et le maintien de celui-ci pendant les essais. Le porte-pion doit isoler électriquement le balai de l'environnement, avoir une résistance mécanique et une tenue à la température suffisantes. C'est la raison pour laquelle le porte-pion comporte une extrémité en PEEK (matériau isolant, résistant à plus de 250°C et à la résistance mécanique élevée). Le fût du porte-pion est lui en acier. Les dimensions sont identiques aux éléments en service habituellement sur ce banc.

Comme le montage et le démontage du porte-pion doivent être aisés et rapides, la fixation se fait via un écrou à créneau et bague nylon standard du commerce. Des méplats sur le fût permettent l'immobilisation en rotation pendant la fixation. Le balai doit également être changé rapidement et avec facilité, aussi il est maintenu dans une rainure aux dimensions ajustées par une bride en aluminium serrée par des vis accessibles en toutes circonstances.

Le résultat de la conception des porte-pions spécifiques est présenté ci-dessous en figure II.35 :



Figure II.35 - Porte-balais spécifiques isolés électriquement pour le Tribomètre bi-pion du LISMA

Afin de permettre la mesure en Υ un balai de référence est nécessaire et, de par la géométrie du système, il a été choisi de positionner un balai radialement, c'est-à-dire sur la tranche du disque. Ce balai est maintenu par une équerre aluminium permettant des réglages en hauteur et distance radiale, équerre sur laquelle est fixé un morceau de porte-balais standard VALEO.

Ce montage assure l'isolation électrique entre le balai et l'environnement. La conception permet d'assurer un montage et un démontage facile du disque.

Le résultat de la conception du porte-balai de référence spécifique est présenté ci-dessous en figure II.36 :

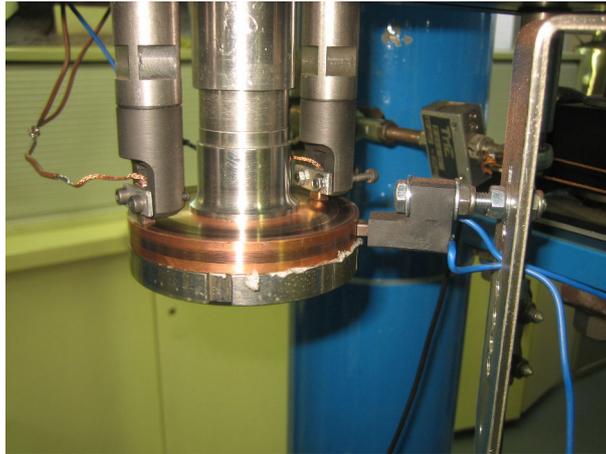


Figure II.36 - Tribomètre bi-pion du LISMMA: vue des pions (balais) et du disque, le balai de référence est visible en position radiale sur la tranche du disque.

3 CHOIX DES PARAMÈTRES D'ESSAI

Avec le moyen présenté précédemment, nous avons pu tester différents matériaux dont nous allons justifier le choix avant de détailler la définition et le déroulement des essais.

3.1 Instrumentation de Mesure

Nous avons à notre disposition une centrale d'acquisition GRAPHTEC Midi Logger GL800 (figure II.37) qui nous permet d'enregistrer jusqu'à vingt voies en simultanément. Nous en utiliserons sept, six tensions et une température (lecture directe). Nous devons donc effectuer une transformation pour obtenir les valeurs qui nous intéressent. L'équipement de mesure du tribomètre du LISMMA est représenté figure II.38.



Figure II.37 - La centrale d'acquisition.

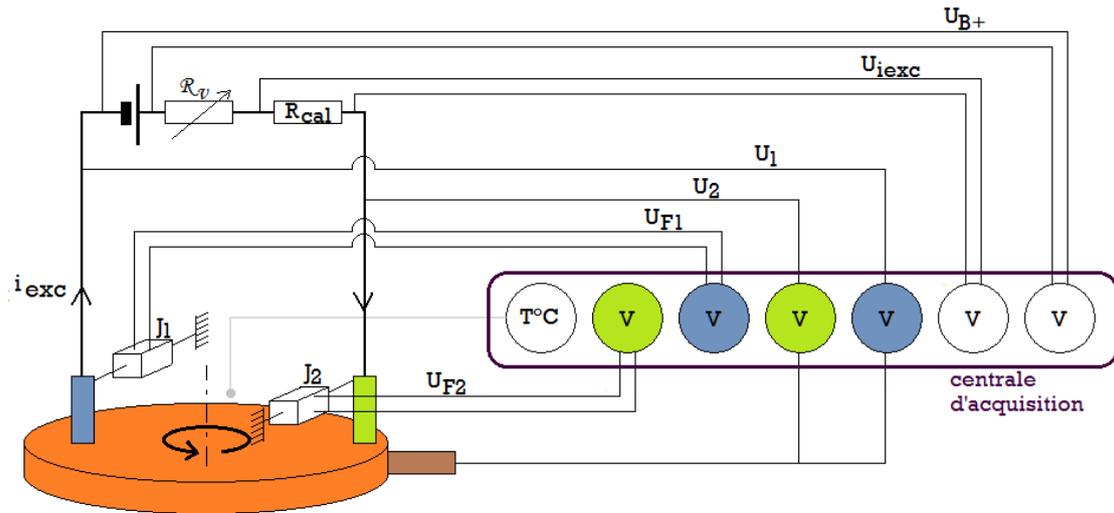


Figure II.38 - Schéma de principe de l'acquisition des mesures effectuées.

Sur la figure II.38, nous voyons les différentes voies de mesures de tension utilisées. Elles sont utilisées pour caractériser :

- * U_{B+}
- * i_{exc}
- * R_1
- * R_2
- * F_1 la force tangentielle de frottement du balai négatif
- * F_2 la force tangentielle de frottement du balai positif

MÉTHODE DE MESURE DE U_{B+} - Parmi les mesures que nous souhaitons effectuer, seule celle de U_{B+} est possible en lecture directe. La voie de mesure de la centrale d'acquisition a été mise à 0,0000 à 0,0001 près avec un calibrateur industrie. La valeur moyenne de U_{B+} à environ 14 V permet de calculer l'incertitude qui s'élève donc à :

$$\frac{\Delta U_{B+}}{U_{B+}} = \frac{0,0001}{14}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta U_{B+}}{U_{B+}} \leq 1\% \quad (44)$$

MÉTHODE DE MESURE DE i_{exc} - La mesure d'un courant est possible en utilisant une résistance calibrée R_{cal} dont on connaît la valeur ($R_{cal} = 0,0075\Omega \pm 1\%$). Un conditionneur de gain γ et d'offset β est placé entre la résistance calibrée et la centrale d'acquisition. Une mesure de tension (U_{iexc}) aux bornes de cette résistance, à laquelle on applique la loi d'Ohm, nous donne :

$$U_{iexc} = \gamma R_{cal} i_{exc} + \beta$$

$$\Rightarrow i_{exc} = \frac{U_{iexc} - \beta}{\gamma R_{cal}}$$

La centrale d'acquisition est mise à 0,0000 avec une incertitude de 0,0001 avec le calibrateur, puis le gain γ et l'offset β du conditionneur sont réglés pour avoir une parfaite proportionnalité entre U_{iexc} et i_{exc} en fixant $\beta = 0,0000$ avec une incertitude de 0,0001. Nous obtenons :

$$i_{exc} = \frac{U_{iexc}}{\gamma R_{cal}} = 10U_{iexc} \quad (45)$$

Pour mémoire : l'erreur d'un rapport $C = \frac{A}{B}$ dont on connaît les incertitudes sur A et sur B peut être obtenue en effectuant une dérivation logarithmique qui donne :

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} \quad (46)$$

On obtient donc :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta i_{exc}}{i_{exc}} &= \frac{\Delta U_{iexc}}{U_{iexc}} + \frac{\Delta R_{cal}}{R_{cal}} \\ \Rightarrow \frac{\Delta i_{exc}}{i_{exc}} &= \frac{0,0001}{0,4000} + \frac{1}{100} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta i_{exc}}{i_{exc}} \# 1 \% \quad (47)$$

MÉTHODE DE MESURE DE R_1 ET DE R_2 - Comme défini au II.1, la mesure de résistance se fait par le rapport de la tension et du courant. Dans le cas général avec l'indice $k = 1$ ou 2 :

$$R_k = \frac{U_k}{i_{exc}}$$

La mesure de i_{exc} a déjà été traitée et son incertitude est de l'ordre de 1 %. La mesure de U_k est également faite via un conditionneur de gain 1 et d'offset nul, réglages effectués au calibrateur à 0,0001 près. La valeur moyenne de U_k est de l'ordre de 0,2 à 0,4 V. L'incertitude de R_k vaut :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R_k}{R_k} &= \frac{\Delta U_k}{U_k} + \frac{\Delta i_{exc}}{i_{exc}} \\ \Rightarrow \frac{\Delta R_k}{R_k} &= \frac{0,0001}{0,2} + 1\% \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta R_k}{R_k} \# 1 \% \quad (48)$$

MÉTHODE DE MESURE DE F_1 ET DE F_2 - La mesure des efforts tangentiels de frottement est spécifique et différente de celle que nous pouvons faire pour les autres valeurs. Nous utilisons des capteurs de traction placés tangentiellement au disque et ces capteurs convertissent la déformation élastique du capteur de traction en variation de résistance. Ce sont des jauges de déformation dites jauges d'extensométrie qui réalisent cette conversion.

Ce type de capteurs utilise le principe de piézorésistance mis en évidence par Kelvin : un matériau change de résistance sous l'effet d'une contrainte mécanique. La force de frottement est intégralement transmise à un solide élastique sur lequel est collée la dite jauge. Sous l'effet de la force, le solide se déforme, il transmet ses déformations à la jauge qui change de résistance, proportionnelle à l'effort sur une plage de valeurs donnée.

En effet, d'après Caron et col. [49], la variation de résistance en fonction de l'allongement d'un conducteur vérifie :

$$\frac{dR}{R} = K \frac{dL}{L} \quad (49)$$

avec :

- * R la résistance du conducteur.
- * K une constante dite "facteur de jauge". $K = 1 + 2\nu + C(1 - 2\nu)$ avec C une constante déterminée expérimentalement et ν le coefficient de Poisson du matériau conducteur.
- * L la longueur de conducteur.

Le signal de variation de résistance a de faibles variations qui sont détectées par un montage en pont de jauges ou pont de Wheastone [49]. La sortie prend la forme d'une tension qui est amplifiée par un conditionneur de gain γ et d'offset β .

Comme nous venons de le voir, les réglages du conditionneur n'ont pas d'influence sur le résultat. En effet, lors de chaque essai, chaque capteur est étalonné, c'est-à-dire qu'on fait un test en position déchargée, puis chargée avec une masse étalon connue, puis à nouveau en position déchargée, afin de connaître l'offset (la déviation de la valeur au repos) et le coefficient de proportionnalité entre effort et tension mesurée. Dans le cas général avec l'indice $k = 1$ ou 2 et J_k, P_k les constantes¹³ définies par l'étalonnage (figure II.39), nous avons :

$$F_k = J_k U_{Fk} + P_k$$

13. J_k et P_k sont constantes durant un essai mais sont différentes pour chaque essai réalisé, elles sont donc mesurées à chaque essai, aussi court soit-il.

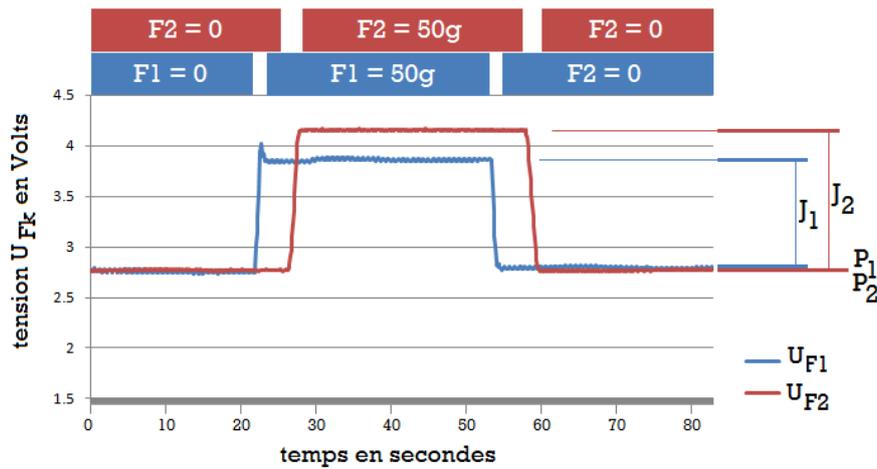


Figure II.39 - Principe de l'étalonnage des coefficients de linéarité de la jauge à chaque essai.

La mesure de U_{Fk} est donc faite via un conditionneur de gain et d'offset réglés de manière à avoir une valeur mesurée au cours du frottement qui soit élevée par rapport à l'incertitude. La tension mesurée est généralement de l'ordre de , la calibration du zéro de la centrale d'acquisition étant faite au calibrateur à 0,0001 près. La valeur mesurée de U_k est de l'ordre de quelques Volts (2 à 5 V). L'incertitude de F_k vaut (cas critique) :

$$\frac{\Delta F_k}{F_k} = \frac{0,0001}{2}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta F_k}{F_k} \leq 1 \text{‰} \quad (50)$$

Les incertitudes des différentes voies de mesure sont désormais connues, elles sont résumées ci-dessous :

$$\frac{\Delta U_{B+}}{U_{B+}} \leq 1 \text{‰}$$

$$\frac{\Delta i_{exc}}{i_{exc}} \# 1 \%$$

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} \# 1 \%$$

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} \# 1 \%$$

$$\frac{\Delta F_1}{F_1} \leq 1 \text{‰}$$

$$\frac{\Delta F_2}{F_2} \leq 1 \text{‰}$$

Nous allons désormais présenter et justifier les choix réalisés en ce qui concerne les matériaux qui vont être testés sur notre banc.

3.2 Choix des matériaux et caractéristiques

Le but des essais que nous présentons est de mettre en évidence un comportement tribo-électrique du contact électrique glissant graphite – métal et en particulier avec le cuivre. Les balais ont été figés (balais standard) et seule une variété a été testée, la nuance C7364 de chez Carbone-Lorraine, dont la composition a été présentée au I.1.5.1. Cependant, à titre d'extrapolation, deux nuances extrêmes, constituant en quelque sorte les bornes de la répartition cuivre-graphite dans le balai, ont été testées ponctuellement : un balai 100 % Graphite et un balai 95 % Cuivre.

En ce qui concerne les matériaux choisis pour les disques, comme nous l'avons évoqué, nous avons testé 6 configurations différentes. Des disques possédant les caractéristiques dimensionnelles présentées en annexe C ont été fabriqués dans une quantité adaptée aux besoins d'essais (4 à 12 pièces) dans chacun de ces matériaux :

- * Acier A37
- * Aluminium 1050
- * Cuivre Cw024
- * Cuivre allié CuCr₁Zr
- * Cuivre Cw024 revêtu de 7µm d'or (ex : voir figure III.2)
- * Cuivre Cw024 revêtu d'oxyde de cuivre CuO

DISQUE EN CUIVRE CW 024A -

Ce matériau est le matériau choisi par VALEO pour la confection des bagues de tous les alternateurs destinés à l'automobile (les problématiques poids lourds sont différentes). C'est devenu depuis plusieurs années un standard équipant les machines de série. Ce cuivre satisfait la norme ISO EN 12449. Il était important de le tester pour pouvoir établir un lien entre les résultats de résistances de contact sur les bancs VALEO n°1 et 2 et les résultats sur le tribomètre d'architecture plus classique présent au LISMMA.

Cela permet et permettra de faire un recalage entre les résultats de la configuration pion-disque et les résultats mesurés en configuration balai-bague. Les principales caractéristiques normalisées du matériau sont rappelées ci-après (table II.4).

| Cuivre Cw024a | | | | | |
|----------------------------------|---------------|----------|----------|---|--------------|
| Composition | Suivant Norme | Re (MPa) | Rm (MPa) | Résistivité (20°C) | Dureté |
| Cu 99,9 % P 0,015 à 0,040 % | EN 12449 | 100 | 250 | $\leq 2,2 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ | 90 à 110 HV |
| Oxydes Cu ₂ O, CuO | - | - | - | $2 \cdot 10^4$ à $10^7 \Omega \cdot m$ | 200 à 250 HV |

Table II.4 - D'après Norme et [25] - Caractéristiques essentielles du Cuivre Cw024a .

DISQUE EN ALUMINIUM AL1050 -

Ce matériau a été testé car c'est une nuance quasi-pure d'aluminium contenant seulement 0,5 % d'impuretés. Le matériau est plus mou que le cuivre mais il possède un oxyde naturel très dur. Nous pouvons ainsi estimer le pouvoir découpant du balai sur l'oxyde très dur et évaluer l'influence d'une dureté plus faible du substrat sur le contact électrique. Les principales caractéristiques normalisées du matériau sont rappelées ci-après (table II.5).

| Aluminium AL1050 | | | | | |
|---|---------------|----------|-----------|--------------------------------------|----------------|
| Composition | Suivant Norme | Re (MPa) | Rm (MPa) | Résistivité | Dureté |
| Al 99,5 % Fe ≤ 0,40 % Si ≤ 0,25 % Cu ≤ 0,05 % Mn ≤ 0,05 % Mg ≤ 0,05 % Zn ≤ 0,07 % Ti ≤ 0,40 % autres ≤ 0,03 % | EN-AW1050 | 20 | 60 à 95 | $2,8 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ | ≤ 35 HV |
| Oxyde Alumine Al_2O_3 | - | - | 135 à 250 | 10^{12} à $10^{13} \Omega \cdot m$ | 1400 à 2000 HV |

Table II.5 - D'après Norme et [25] - Caractéristiques essentielles de l'Aluminium AL1050.

DISQUE EN ACIER A37 -

Ce matériau, également appelé S235, a des propriétés électriques bien moindres que celles du cuivre et de l'aluminium (environ 10 fois moins conducteur), mais il a l'intérêt d'avoir un oxyde qui est friable et poreux, de plus cet oxyde se forme très facilement à la surface ambiante. L'acier A37 est un acier très peu allié, encore une fois avec ce matériau c'est les propriétés d'un métal quasi-pur que nous testons. Nous pouvons ainsi estimer la capacité de décapage du balai sur un oxyde plus friable et fragile, nous pouvons également évaluer l'influence de la dureté sur le contact électrique. Les principales caractéristiques du matériau sont rappelées ci-après (table II.6).

| Acier A37 | | | | | |
|--|---------------|----------|-----------|--|---------------|
| Composition | Suivant Norme | Re (MPa) | Rm (MPa) | Résistivité ¹⁴ | Dureté |
| Fe C ≤ 0,18 % Mn ≤ 0,80 % Si ≤ 0,35 % P ≤ 0,040 % S ≤ 0,040 % | EN 10305-1/-4 | 240 | 360 à 500 | 19 à $25 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ | 95 HV |
| Oxydes FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 | - | XX | XX | 5 à 10 $\Omega \cdot m$ | 500 à 1000 HV |

Table II.6 - Caractéristiques essentielles de l'Acier A37.

DISQUE EN CuCr1Zr CUIVRE-CHROME-ZIRCONIUM -

Ce matériau est proche du matériau de série. La principale différence est sa dureté plus élevée et, en deuxième lieu, son oxydabilité moindre grâce à l'ajout de chrome. Nous évaluons essentiellement l'influence de la forte dureté sur le contact électrique, le matériau étant métalliquement très proche du cuivre Cw024a. Les principales caractéristiques du matériau sont rappelées ci-après (table II.7).

| Cuivre-Chrome-Zirconium CuCr1Zr | | | | | |
|--|---------------|----------|----------|--------------------------|---------------|
| Composition | Suivant Norme | Re (MPa) | Rm (MPa) | Résistivité | Dureté |
| Cu Cr 0,5 à 1,2 % Zr 0,03 à 0,3 % Fe ≤ 0,08 % Si ≤ 0,1 % autres ≤ 0,2 % | EN 12163 | 380 | ≤ 480 | 2,3.10 ⁻⁸ Ω.m | 140 à 170 HV |
| Oxydes de cuivre + CrO ₂ et Cr ₂ O ₃ | - | XX | XX | 5 à 10 ⁷ Ω.m | 200 à 3000 HV |

Table II.7 - Caractéristiques essentielles du Cuivre-Chrome-Zirconium CuCr1Zr.

DISQUE EN CUIVRE CW 024A REVÊTU D'OXYDE CUIVREUX CuO -

Le substrat est le cuivre Cw024a de série. Un dépôt de CuO est réalisé sur une épaisseur de 1 μm environ. Ce matériau a été choisi pour tester un disque dont on connaît le niveau et les caractéristiques de l'oxyde avant essai. Nous pouvons estimer le pouvoir et le temps de décapage du balai sur cette couche d'oxyde maîtrisée. Les principales caractéristiques sont rappelées ci-après, table II.9.

| Cuivre Cw024 + oxyde cuivreux CuO | | | | | |
|-----------------------------------|---------------|----------|----------|--------------------------|--------------|
| Composition | Suivant Norme | Re (MPa) | Rm (MPa) | Conductivité | Dureté |
| Cu 99,9 % P 0,015 à 0,040 % | EN 12449 | - | 440 | 2,2.10 ⁻⁸ Ω.m | 90 à 110 HV |
| Oxyde CuO épaisseur 1 μm | - | - | - | 2.10 ⁴ Ω.m | 200 à 250 HV |

Table II.8 - D'après Norme et [25] - Caractéristiques essentielles du Cuivre revêtu de CuO.

DISQUE EN CUIVRE CW 024A REVÊTU D'OR Au -

Le substrat est le cuivre Cw024a de série. L'or est déposé par un procédé électrolytique de manière à obtenir un dépôt pur et régulier à la surface de la pièce, de manière à épouser les aspérités et maintenir un état de surface semblable à celui du disque non revêtu. Ce matériau a été choisi pour tester un disque dont on élimine toute possibilité d'oxydabilité (tant que la couche d'or subsiste, naturellement). Nous pouvons évaluer le niveau de résistance de contact lorsqu'on est assuré qu'aucun oxyde n'est présent au contact. Les principales caractéristiques sont rappelées ci-après (table II.9).

| Cuivre Cw024 revêtu d'Or | | | | | |
|--------------------------------|---------------|----------|----------|--------------------------|-------------|
| Composition | Suivant Norme | Re (MPa) | Rm (MPa) | Conductivité | Dureté |
| Cu 99,9 % P 0,015 à 0,040 % | EN 12449 | - | 440 | 2,2.10 ⁻⁸ Ω.m | 90 à 110 HV |
| Au épaisseur 7 μm | - | - | - | 2,2.10 ⁻⁸ Ω.m | - |

Table II.9 - Caractéristiques essentielles du Cuivre revêtu d'Or.

3.3 Définition de l'Essai Type

Sur notre tribomètre, nous avons installé la mesure en Υ et choisi les matériaux qui vont être testés, nous devons maintenant définir le déroulement des essais. Ils vont être réalisés en atmosphère ambiante, un dispositif de chauffage permettant de maintenir le disque à la température de $130^{\circ}\text{C} +$ ou $- 5^{\circ}\text{C}$ au cours de l'essai. Le dispositif de chauffage est mis en route en même temps que le moteur entraînant le disque. Il en découle une phase de stabilisation thermique confondue avec la phase d'accommodation des surfaces du contact balai-disque.

Les essais sont destinés à mettre en évidence la relation frottement et résistance de contact dynamique, la relation entre dépôt du film de transfert et résistance de contact statique, les liens entre oxydation/présence d'oxydes et décapage/absence d'oxydes par la mesure des résistances et des changements de résistance associés à ces différents états.

Chaque essai se déroule de manière identique. Les disques sont dégraissés et les diverses pollutions (usinage, stockage, manutention) sont éliminées par un nettoyage à l'alcool neutre. Le disque se voit ensuite poli pour créer la rugosité souhaitée ($R_a = 0,8$ à $1,6 \mu\text{m}$) afin de verrouiller le blocage du paramètre rugosité pour assurer la répétabilité des essais. Ceci est fait avec un papier abrasif de grain adapté à la dureté de chacun des matériaux. Le polissage est effectué de manière à ce que les stries soient concentriques (c'est-à-dire tangentielles au futur contact balai-disque).

Pour valider le polissage réalisé, une mesure de R_a suivant 3 rayons uniformément répartis est réalisée. Les 3 mesures doivent être dans la fourchette $0,8 - 1,6 \mu\text{m}$. Le disque est ensuite monté sur le banc et afin d'éviter les perturbations dynamiques du contact par les surcharges et délestages d'efforts normaux dus au défaut de planéité, le défaut géométrique est mesuré et doit être inférieur à $0,01 \text{ mm}$. Cette précaution permet de s'affranchir des sauts de balais et donc des ruptures de contact électrique et d'une usure électrique excessive.

Les balais sont montés sur les porte-balais et connectés électriquement par soudure à l'étain (assurant la meilleure connexion électrique). L'étalonnage est effectué comme présenté figure II.39. Mécaniquement, nous réalisons ensuite un pré-rodage balai avec un papier abrasif très fin (grade 1000) de manière à conformer le mieux possible les surfaces et assurer un rodage mécanique pendant l'essai qui soit le plus rapide possible. La charge normale de 5 N est appliquée sur chacun des balais et le montage est mécaniquement prêt à être utilisé.

L'essai proprement dit peut alors commencer par la mise sous tension (14 V) du circuit et le courant d'excitation associé est donc proche de $3,8 \text{ A}$. Ces valeurs sont représentatives du fonctionnement réel.

1^{RE} MESURE STATIQUE - Le courant vient d'être établi et l'acquisition des données est lancée pendant 20 secondes sans que le banc tourne. C'est la première mesure statique de résistances de contact, elle est réalisée sur une surface propre qui a été exposée à l'oxydation par l'atmosphère ambiante.

1^{RE} HEURE DE MESURE DYNAMIQUE - A la fin de la mesure statique, le moteur est mis en route à 605 tr/min ainsi que le dispositif de chauffage. Aussitôt, le disque est décapé mécaniquement avec un papier abrasif adapté au matériau pour vérifier qu'il maintient le R_a souhaité. Par exemple nous avons vérifié par des mesures qu'un décapage dynamique au papier grain 180 sur disque Cuivre Cw024a assure le maintien du R_a . Ce décapage est réalisé moteur tournant pour avoir les rayures de polissage concentriques et donc tangentielles au mouvement balai-disque comme c'est le cas sur les contacts balai-bague.

De plus, le décapage est réalisé dans les conditions normales d'essai avec charge égale à 5 N et courant établi de manière à ce que le balai se retrouve aussitôt en phase de frottement sur zone débarrassée de tout oxyde de surface en minimisant la ré-oxydation naturelle à l'air libre. L'essai est en fonctionnement pour 1 h de mesure dynamique.

2^E MESURE STATIQUE – L'alimentation électrique du moteur est interrompue pour qu'il s'arrête naturellement sans frein. Il s'en suit une deuxième mesure statique de 20 secondes. Celle-ci vise à mesurer l'apport du dépôt de film de transfert (depuis la configuration matériau décapé avec oxydation minimale) à la résistance statique de contact.

2^E HEURE DE MESURE DYNAMIQUE – A la fin de la mesure statique, le moteur est remis en route à 605 tr/min et le disque est à nouveau décapé mécaniquement de la même manière que précédemment. L'essai est en fonctionnement pour 1h de mesure dynamique.

3^E MESURE STATIQUE – L'alimentation électrique du moteur est à nouveau interrompue pour qu'il s'arrête naturellement sans frein. La troisième mesure statique de 20 secondes est réalisée, elle vise à nouveau l'estimation de l'apport du dépôt de film de transfert à la résistance de contact pour établir une moyenne avec la mesure précédente.

A la fin des 20 secondes, l'acquisition est interrompue, le frein du moteur est mis, le système est mis hors tension et le dispositif de chauffage est coupé. Une phase de refroidissement d'une heure permet le démontage de l'essai avec des températures de pièces adaptées à une manipulation manuelle.

Ce mode opératoire peut être symbolisé comme sur la figure II.40 :

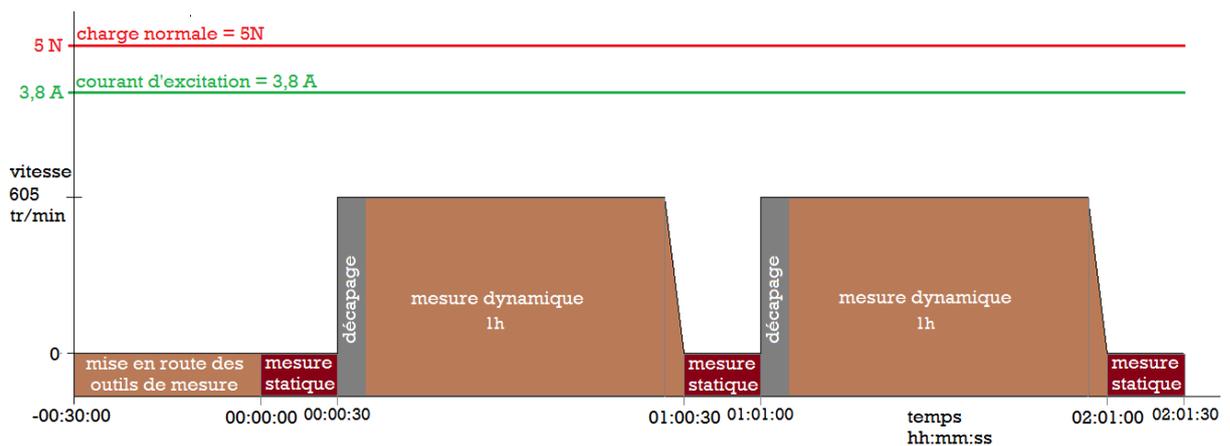


Figure II.40 - Représentation schématique du déroulement d'un essai lors des phases de mesure.

Chaque configuration d'essai sera répétée trois fois pour établir une moyenne statistiquement pertinente des mesures effectuées.

PLAN D'ESSAIS – Les essais ont été réalisés à raison de deux essais environ par jour, car il était nécessaire de laisser refroidir les éléments (à 135°C) avant de les démonter. Ils ont tous été réalisés en atmosphère ambiante sur le même banc, les réglages de celui-ci restant inchangés pendant la campagne.

| Réf. Essai | Matériau | Rugosité moyenne : Ra (μm) | Objet |
|------------|--------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Al1 | Aluminium 1050 | 0,84 à 0,91 | dureté faible oxyde dur |
| Al2 | Aluminium 1050 | 1,27 à 1,44 | |
| Al3 | Aluminium 1050 | 0,91 à 0,96 | |
| Cu1 | Cuivre Cw024 | 0,96 à 1,09 | référence |
| Cu2 | Cuivre Cw024 | 1,27 à 1,58 | |
| Cu3 | Cuivre Cw024 | 0,94 à 1,02 | |
| A37.1 | Acier A37 | 0,82 à 0,91 | dureté oxyde friable |
| A37.2 | Acier A37 | 0,87 à 0,95 | |
| A37.3 | Acier A37 | 0,91 à 1,03 | |
| CuCr1Zr1 | Cuivre-Chrome-Zirconium | 1,31 à 1,47 | dureté élevée |
| CuCr1Zr3 | Cuivre-Chrome-Zirconium | 1,16 à 1,30 | |
| CuCr1Zr4 | Cuivre-Chrome-Zirconium | 1,39 à 1,57 | |
| CuO1 | Cuivre Cw024 + oxyde CuO | 0,83 avant revêtement | oxyde maîtrisé |
| CuO3 | Cuivre Cw024 + oxyde CuO | 1,5 avant revêtement | |
| CuO4 | Cuivre Cw024 + oxyde CuO | 1,1 avant revêtement | |
| Au1 | Cuivre Cw024 + or | 1,41 avant revêtement | oxyde inexistant |
| Au2 | Cuivre Cw024 + or | 1,5 avant revêtement | |
| Au3 | Cuivre Cw024 + or | 1,49 avant revêtement | |
| Al4 | Aluminium 1050 | 1,46 | - |
| Al5 | Aluminium 1050 | 0,9 à 1,3 | - |
| Al6 | Aluminium 1050 | 1,32 | - |
| Al7 | Aluminium 1050 | 1,6 | - |

Table II.10 - Plan d'essais détaillé.

4 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les essais réalisés permettant l'enregistrement de plusieurs types de données, les résultats vont être différenciés et présentés séparément. En tout premier lieu nous présenterons les résultats en termes de résistance statique de contact, puis nous aborderons les résultats moyens de résistance dynamique de contact. Enfin, nous présenterons l'analyse fréquentielle des signaux de résistance de contact puis les résultats de frottement .

4.1 Résultats de Résistance Statique de Contact

La première mesure de chaque essai est une mesure de résistance statique, réalisée sur un disque sans film de transfert mais exposé à l'oxydation ambiante. Les deuxième et troisième mesures sont réalisées sur le même disque une fois qu'il est couvert d'un film de transfert. La comparaison permet de mettre en évidence la prépondérance du surcroît de résistance du film de transfert face à celui dû à l'oxyde naturel.

Les marqueurs représentent les valeurs mini, moyenne et maxi mesurées à $t = 0$ h, 1 h et 2 h, comme le montre l'exemple figure II.41).

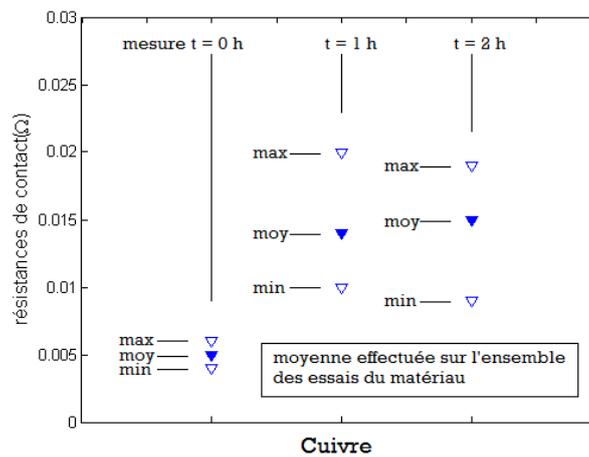


Figure II.41 - Lecture des marqueurs des graphes de résistance statique. Pour chaque matériau les marqueurs sont groupés par trois, chaque groupe de trois correspondant à un instant de mesure. Le premier groupe pour $t = 0$ h, le deuxième pour $t = 1$ h et le troisième pour $t = 2$ h.

Les figures II.42 et II.43 ci-dessous montrent l'évolution des résistances de contact statiques des balais négatifs pour chaque matériau.

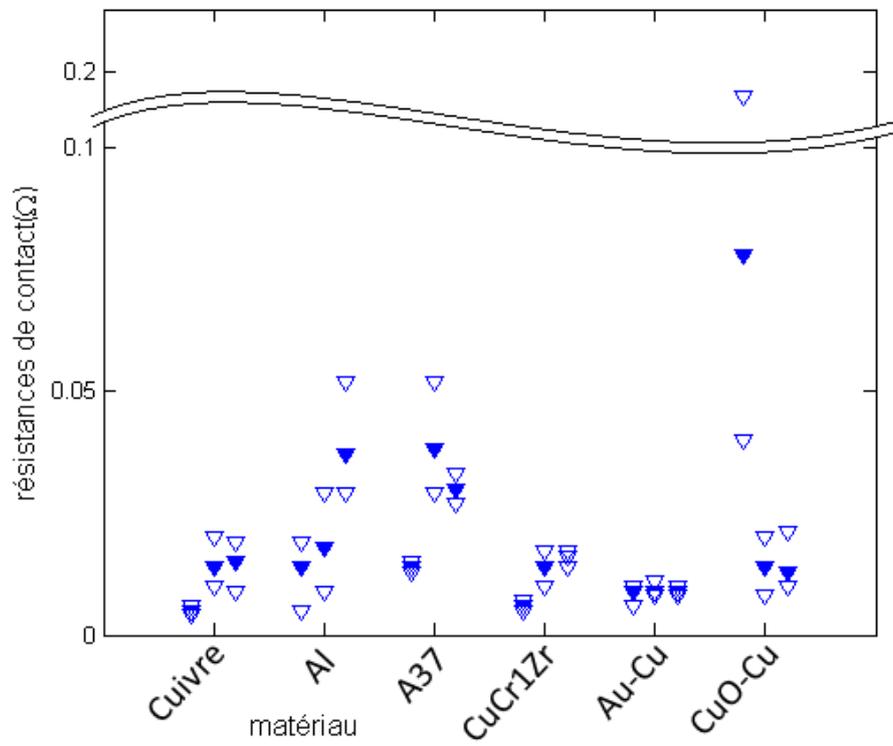


Figure II.42 - Évolution des Résistances de Contact Statiques des balais négatifs, par matériau.

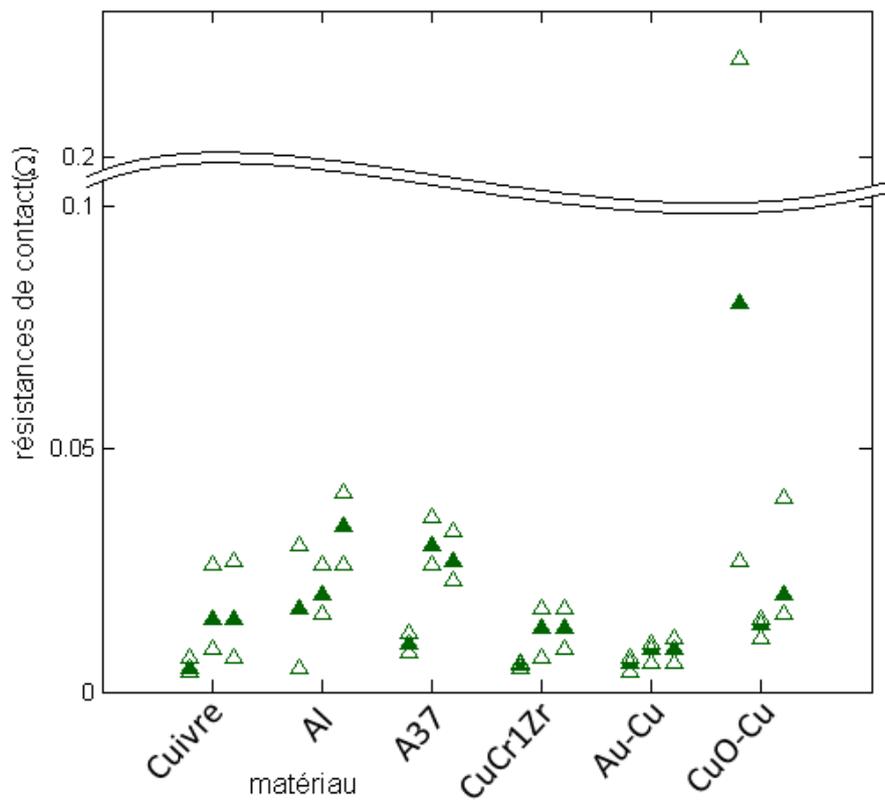


Figure II.43 - Évolution des Résistances de Contact Statiques des balais positifs, par matériau.

DISQUES REVÊTUS D'OR -

Nous pouvons, en premier lieu, constater que les disques revêtus d'Or minimisent les résultats de résistance de contact. Puisque toute oxydation provenant du disque est éliminée, la valeur de résistance de contact ne croissant pas en moyenne, ceci nous permet de conclure que la contribution du film de transfert de par sa résistivité propre est négligeable et que la fraction d'oxydation des composés du film provenant du balai peut être également négligée.

DISQUES "CUIVRÉS" -

La mesure de résistance statique initiale des disques Cuivre et CuCr_1Zr est légèrement inférieure à celle de l'or mais reste proche. Nous pouvons en conclure que l'oxydation initiale a peu d'influence sur la résistance de contact. Celle-ci croît par la suite avec le dépôt du film de transfert alors que celle de l'or ne croît pas : l'accroissement de résistance de contact est vraisemblablement dû à l'oxydation se créant au sein du film de transfert qui se dépose. Ceci nous informe que le rôle du film d'oxyde qui peut se former naturellement à la surface du disque cuivré et au sein du film de transfert pendant le fonctionnement tend à faire croître la résistance statique de contact.

DISQUES "RÉSISTIFS" -

Les résultats de résistance statique des contacts avec les disques en acier A37 et en Aluminium sont plus élevés que ceux du cuivre. Acier et Aluminium ont des résultats comparables alors que les résistivités du substrat sont différentes d'un facteur 10, on peut donc supposer que le surcroît de résistance de contact n'est pas causé par la résistivité du matériau utilisé. Elle serait donc causée, là aussi, à la fois par l'oxydation présente dans le film de transfert et par la présence même du film de transfert. La résistance du contact, plus élevée que pour les disques cuivrés, s'explique selon notre hypothèse par la résistivité plus élevée des oxydes d'acier et d'aluminium.

DISQUES REVÊTUS DE CuO -

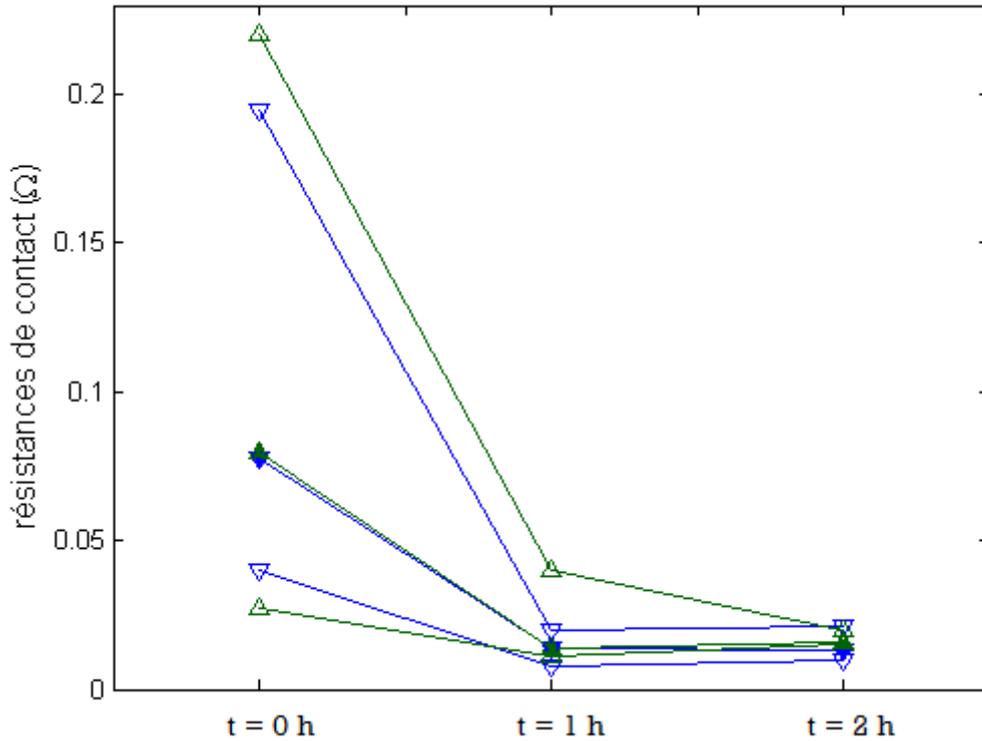


Figure II.44 - Évolution des Résistances de Contact Statiques pour les disques revêtus de CuO.

La figure II.44 ci-dessus montre l'évolution des résistances de contact statiques des couples balai-disque revêtu de CuO du début de l'essai à la fin de l'essai avec une mesure au milieu de l'essai (il n'y a aucun décapage au cours de l'essai sur ces disques). Comme observé sur les figures II.42 et II.43, les résistances de contact statiques à $t = 1$ et 2 h sont équivalentes à celles des disques Cuivre et CuCr₁Zr. La valeur initiale est très élevée.

Nous pouvons conclure que le film d'oxyde CuO de forte résistivité (voir tableau II.8) présent initialement en surface du disque cause la forte résistance statique initiale de contact. Lors de la mise en mouvement, le balai assure SEUL l'élimination de cette couche d'oxyde et permet de retrouver à $t = 1$ et 2 h un comportement débarrassé de l'influence du CuO.

Le balai, tant positif que négatif, a donc un pouvoir décapeur plus élevé que l'oxyde présent en surface ne croît ou se maintient sous l'effet de l'abrasion du balai. Les comportements des contacts négatif et positif sont très semblables (voir figure II.44 où nous constatons que les moyennes sont superposées et les mini et maxi proches) et nous pouvons dire que le décapage de la piste par le balai n'est globalement pas influencé par la polarité.

ESSAI DE LONGUE DURÉE -

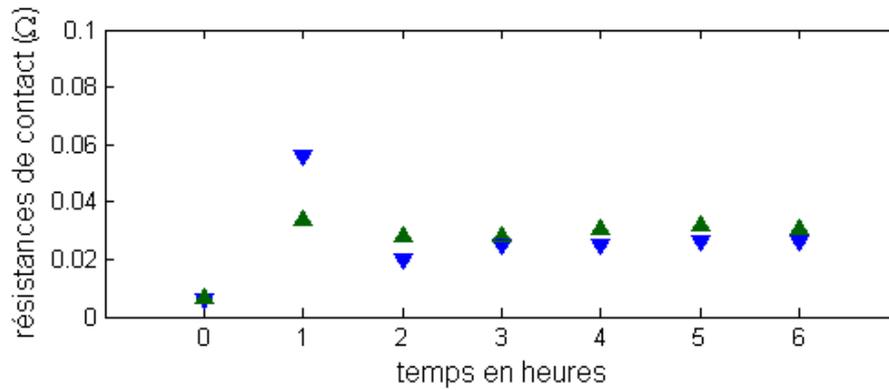


Figure II.45 - Évolution dans le temps de la résistance statique de contact.

Un essai de durée plus élevée (figure II.45) a validé la répétabilité du processus de dépôt de film de transfert : la deuxième phase de dépôt (entre $t = 1$ h et 2 h) et les phases suivantes donnent des résultats de résistance statique comparables.

4.2 Résistance Statique Moyenne : Tableau de Synthèse

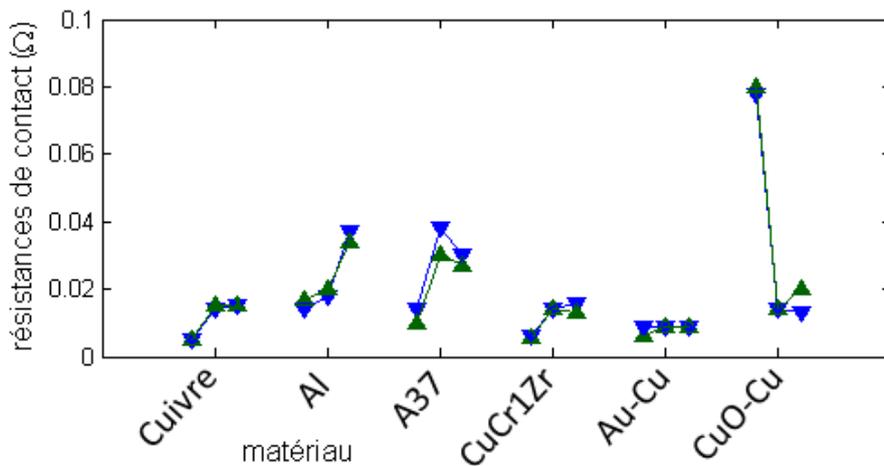


Figure II.46 - Résistance statique de contact moyenne.

La figure II.46 confirme la similarité de comportement du Cuivre et du CuCr_1Zr . On constate bien la forte décroissance de résistance de contact due au décapage dans le cas du CuO-Cu , matériau qui retrouve en deuxième et troisième valeurs un comportement comparable au deux autres disques cuivrés. Enfin nous voyons des comportements de l'aluminium et de l'acier qui sont dans des valeurs de résistance statique de contact tout à fait similaires.

Ce tableau de valeurs (table II.11) synthétise les mesures de résistance statique avec film de transfert (c'est-à-dire la moyenne des 2 dernières mesures de résistance statique de chaque essai) pour chacun des matériaux.

| Matériau | $R_1^m(\Omega)$ | $R_2^m(\Omega)$ |
|-----------|-----------------|-----------------|
| Cuivre | 0,014 | 0,015 |
| Aluminium | 0,028 | 0,027 |
| Acier A37 | 0,034 | 0,029 |
| CuCr1Zr | 0,015 | 0,013 |
| Au-Cu | 0,009 | 0,009 |
| CuO-Cu | 0,013 | 0,017 |

Table II.11 - Synthèse des Résistances Statiques de Contact.

4.3 Résultats de Résistance Dynamique de Contact

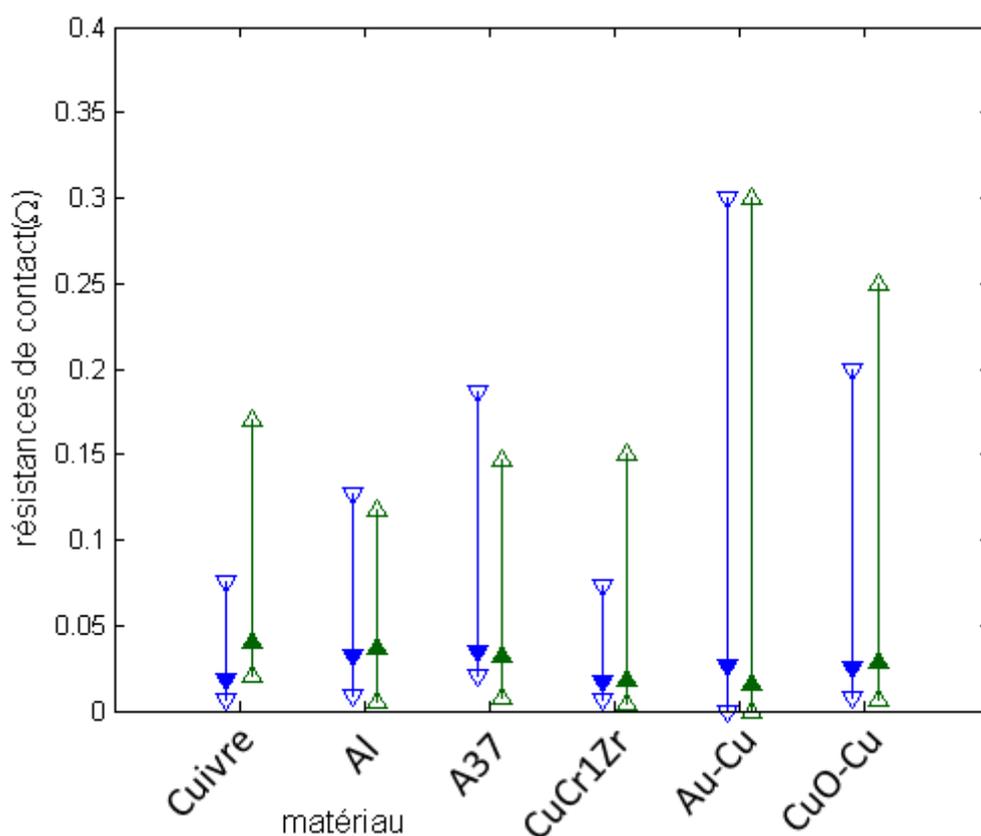


Figure II.47 - Résistance Dynamique de contact du balai positif. Les marqueurs bas et haut sont les mini et maxi, le marqueur intermédiaire est la moyenne de la population.

La figure II.47 juxtapose les résultats de résistance dynamique moyenne de contact pour les balais négatif et positif pour chaque matériau. Nous vérifions ici le comportement tout à fait comparable des deux disques cuivrés Cuivre et CuCr₁Zr. Nous pouvons constater, comme précédemment, que les comportements des deux disques résistifs sont proches, surtout si on s'intéresse aux valeurs moyennes très proches.

Le comportement du CuO-Cu est tel qu'on pouvait le prévoir après la lecture des résultats de résistance statique : après de fortes valeurs (le temps que le balai décape) les valeurs moyennes retrouvées sont quasiment celles des disques cuivrés. Les résultats dynamiques des disques revêtus

d'Or montrent néanmoins des maxima fort élevés, alors que les moyennes de résistance négative et positive sont très faibles. Ces maxima constituent une incohérence avec le comportement statique et même avec le comportement dynamique moyen.

Le tableau de valeurs (table II.12) ci-dessous synthétise les mesures de résistance dynamique pour l'ensemble des matériaux. Ces valeurs sont à rapprocher des graphes précédemment présentés.

| Matériau | Rés. Dyn. Balai - (Ω) | Rés. Dyn. Balai + (Ω) |
|-----------|--------------------------------|--------------------------------|
| Cuivre | 0,018 | 0,021 |
| Aluminium | 0,032 | 0,037 |
| Acier A37 | 0,035 | 0,032 |
| CuCr1Zr | 0,017 | 0,018 |
| Au-Cu | 0,026 | 0,016 |
| CuO-Cu | 0,025 | 0,029 |

Table II.12 - Synthèse des Résistances Dynamiques de Contact.

4.4 Analyse Spectrale des Résistances de Contact

La figure II.48 ci-dessous présente une analyse spectrale d'essai par matériau testé. Cette figure est destinée à mettre en évidence une préférence fréquentielle des phénomènes aboutissant aux plus fortes résistances dynamiques de contact (positives ou négatives). Les phénomènes d'extrêmes basses fréquences (de période supérieure à trois minutes) étant des phénomènes essentiellement de stabilisation thermique ou d'accommodation des surfaces (rodage, etc), ils sont filtrés et les graphes d'analyse spectrale présentés ici (figure II.48) et en annexe D sont établis sur des fréquences comprises entre 0,005 Hz et 2,5Hz.

La borne maximale est imposée par la fréquence d'échantillonnage choisie, 5Hz, qui limite le domaine de validité à des fréquences inférieures à 2,5Hz, soit la moitié.

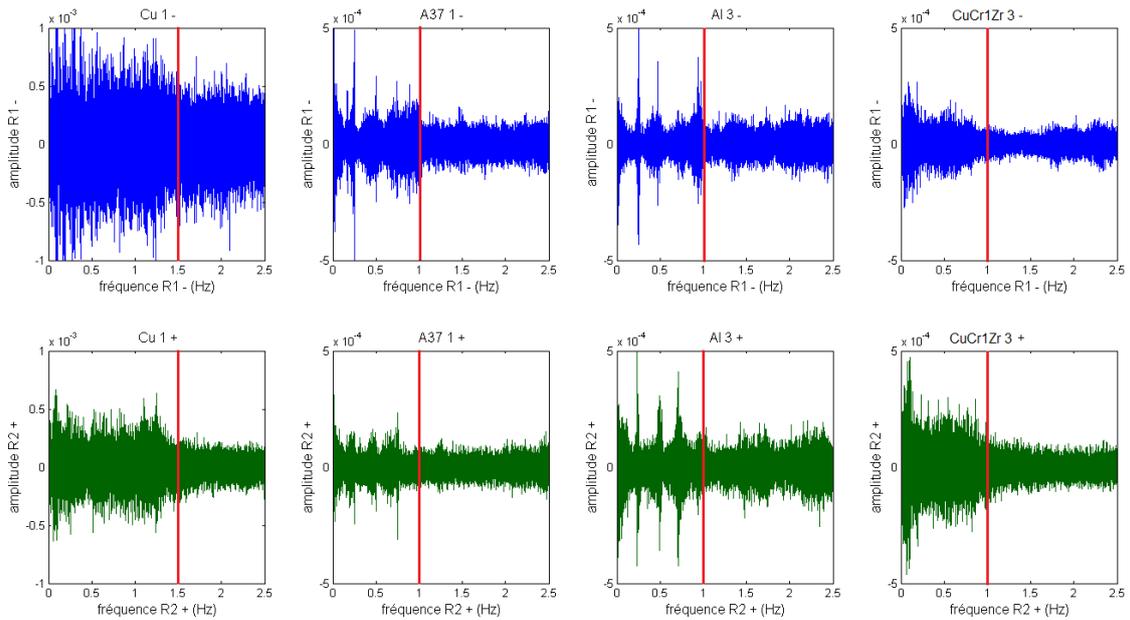


Figure II.48 - Comparaison entre matériaux de l'analyse spectrale des résistances de contact dynamiques.
En Bleu - Analyse du balai négatif.
En Vert - Analyse du balai positif.

Nous pouvons voir ci-dessus que les hautes résistances de contact apparaissent pour des fréquences basses, généralement inférieures à 1 Hz ou 1,5 Hz. Le cas du cuivre est un peu différent, tant par l'amplitude (l'échelle des graphes du cuivre est le double de celle des autres matériaux) que par la délimitation fréquentielle que nous placerons à 1,5 Hz contre 1 Hz pour les autres matériaux. Il n'en demeure pas moins une prépondérance assez nette des phénomènes de fortes résistances de contact à basse fréquence. Ceci rejoint une hypothèse selon laquelle les phénomènes d'élévation de résistance de contact sont des phénomènes basse fréquence.

Ce constat a éveillé notre curiosité et nous a amené à l'analyse par intercorrélation qui sera présentée au III.6

4.5 Résultats en Frottement

Nous avons mesuré les forces tangentielles résultant du frottement sous une force normale constante égale à 5 N. Le calcul nous amène au coefficient de frottement de chaque configuration balai-disque. Les résultats obtenus sont synthétisés ci-après sur les graphes de la figure II.49. Nous y juxtaposons les résultats précédents pour mettre en évidence le lien entre polarité et coefficient de frottement pour les différentes configurations.

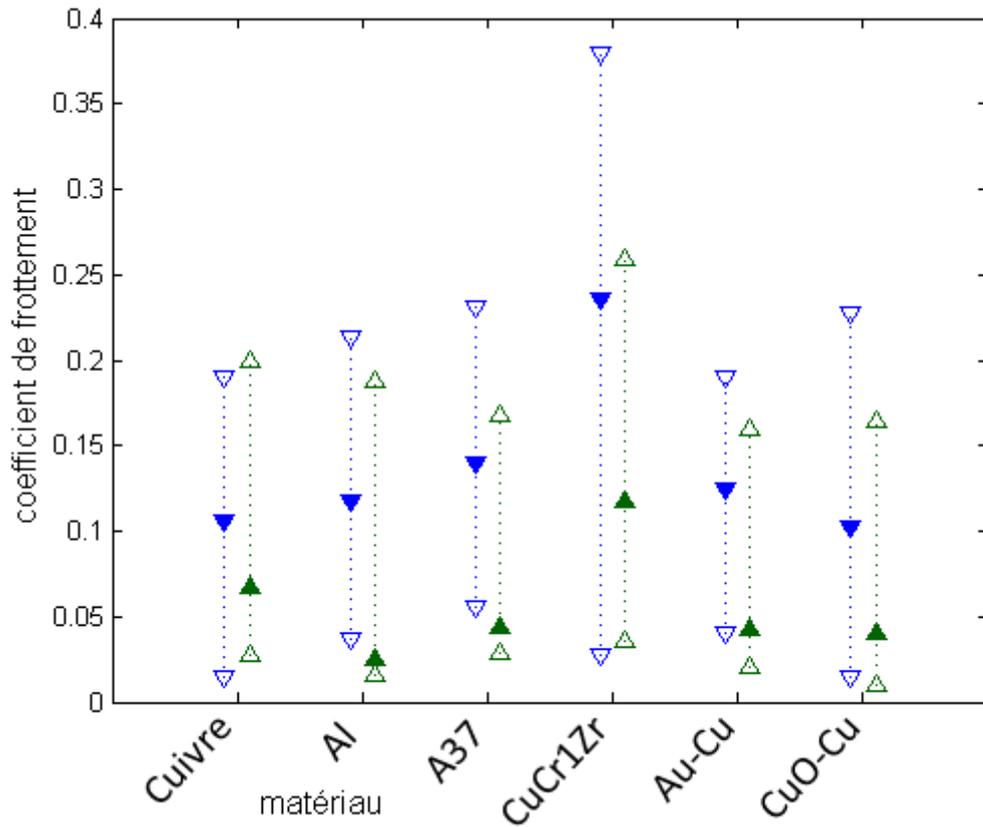


Figure II.49 - Coefficients de frottement des balais, fonction des matériaux.

En Bleu - Balais Négatifs.

En Vert - Balais Positifs.

Nous observons pour chaque essai un coefficient de frottement du balai positif globalement plus faible que le coefficient de frottement du balai négatif. Contrairement aux cas de résistances de contact, nous constatons une nette différence de comportement entre les disques Cuivre et CuCr₁Zr. Le frottement plus élevé pour les deux balais pourrait s'expliquer par la différence de dureté entre les deux matériaux. Ceci pourrait être appuyé par le frottement plutôt faible de l'aluminium, mou, en regard de celui du CuCr₁Zr.

Le comportement du Cuivre est à rapprocher de celui des disques revêtus, le revêtement plutôt mou (Or) ou facilement décapable (CuO) rapprochant les disques revêtus de leur homologue non revêtu.

Le tableau de valeurs (table III.21) synthétise les mesures de coefficient de frottement négatif f_1 et positif f_2 pour l'ensemble des matériaux. Ces valeurs sont à rapprocher des graphes précédents.

| Matériau | f_1 | f_2 |
|-----------|-------|-------|
| Cuivre | 0,106 | 0,067 |
| Aluminium | 0,117 | 0,025 |
| Acier A37 | 0,140 | 0,044 |
| CuCr1Zr | 0,236 | 0,117 |
| Au-Cu | 0,125 | 0,043 |
| CuO-Cu | 0,102 | 0,040 |

Table II.13 - Synthèse des Coefficients de Frottement Moyens.

4.6 Analyse Spectrale des Coefficients de Frottement

La figure II.50 ci-dessous présente une analyse spectrale d'essai par matériau testé. Cette figure est destinée à mettre en évidence une préférence fréquentielle des phénomènes aboutissant aux plus forts coefficients de frottement (positifs ou négatifs). Les phénomènes d'extrêmes basses fréquences sont également filtrés et les graphes d'analyse spectrale présentés ici et en annexe D sont toujours établis sur des fréquences comprises entre 0,005 Hz et 2,5Hz.

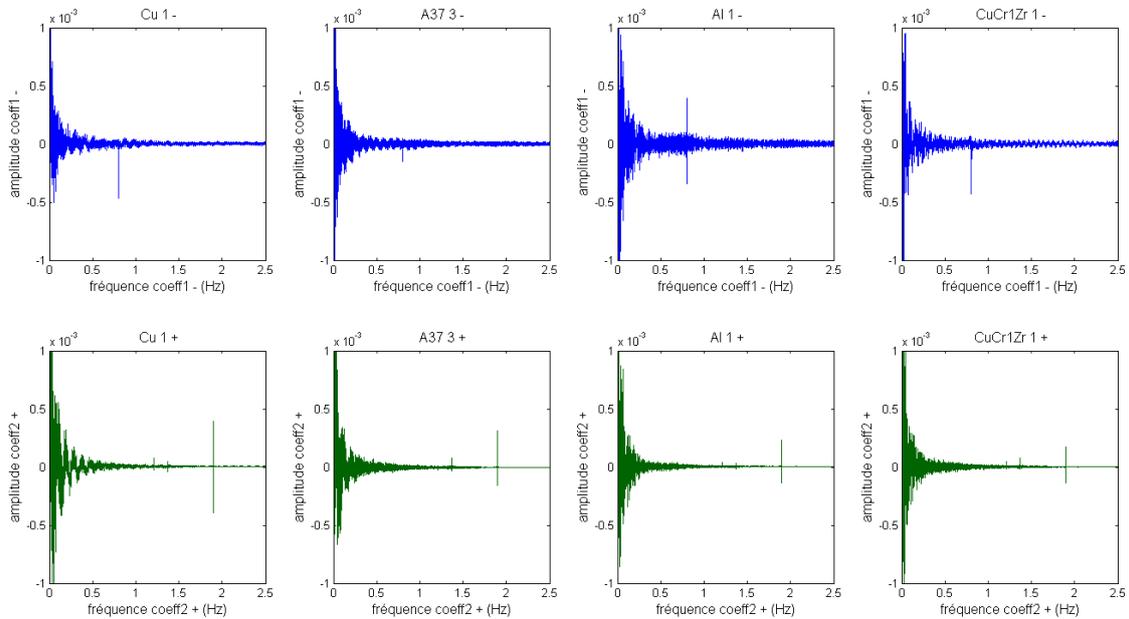


Figure II.50 - Comparaison entre matériaux de l'analyse spectrale des coefficients de frottement.

En Bleu - Analyse du balai négatif.

En Vert - Analyse du balai positif.

Sur l'exemple de courbes ci-dessus on distingue aisément la quasi-exclusivité des forts frottements à basse fréquence. Nous pouvons cependant voir des raies se trouvant à 0,8 Hz sur les résistances de balais négatifs et 1,8 Hz sur les résistances de balais positifs. Le fait que les fortes résistances et les forts frottements apparaissent à de basses fréquences nous a confirmé le bien fondé de l'analyse présentée en III.6.

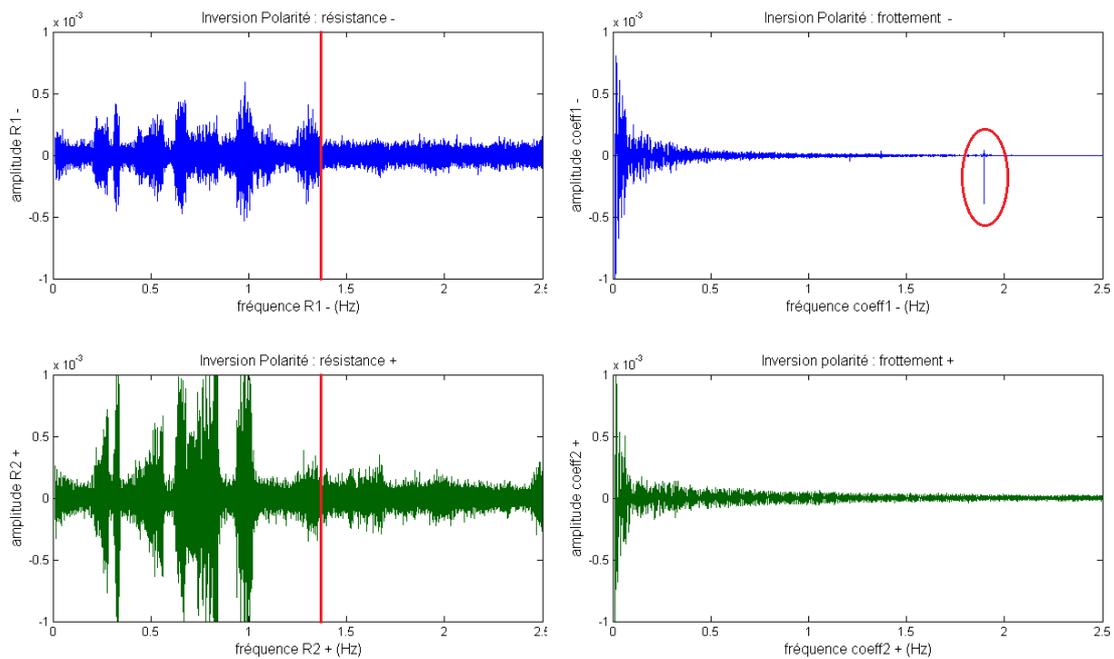


Figure II.51 - Analyse spectrale (résistance à gauche, frottement à droite) d'un essai d'inversion de polarité.

En Bleu - Analyse du balai négatif (instrumenté sur le bras précédemment instrumenté en positif).

En Vert - Analyse du balai positif (instrumenté sur le bras précédemment instrumenté en négatif).

La figure II.51 ci-dessus nous permet de statuer sur la fréquence "parasite" apparaissant à 1,9 Hz environ sur les graphes d'analyse spectrale des signaux de frottement. En effet, alors que les essais précédents affichaient une raie additionnelle à environ 0,8 Hz (signal de frottement du balai négatif) et à 1,9 Hz (signal de frottement du balai positif), l'essai d'inversion de polarité affiche cette fréquence parasite de 1,9 Hz sur le signal de frottement **négatif**.

Même si la raie à 0,8 Hz n'apparaît pas avec une amplitude suffisante pour être clairement mise en évidence, nous pouvons supposer que l'inversion de polarité induit une inversion de ces raies parasite et donc que ces deux raies relèvent d'une singularité associée à l'instrumentation et non au phénomènes étudiés.

Les courbes précédentes appuient cependant que les fortes résistances de contact dynamique sont associées à des plages de fréquences basses, inférieures à 1,5 Hz.

CONCLUSION

L'électro-tribomètre que nous avons instrumenté, validé et utilisé pour cette campagne d'essais s'est avéré d'une grande efficacité. Le tableau (II.14) ci-dessous résume les conditions d'essais, les paramètres en jeu et les valeurs issues de la mesure.

| CONDITIONS D'ESSAI | PARAMÈTRES D'ENTRÉE | PARAMÈTRES DE SORTIE |
|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Double contact balai-disque | Charge Normale 5 N | $R_k(t)$ précision 1 % (dynamique) |
| Atmosphère ambiante | Courant Continu 3,8 A | R_k^m précision 1 % (statique) |
| Température 130 °C | Vitesse 605 tr/min | $F_1(t)$ précision 1 ‰ |
| Pré-rodage des balais | Différents Matériaux de Disque | $F_2(t)$ précision 1 ‰ |
| Balai Standard | Dureté et Résistivité | $i_{exc}(t)$ précision 1 % |

Table II.14 - Synthèse des principales caractéristiques d'essai

Les paramètres multiphysiques des essais souhaités induisent une forte spécificité du tribomètre que nous avons instrumenté : deux mesures de frottement, deux mesures de résistance, une mesure de courant et une mesure de tension (pour contrôle du bon déroulement des essais) ont été réalisées simultanément. La mise au point de ce banc nous a permis de nous concentrer sur les paramètres d'essai que nous avons choisis.

En ne jouant que sur le changement de matériau du disque comme variable, nous avons traité deux paramètres mécaniques qui sont la dureté du métal et celle de ses oxydes et deux paramètres électriques que sont les résistivités du métal pur et de ses oxydes.

Ces essais nous ont livré des résultats bruts qui ont été présentés dans cette deuxième partie. Ceux-ci nous ont déjà confirmé le bien-fondé du choix du déroulement des essais, notamment de leur durée et du nombre de mesures statiques à effectuer pour caractériser le film de transfert. De plus, le pouvoir décapant du balai a été mis en avant par les résultats de mesure statique, tandis que les analyses spectrales des variations de résistance de contact nous amenaient à vérifier qu'elles ont bien toutes lieu à des fréquences faibles (inférieures à 1,5Hz).

Ceci nous éclaire sur la nature des phénomènes qui semblent donc ne pas être liés aux caractéristiques constantes des matériaux (fréquence $\ll 1,5$ Hz), ni à l'établissement et la rupture en temps réels de points de contact électrique (fréquence $\gg 1,5$ Hz). Grâce aux recherches bibliographiques de la partie I et aux calculs que nous avons réalisés, nous avons décomposé la mesure de résistance effectuée en mesure de résistance de film de surface, mesure de résistance de film de transfert et résistance propre du système, qui se trouve, elle, indépendante de toutes les conditions de fonctionnement (vitesse de glissement, distance de glissement, température, etc.).

Ces données vont être analysées et les influences croisées des différents paramètres et phénomènes vont être maintenant abordés.

Nous concluerons sur l'influence des caractéristiques mécaniques et électriques des matériaux sur les résistances de contact et sur le pouvoir décapant du balai vis-à-vis des oxydes naturellement en présence sur les disques. Nous montreront également l'influence du film de transfert sur les résistances de contact et, puisque le principe de la mesure simultanée de résistance de contact et de frottement constitue une riche source d'informations, nous exploiterons ces résultats afin de mettre en évidence les interactions entre résistance et frottement.

Troisième partie

ANALYSE-DISCUSSION

1 CALCUL PRÉALABLE DES RÉSIDENCES THÉORIQUES DE CONTACT STATIQUE

La figure III.52 ci-dessous présente le type d'enregistrements simultanés de résistance et de frottement que nous avons obtenus pour différents matériaux.

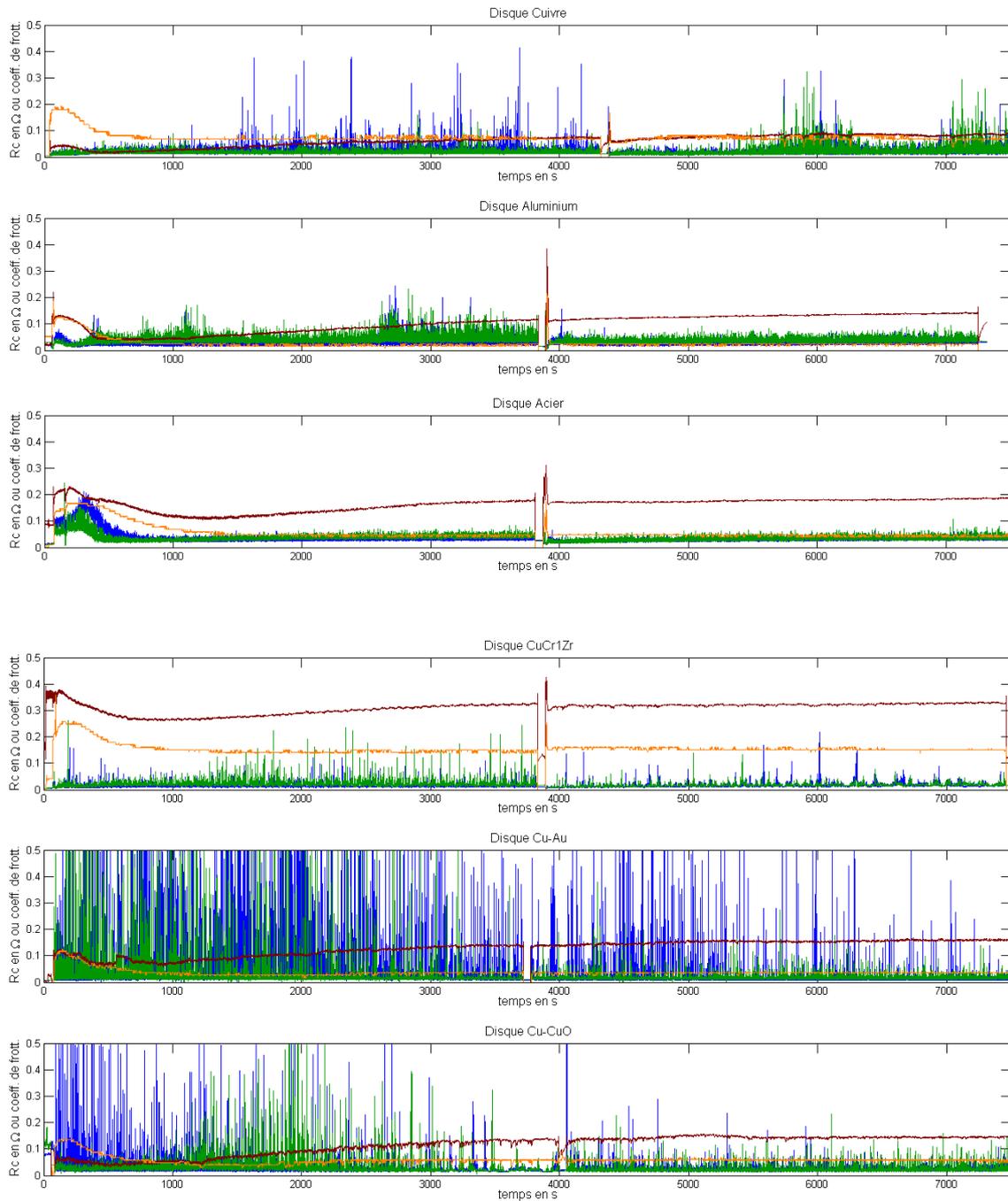


Figure III.52 - Courbes de mesures de résistances de contact et de frottement pour différents matériaux.

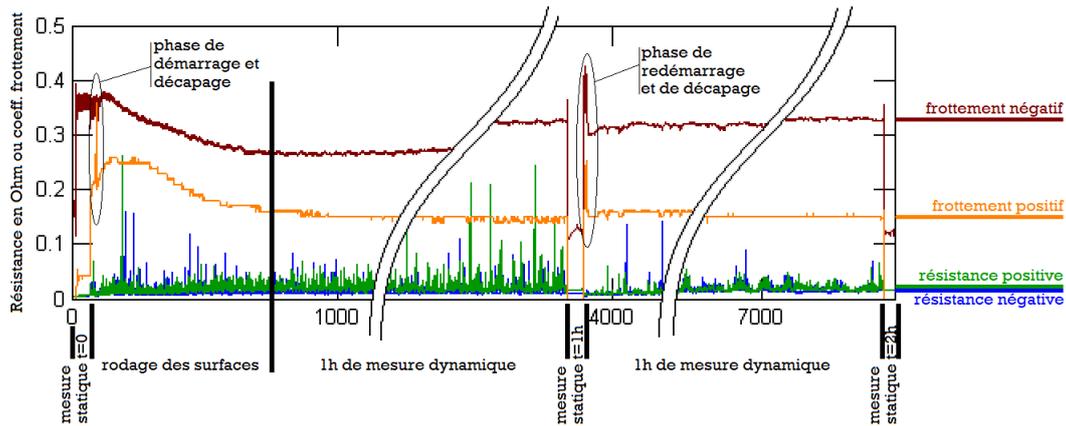


Figure III.53 - Détail d'une courbe expérimentale.

Comme le montre la figure III.53 et les courbes générales de la figure III.52, chaque mesure regroupe l'acquisition simultanée des résistances et frottements négatifs et positifs. Nous pouvons y voir en bleu la résistance de contact négative, en vert la résistance positive, en rouge brique la force tangentielle de frottement du balai négatif et en orange la force tangentielle de frottement du balai positif. La figure III.53 montre les instants où est effectuée chaque mesure statique.

Le tableau suivant (III.16) rappelle, avec les notations définies tableau (III.15), les valeurs de résistance statique de contact aux bornes du contact glissant balai-disque.

| Valeur | Désignation | Unité |
|------------|--|----------|
| R_1^{mk} | Mesure à t=k heure(s) de résistance statique du film sous le balai négatif | Ω |
| R_2^{mk} | Mesure à t=k heure(s) de résistance statique du film sous le balai positif | Ω |
| R_1^m | Moyenne de R_1^{m1} et R_1^{m2} | Ω |
| R_2^m | Moyenne de R_2^{m1} et R_2^{m2} | Ω |

Table III.15 - Notations utilisées pour la caractérisation des résistances de contact statiques

| Matériau | en $m\Omega$ | | | | | |
|-----------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | R_1^{m0} | R_1^{m1} | R_1^{m2} | R_2^{m0} | R_2^{m1} | R_2^{m2} |
| Cuivre | 5 | 14 | 15 | 5 | 15 | 15 |
| Aluminium | 14 | 18 | 37 | 17 | 20 | 34 |
| Acier A37 | 14 | 38 | 30 | 10 | 30 | 27 |
| CuCr1Zr | 6 | 14 | 16 | 5,7 | 13 | 13 |
| Au-Cu | 6 | 9 | 9 | 6 | 9 | 9 |
| CuO-Cu | 112 | 13 | 14 | 96 | 13 | 25 |

Table III.16 - Synthèse des Résistances Statiques de Contact.

Les mesures statiques sont effectuées initialement sur le disque neuf et caractérisent donc la résistance du film de surface se trouvant sur celui-ci : oxydes, impuretés. Les mesures à t = 1 et 2 h après fonctionnement permettent de caractériser le film de transfert qui s'est déposé sur le disque au cours de l'heure de fonctionnement précédant la mesure.

Nous pouvons y constater des différences significatives entre les coefficients, mais également sur les valeurs des résistances de contact et de leur dispersion. Au 1.2.2.2, nous avons vu qu'il est possible de décomposer la résistance de contact globale en : résistance des matériaux + résistance de constriction + résistance de film de transfert/film de surface.

Ces expressions connues et stables nous permettent de calculer toutes les résistances sauf celles du film. Nous allons donc comparer les mesures à la partie calculable théoriquement pour déterminer les résistances des films.

Nous allons présenter la décomposition théorique des résistances de contact et les applications numériques associées, elles nous amèneront à mettre en évidence le rôle essentiel du film de transfert et de ce qui se passe à l'intérieur de celui-ci. Une des hypothèses fortes précédant cette étude était que l'oxydation influence fortement les valeurs de résistances de contact. Nous en discuterons ensuite.

1.1 Résistance de Constriction et Résistances des Matériaux Utilisés

Nous rappelons les expressions (24) et (26) établies précédemment :

$$R_{systeme} = R_A + R_B + R_c + R_{film}$$

avec R_c la résistance de constriction.

$$R_{systeme} = R_A + R_B + \frac{\rho_A + \rho_B}{4} \sqrt{\frac{\pi H}{F}} + \frac{\rho_{film} e_{film} H}{F}$$

Or notre grande inconnue est la résistance du film (de surface ou de transfert), puisque nous ne connaissons théoriquement ni sa résistivité ni son épaisseur. En revanche nous avons des mesures de résistance statique qui est l'homologue expérimental du $R_{systeme}$ de l'expression théorique (26).

Cette résistance totale mesurée que nous appellerons R_k^m est la moyenne des mesures de résistances statiques à $t = 1$ et 2 h. La valeur initiale R_k^{m0} est donnée par la mesure de résistance statique initiale ($t = 0$ h) sans film de transfert. La différence de la résistance mesurée par la résistance théorique calculée nous donne une valeur de résistance de film.

Nous pouvons espérer comparer la valeur issue de la différence des deux mesures à la valeur issue de la différence de la résistance mesurée et de la valeur théorique des résistances matériau.

Nous complétons les notations du tableau (III.15) en définissant :

| Valeur | Désignation | Unité |
|------------|---|------------|
| R_1^F | Résistance du film de transfert négatif | Ω |
| R_2^F | Résistance du film de transfert positif | Ω |
| R_1^{FS} | Résistance du film de surface négatif | Ω |
| R_2^{FS} | Résistance du film de surface positif | Ω |
| R_A | Résistance du disque | Ω |
| R_B | Résistance du balai | Ω |
| ρ_A | Résistivité du disque | $\Omega.m$ |
| ρ_B | Résistivité du balai | $\Omega.m$ |
| H | Dureté du disque en question | $N.m^{-2}$ |
| F | Effort normal appliqué sur le contact | N |
| s_A | Section de passage de courant dans le disque | m^2 |
| l_A | Longueur du passage conducteur dans le disque | m |
| s_B | Section de passage de courant dans le balai | m^2 |
| l_B | Longueur du passage conducteur dans le balai | m |

Table III.17 - Notations expérimentales définies pour le calcul de la résistance du film.

Par analogie avec les équations précédentes et en utilisant les notations expérimentales présentées ci-dessus, nous avons :

$$R_1^F = R_1^m - R_A - R_B - \frac{\rho_A + \rho_B}{4} \sqrt{\frac{\pi H}{F}} \quad (51)$$

$$R_2^F = R_2^m - R_A - R_B - \frac{\rho_A + \rho_B}{4} \sqrt{\frac{\pi H}{F}} \quad (52)$$

Comme les valeurs sont toutes connues, nous allons exprimer ces deux équations en fonction des variables matériau : la résistivité ρ_A et la dureté H . D'où :

$$\begin{aligned} R_1^F &= R_1^m - \rho_A \frac{l_A}{s_A} - \rho_B \frac{l_B}{s_B} - \rho_A \sqrt{\frac{\pi H}{16F}} - \rho_B \sqrt{\frac{\pi H}{16F}} \\ \Rightarrow R_1^F &= R_1^m - \rho_A \left(\frac{l_A}{s_A} - \sqrt{\frac{\pi H}{16F}} \right) - \rho_B \left(\frac{l_B}{s_B} - \sqrt{\frac{\pi H}{16F}} \right) \end{aligned}$$

Nous vérifions que cette expression est bien homogène à une résistance :

$$R_1^F = [\Omega] - [\Omega][m] \left(\frac{[m]}{[m]^2} - \sqrt{\frac{[N]}{[m]^2} \frac{1}{[N]}} \right) - [\Omega][m] \left(\frac{[m]}{[m]^2} - \sqrt{\frac{[N]}{[m]^2} \frac{1}{[N]}} \right) = [\Omega]$$

Les applications numériques nous amènent à :

$$R_1^F = R_1^m - \left(200 - 0,4431 \sqrt{\frac{H}{F}} \right) \rho_A - \left(485,7 - 0,4431 \sqrt{\frac{H}{F}} \right) \rho_B \quad (53)$$

$$R_2^F = R_2^m - \left(200 - 0,4431 \sqrt{\frac{H}{F}} \right) \rho_A - \left(485,7 - 0,4431 \sqrt{\frac{H}{F}} \right) \rho_B \quad (54)$$

Nous appelons \mathbb{R} résistance propre du système et posons :

$$\mathbb{R} = \left(200 - 0,4431 \sqrt{\frac{H}{F}} \right) \rho_A - \left(485,7 - 0,4431 \sqrt{\frac{H}{F}} \right) \rho_B$$

C'est la somme des résistances théoriques des matériaux et de constriction. \mathbb{R} est appelée ainsi car elle ne dépend théoriquement pas des conditions de fonctionnement (durée d'essai, vitesse de glissement, etc.). La table III.18 ci-dessous en présente les valeurs obtenues par ce calcul :

| Matériau | Valeur théorique de \mathbb{R} en $m\Omega$ |
|----------------------------|---|
| Cuivre Cw024a | 2,423 |
| Aluminium 1050 | 2,428 |
| Acier A37 | 2,468 |
| CuCr1Zr | 2,421 |
| Cuivre revêtus (Au ou CuO) | 2,423 |
| moyenne | 2,432 |

Table III.18 - Valeurs de théorique de la résistance propre (résistance matériaux + résistance de constriction).

1.2 Différenciation de la Résistance des Films à l'Interface

Telle que \mathbb{R} a été définie, les équations (53) et (54) amènent à la simplification suivante :

$$\begin{cases} R_1^F = R_1^m - \mathbb{R} \\ R_2^F = R_2^m - \mathbb{R} \end{cases} \quad (55)$$

Nous définissons R_k^{FS} comme la résistance de film de surface. Elle est obtenue par le même calcul que R_k^F , seule la valeur mesurée R_k^m est différente. C'est R_k^{m0} qui est utilisée, c'est la résistance initiale statique de contact sans film de transfert.

$$R_k^{FS} = R_k^{m0} - \mathbb{R} \quad (56)$$

| Matériau | R_1^{FS} en $m\Omega$ | R_2^{FS} en $m\Omega$ |
|----------------|-------------------------|-------------------------|
| Cuivre Cw024a | 2,8 | 2,3 |
| Aluminium 1050 | 11,9 | 14,6 |
| Acier A37 | 11,2 | 7,5 |
| CuCr1Zr | 3,2 | 3,2 |
| Cuivre-Au | 3,6 | 3,6 |
| Cuivre-CuO | 109,2 | 93,2 |

Table III.19 - Valeurs des résistances du film initialement en présence sur le disque (film d'oxydes et d'impuretés éventuelles).

Nous pouvons donc évaluer la résistance des films de transfert pour chaque matériau testé. Ce calcul est effectué en soustrayant \mathbb{R} à la valeur de résistance statique mesurée lorsque le film de transfert est établi, c'est à dire à la moyenne des mesures à $t = 1$ h et 2 h. Le tableau III.20 présente ces résultats :

| Matériau | Valeur théor. de $R_1^F (m\Omega)$ | Valeur théor. de $R_2^F (m\Omega)$ |
|----------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Cuivre Cw024a | 11,6 | 12,6 |
| Aluminium 1050 | 25,4 | 24,9 |
| Acier A37 | 31,7 | 26,2 |
| CuCr1Zr | 12,2 | 10,6 |
| Cuivre-Au | 6,6 | 6,4 |
| Cuivre-CuO | 11,2 | 16,4 |

Table III.20 - Valeurs des résistances des films de transfert en fonction des matériaux et de la polarité.

Nous constatons que la résistance de film de transfert négatif est supérieure à celle du film positif comme le prévoient Shobert [2], Thomson & Turner [9] et Casstevens [14]. Le cas de la résistance de film de surface vérifie également que le film de surface négatif a une résistance supérieure ou égale à celle du film positif, sauf dans le cas de l'aluminium.

Les résistances de film de transfert sont très variables d'un matériau à l'autre et sont vraisemblablement influencée par la présence dans le film de particules des différents métaux et de leurs oxydes respectifs, ces matériaux ayant des caractéristiques fort différentes.

Les résultats en résistance sont très intéressants, ils confirment la théorie abordée en partie bibliographique, mais, nous allons le voir, il est important de les relier aux caractéristiques des matériaux mais aussi de les lier aux résultats de frottement.

2 ANALYSE DES RÉSULTATS EN FROTTEMENT

Comme la figure III.53 le montrait au paragraphe précédent, les différences constatées entre le frottement positif et le frottement négatif élevées. De plus, le frottement est très différent d'un matériau à l'autre (voir l'exemple de la figure III.52 où un exemple de graphe pour chaque matériau est présenté). Nous allons présenter et analyser ces comportements, mais au préalable nous allons rappeler les résultats de frottement et les analyser en valeur absolue.

2.1 Rappel des Résultats

Nous rappelons que sous une charge normale constante $F_N = 5N$, nous avons fait une mesure de la force tangentielle $F_k(t)$. Les courbes présentées montrent les coefficients de frottement suivant la définition suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_1 = \frac{F_1(t)}{F_N} \text{ le coefficient de frottement du balai négatif en marron} \\ \mu_2 = \frac{F_2(t)}{F_N} \text{ le coefficient de frottement du balai positif en orange} \end{array} \right. \quad (57)$$

Ce tableau de valeurs (table III.21) synthétise les mesures de coefficient de frottement négatif f_1 et positif f_2 pour l'ensemble des matériaux. Ces valeurs sont à rapprocher des graphes précédents.

| Matériau | f_1 | f_2 |
|-------------------------------|-------|-------|
| Cuivre | 0,106 | 0,067 |
| Aluminium | 0,117 | 0,025 |
| Acier A37 | 0,140 | 0,044 |
| CuCr1Zr | 0,236 | 0,117 |
| Au-Cu | 0,125 | 0,043 |
| CuO-Cu | 0,102 | 0,040 |
| Essai d'inversion de polarité | 0,095 | 0,070 |

Table III.21 - Synthèse des Coefficients de Frottement.

Le calcul du coefficient de frottement nous amène à des valeurs qui sont synthétisées graphiquement ci-après sur les graphes de la figure III.54.

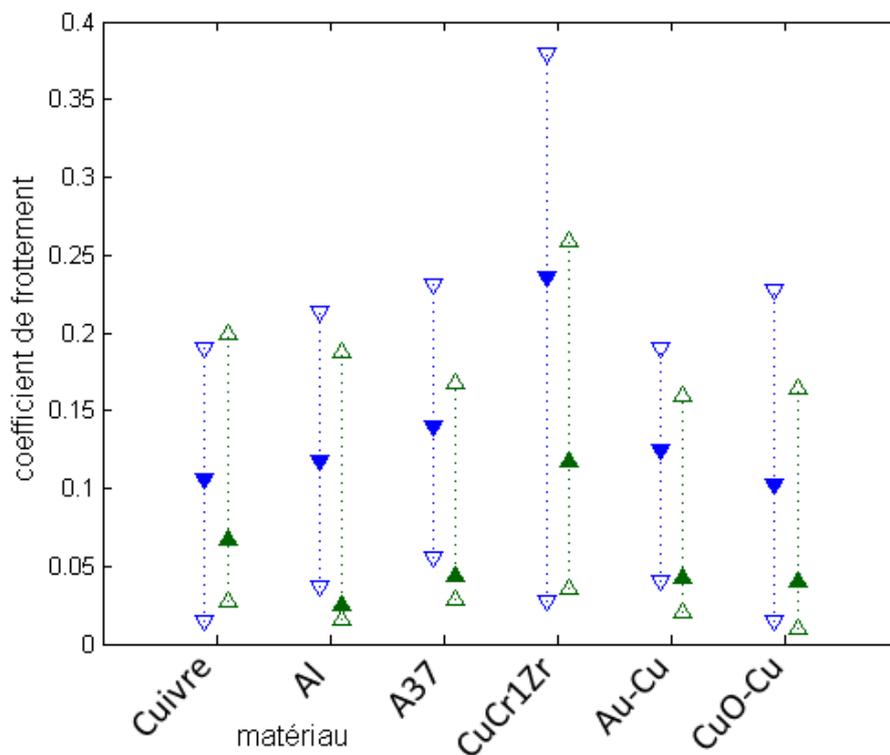


Figure III.54 - Coefficients de frottement des balais, fonction des matériaux.

Nous vérifions pour chaque essai un coefficient de frottement moyen (marqueurs pleins) du balai positif plus faible que le coefficient de frottement du balai négatif. Ce constat est en accord avec les résultats de Bouchoucha et col. [43].

Nous constatons que les disques revêtus ont un comportement comparable aux disques Cuivre. Nous verrons plus tard que dans le cas du disque CuO-Cu, le fonctionnement revient très vite équivalent à un simple disque Cuivre. Des différences dans l'acquisition des données nous ont conduit à faire un essai en inversant le sens de passage du courant.

Cet essai d'inversion de polarité, figure III.55, montre que la différence (frottement négatif en marron, frottement positif en orange) de valeurs entre valeurs négatives et positives n'est pas due à une

singularité expérimentale mais qu'elle est bien phénoménologique. En effet, l'inversion de polarité maintient la supériorité du frottement négatif sur le frottement positif.

La résolution du capteur de frottement, dont nous voyons les "escaliers" sur le signal mesuré, est bien une conséquence expérimentale et n'est pas phénoménologique. En effet le signal "à escaliers" précédemment sur le balai positif est passé sur le balai négatif conformément à l'inversion de polarité effectuée.

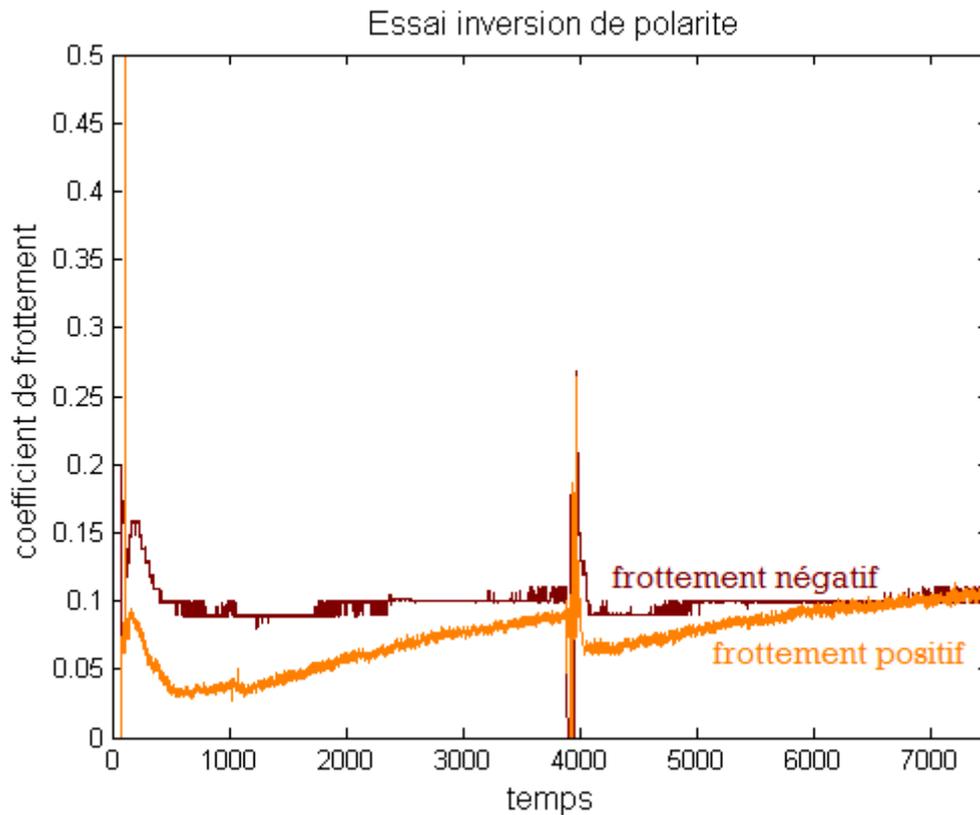


Figure III.55 - Coefficients de frottement des balais, inversion de polarité.

Les disques Aluminium, Acier A37 et CuCr1Zr ont des frottements très différents de ceux du cuivre et nous poursuivons ci-après l'analyse pour mettre en évidence les influences et proposer une explication justifiant les comportements des matériaux en frottement.

Nous allons étudier dans un premier temps les matériaux non revêtus dont les caractéristiques intrinsèques n'ont qu'une influence modérées sur les résultats de résistance ou de frottement. Cela nous amènera à mettre en évidence le rôle prépondérant des événements à l'interface du contact, où les films de surface et de transfert et leur constitution ont une influence de premier ordre.

2.2 Influence des Caractéristiques des Oxydes sur le Frottement

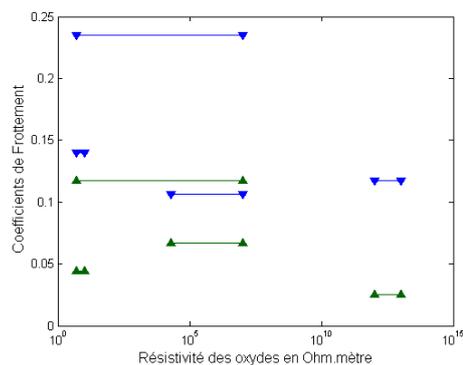
Les tableaux de valeurs (III.56(a)) et (III.56(b)) juxtaposent les valeurs de résistivité et de dureté des oxydes et les coefficients de frottement négatif f_1 et positif f_2 :

| Matériau | Résistivité des Oxydes ($\Omega.m$) | f_1 | f_2 |
|----------------|---------------------------------------|-------|-------|
| Cuivre Cw024a | 2.10^4 à 10^7 | 0,106 | 0,067 |
| Aluminium 1050 | 10^{12} à 10^{13} | 0,117 | 0,025 |
| Acier A37 | 5 à 10 | 0,140 | 0,044 |
| CuCr1Zr | 5 à 10^7 | 0,235 | 0,117 |

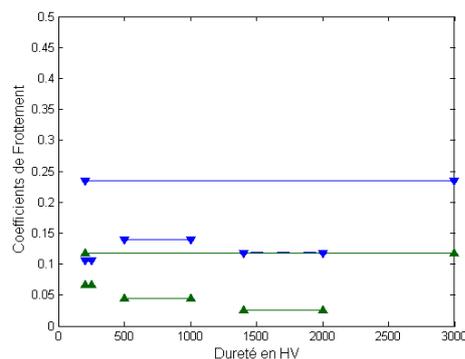
(a) Table de valeurs de résistivité

| Matériau | Dureté des Oxydes en HV | f_1 | f_2 |
|----------------|-------------------------|-------|-------|
| Cuivre Cw024a | 200 à 250 | 0,106 | 0,067 |
| Aluminium 1050 | 1400 à 2000 | 0,117 | 0,025 |
| Acier A37 | 500 à 1000 | 0,140 | 0,044 |
| CuCr1Zr | 200 à 3000 | 0,235 | 0,117 |

(b) Table de valeurs de dureté



(c) Coefficients de frottement fonction de la résistivité des oxydes



(d) Coefficients de frottement fonction de la dureté des oxydes

Figure III.56 - (Non-)Influence des caractéristiques des oxydes sur le frottement

Dans ce cas encore, les figures III.56(c) et III.56(d) ci-dessus et les tableaux associés ne permettent de dégager aucune tendance. Nous rencontrons les mêmes difficultés liées aux plages des duretés et à l'information insuffisante apportée par la seule notion de résistivité.

3 INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES ELECTRIQUES ET MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX

Nous avons précédemment séparé la résistance propre des éléments \mathbb{R} des résistances de film R_k^{FS} et R_k^F . Les caractéristiques intrinsèques de chacun des matériaux testés influencent directement et dans une quantité connue la valeur de \mathbb{R} ; nous allons l'aborder en premier lieu. L'influence des caractéristiques des matériaux sur le film de transfert sera étudiée par la suite.

3.1 Influence de la Résistivité du Matériau

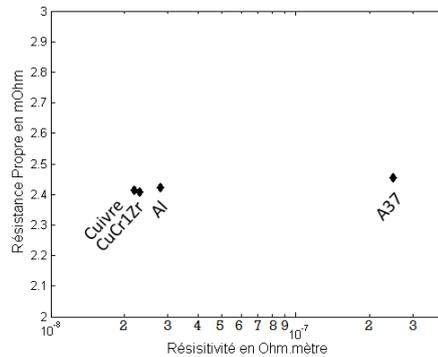
Film de transfert excepté, nous avons calculé la résistance propre du système et les tableaux de valeurs (III.57(a)) et (III.57(b)) juxtaposent les valeurs de \mathbb{R} , de résistivité du disque ρ_A et de coefficients de frottement négatif f_1 et positif f_2 :

| Matériau | \mathbb{R} en $m\Omega$ | ρ_A en $\Omega.m$ |
|----------------|---------------------------|------------------------|
| Cuivre Cw024a | 2,413 | $2,2.10^{-8}$ |
| Aluminium 1050 | 2.422 | $2,8.10^{-8}$ |
| Acier A37 | 2.456 | 25.10^{-8} |
| CuCr1Zr | 2.408 | $2,3.10^{-8}$ |

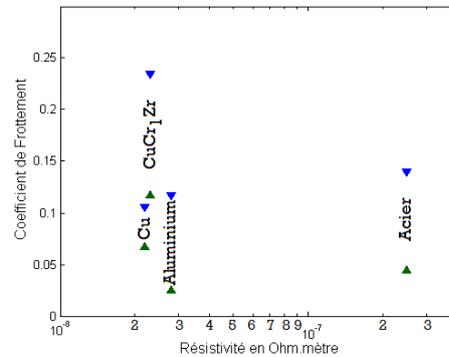
(a) Table de valeurs de résistance propre

| Matériau | ρ_A en $\Omega.m$ | f_1 | f_2 |
|----------------|------------------------|-------|-------|
| Cuivre Cw024a | $2,2.10^{-8}$ | 0,106 | 0,067 |
| Aluminium 1050 | $2,8.10^{-8}$ | 0,117 | 0,025 |
| Acier A37 | 25.10^{-8} | 0,140 | 0,044 |
| CuCr1Zr | $2,3.10^{-8}$ | 0,235 | 0,117 |

(b) Table de valeurs de frottement



(c) Résistance propre fonction de la résistivité



(d) Frottement fonction de la résistivité

Figure III.57 - (Non-)Influence de la Résistivité sur la résistance propre et le frottement

Même si nous constatons sur la figure III.57(c) que le matériau le plus résistif est celui dont \mathbb{R} a la valeur la plus élevée, l'influence de la résistivité du disque est négligeable car variant du simple au décuple elle ne fait évoluer \mathbb{R} que de quelques pourcents. En fait, la résistivité élevée du balai, $500.10^{-8}\Omega.m$, soit 20 à 200 fois plus élevée que celle des disques, étouffe l'influence de la résistivité desdits disques. La figure III.57(d) ci-dessus ne met en évidence aucun lien entre la résistivité du matériau du disque et le frottement des balais sur celui-ci.

3.2 Influence de la Dureté du Matériau

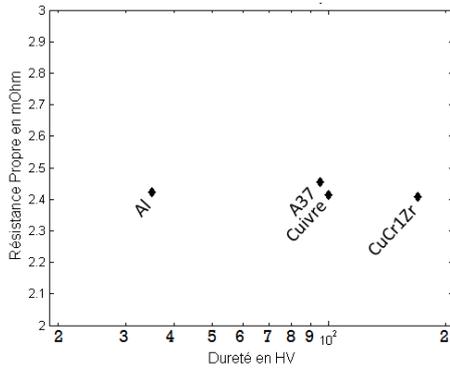
Les tableaux de valeurs (III.58(a)) et (III.58(b)) juxtaposent les valeurs de \mathbb{R} , de dureté du disque et de coefficients de frottement négatif f_1 et positif f_2 :

| Matériau | $\mathbb{R} (m\Omega)$ | Dureté (HV) |
|----------------|------------------------|-------------|
| Cuivre Cw024a | 2,413 | 100 |
| Aluminium 1050 | 2.422 | 35 |
| Acier A37 | 2.456 | 95 |
| CuCr1Zr | 2.408 | 170 |

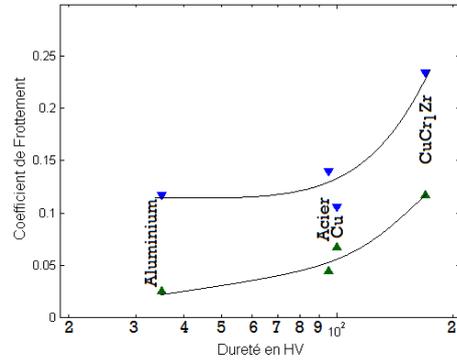
(a) Table de valeurs de résistance propre

| Matériau | Dureté (HV) | f_1 | f_2 |
|----------------|-------------|-------|-------|
| Cuivre Cw024a | 100 | 0,106 | 0,067 |
| Aluminium 1050 | 35 | 0,117 | 0,025 |
| Acier A37 | 95 | 0,140 | 0,044 |
| CuCr1Zr | 170 | 0,235 | 0,117 |

(b) Table de valeurs de frottement



(c) Résistance propre fonction de la dureté



(d) Frottement fonction de la dureté

Figure III.58 - Influence de la Résistivité sur la résistance propre et le frottement

Aucun lien ne pouvant être établi entre dureté et résistance propre, l'influence de la dureté du disque apparaît comme négligeable. En effet, malgré une variation du simple au quintuple, la variation de \mathbb{R} n'excède pas 2 % et, de surcroît, ces 2 % incluent également déjà les variations dues aux différences de résistivité des matériaux. La figure III.58(c) ci-dessous ne permet de dégager aucune tendance.

Si les valeurs du tableau (III.58(b)) ne permettent pas de trancher, la figure III.58(d) ci-dessus permet de mettre en évidence une hausse globale du coefficient de frottement lorsque la dureté augmente. Ceci est particulièrement sensible pour le frottement des balais positifs.

3.3 Influence des Caractéristiques des Oxydes sur le Film de Surface

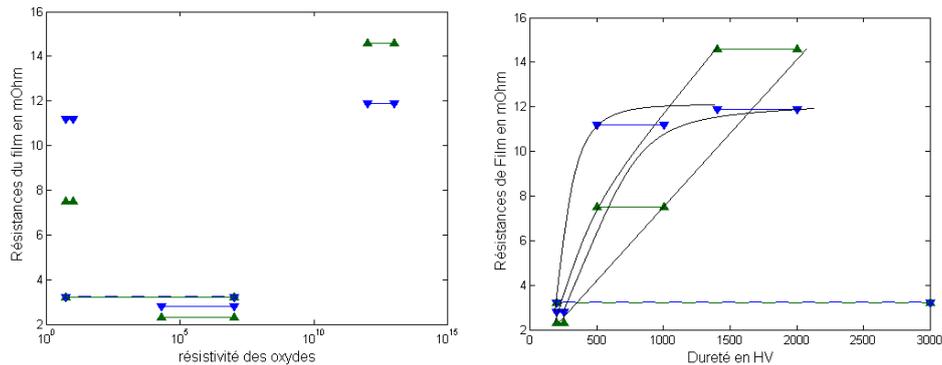
Les tableaux de valeurs (III.59(a)) et (III.59(b)) juxtaposent les valeurs de résistivité et de dureté des oxydes et les résistances de film de surface R_1^{FS} et R_2^{FS} :

| Matériau | Résistivité de(s) l'oxyde(s) ($\Omega.m$) | $R_1^{FS}(m\Omega)$ | $R_2^{FS}(m\Omega)$ |
|----------------|---|---------------------|---------------------|
| Cuivre Cw024a | 2.10^4 à 10^7 | 2,8 | 2,3 |
| Aluminium 1050 | 10^{12} à 10^{13} | 11,9 | 14,6 |
| Acier A37 | 5 à 10 | 11,2 | 7,5 |
| CuCr1Zr | 5 à 10^7 | 3,2 | 3,2 |

(a) Table de valeurs de résistivité

| Matériau | Dureté des oxydes en HV | $R_1^{FS}(m\Omega)$ | $R_2^{FS}(m\Omega)$ |
|----------------|-------------------------|---------------------|---------------------|
| Cuivre Cw024a | 200 à 250 | 2,8 | 2,3 |
| Aluminium 1050 | 1400 à 2000 | 11,9 | 14,6 |
| Acier A37 | 500 à 1000 | 11,2 | 7,5 |
| CuCr1Zr | 200 à 3000 | 3,2 | 3,2 |

(b) Table de valeurs de dureté



(c) Résistances de film de surface fonction de la résistivité des oxydes (d) Résistance de film de surface fonction de la dureté des oxydes

Figure III.59 - Influence des caractéristiques des oxydes sur les résistances du film de surface

Les tableaux ci-dessus ne permettent d'établir aucun lien entre les résistances de film de surface et les caractéristiques des oxydes en présence. La figure III.59(c) ci-dessus ne permet de dégager aucune tendance. La résistivité des oxydes n'est pas une donnée suffisante pour déduire une interaction de comportement car on ne connaît pas la vitesse de croissance (en épaisseur) et de propagation de l'oxyde. Il est néanmoins vraisemblable qu'un lien entre la résistance de l'oxyde considéré et la résistance de film doit exister même si nous n'avons pas pu le mettre en évidence.

Sur la figure III.59(d) on peut néanmoins voir que la résistance augmente avec la dureté des oxydes. Le cas du CuCr1Zr est spécifique : il comporte moins de 1,2 % de chrome qui génère une caractéristique de dureté très élevée. Or cet oxyde ne peut pas avoir la même influence que l'oxyde de cuivre car l'oxyde de chrome ne peut se former que là où il y a du chrome, les oxydes de cuivre ont toutes les chances d'être largement majoritaires. Si on néglige la dureté des oxydes de chrome, on peut dire que la résistance du film de surface croît avec la dureté des oxydes.

3.4 Influence des Caractéristiques des Oxydes sur le Film de Transfert

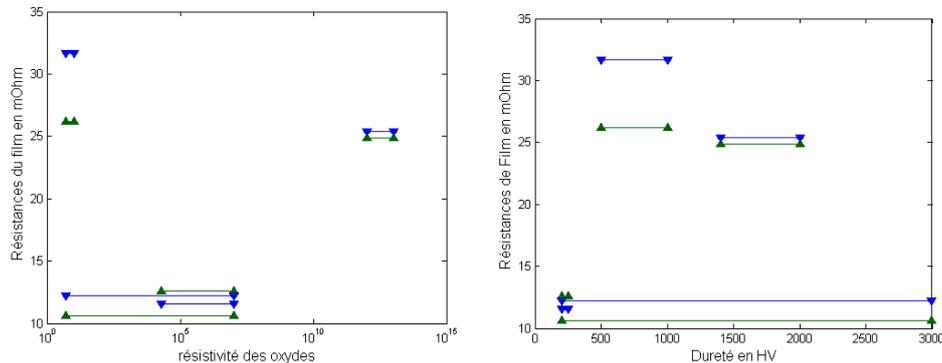
Les tableaux de valeurs (III.60(a)) et (III.60(b)) juxtaposent les valeurs de résistivité et de dureté des oxydes et les résistances de film de transfert R_1^F et R_2^F :

| Matériau | Résistivité de(s) l'oxyde(s) en $m\Omega$ | R_1^F en $m\Omega$ | R_2^F en $m\Omega$ |
|----------------|---|----------------------|----------------------|
| Cuivre Cw024a | $2 \cdot 10^4$ à 10^7 | 11,6 | 12,6 |
| Aluminium 1050 | 10^{12} à 10^{13} | 25,4 | 24,9 |
| Acier A37 | 5 à 10 | 31,7 | 26,2 |
| CuCr1Zr | 5 à 10^7 | 12,2 | 10,6 |

(a) Table de valeurs de résistivité

| Matériau | Dureté des oxydes en HV | R_1^F en $m\Omega$ | R_2^F en $m\Omega$ |
|----------------|-------------------------|----------------------|----------------------|
| Cuivre Cw024a | 200 à 250 | 11,6 | 12,6 |
| Aluminium 1050 | 1400 à 2000 | 25,4 | 24,9 |
| Acier A37 | 500 à 1000 | 31,7 | 26,2 |
| CuCr1Zr | 200 à 3000 | 12,2 | 10,6 |

(b) Table de valeurs de dureté



(c) Résistances de film de transfert fonction de la résistivité des oxydes

(d) Résistance de film de transfert fonction de la dureté des oxydes

Figure III.60 - (Non-)Influence des caractéristiques des oxydes sur le film de transfert

À nouveau, les tableaux ci-dessus ne permettent d'établir aucun lien entre l'évolution du film de transfert et les caractéristiques des oxydes en présence. Les figures III.60(c) et III.60(d) ci-dessus ne permettent de dégager aucune tendance.

4 REVÊTEMENTS ET ÉTUDES DES FILMS

Compte tenu de la quasi invariance des résistances propres dans le système considéré, il est entendu que l'étude de la variation globale de résistance de contact se limite à l'étude de la variation de la part de résistance issue des films de surface et de transfert. C'est ce que nous allons aborder dans les paragraphes suivants.

Par la suite, les résultats de matériaux revêtus nous permettront de confirmer ces analyses, en effet nous utilisons un matériau standard, le Cuivre Cw024a, qui a des propriétés d'oxydabilité inconnues. Sur ce type de matériau de référence nous appliquons soit un film empêchant la présence de tout oxyde, soit un film maximisant la présence d'un oxyde connu en quantité connue.

4.1 Résultats des Disques Revêtus

A l'état neuf, nos disques sont dans les états suivants (tableau ??) :

| Disque | Revêtement | Caractéristiques Notables |
|---------------|-------------------------------------|--|
| Cuivre Cw024a | Aucun | Etat d'oxydation à l'atmosphère ambiante |
| Cuivre-Au | 7 μm d'Or électrolytique | Résistance théorique du revêtement : $3,6 \cdot 10^{-11} \Omega$ |
| Cuivre-CuO | 1 μm de CuO | Résistance théorique du revêtement : $4,6 \Omega$ |

Table III.22 - Rappel de la configuration des disques à l'état neuf.

Cela nous montre que, comparé aux résistances mesurées, le surcroît de résistance causé par la présence du film d'Or est absolument négligeable. Après ces données de l'état initial des disques, les calculs de résistance de film de surface nous amènent au tableau (III.23) et à la figure III.61 :

| Matériau | $m\Omega$ | |
|---------------|------------|------------|
| | R_1^{FS} | R_2^{FS} |
| Cuivre Cw024a | 2,8 | 2,3 |
| Cuivre-Au | 3,6 | 3,6 |
| Cuivre-CuO | 109,2 | 93,2 |

Table III.23 - Résistance de Film de Surface suivant Revêtement.

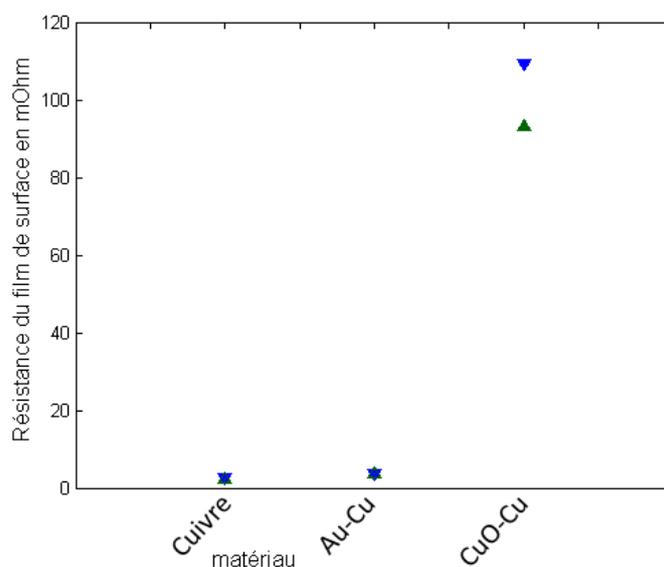


Figure III.61 - Résistances de films de transfert fonction des revêtements.

Nous y constatons que l'état initial du disque référence en cuivre Cw024 sans revêtement est sans influence sur la résistance du film de surface. Celle-ci est faible, car même si un oxyde est présent, celui-ci n'empêche pas la conduction qui s'établit par micro-effet tunnel instantanément sous l'effet du gradient de tension au contact [2], [4], [18], [20]. La couche d'oxyde est facilement rompue et les points de contact sont essentiellement des points de contact direct balai-métal. Un équilibre est atteint lorsque les sections de passage de courant sont suffisantes pour que l'échauffement des dites sections ne cause plus leur croissance [18], [20].

Le cas du disque revêtu de CuO est bien plus intéressant. Alors que la résistance théorique du film déposé en surface est de $4,6 \Omega$, le calcul nous amène à une valeur 50 fois plus faible, mais surtout 50 fois plus élevée que celle des disques Cuivre et Cuivre-Or ! Les disques ayant une rugosité, les pics du profil se retrouvent en contact avec le balai et sous l'effet de la force normale et du passage du courant, des points de contact électrique s'établissent.

Dans le premier cas la déformation plastique des pics rompt l'oxyde en présence et le contact électrique s'établit à travers la section de contact. Dans le deuxième cas la grande résistivité entraîne un fort gradient de tension (initialement de l'ordre de $14.10^6 V$) qui est suffisant pour établir un contact par rupture de l'oxyde [2]. L'échauffement par effet Joule des points de contact électrique permet de dépasser la limite élastique des matériau et la déformation conséquente entraîne l'accroissement de la zone de contact [4]. Elle permet une diminution de la résistance.

Il n'en demeure pas moins que la pression mécanique est insuffisante pour rompre le film d'oxyde sur la totalité des points de contact et l'équilibre est trouvé entre la fraction de charge normale supportée par les points de contact électrique et mécanique et la fraction de film d'oxyde supportant mécaniquement la charge sans qu'un contact électrique existe. Ce constat rejoint celui proposé par Thomson & Turner [9]. Sur ces zones-là, on rappellera que la conduction par micro-effet tunnel n'est possible que pour des matériaux à moins de 20 Å l'un de l'autre et que le film se comporte comme un isolant dès qu'il dépasse 10 nm d'épaisseur [45].

Nous nous retrouvons donc dans l'impossibilité de créer des contacts électriques sur ces zones-là et la résistance macroscopique mesurée en atteste.

Après avoir fonctionné, les résultats de mesure de résistance de film de transfert sont présentés ci-dessous, tableau(III.62(b)) et figure III.62(d). On y constate que les résistances positives et négatives sont comparables entre les trois configurations. Comme le disque revêtu d'Or ne contribue en aucune manière à l'apport d'un oxyde à la surface du disque ou dans le film de transfert, les deux disques qui en étaient recouverts se sont donc vus décapés.

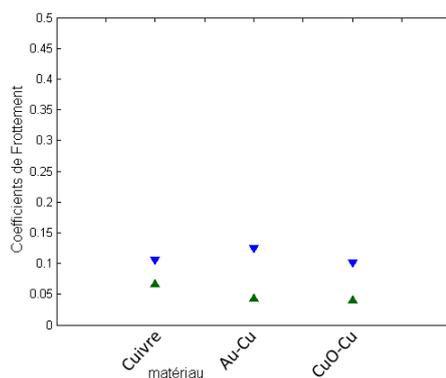
L'équilibre de vitesse de décapage et vitesse de réoxydation est donc largement en faveur du décapage. L'oxyde est facilement détachable [45] et le balai décape l'interface de contact afin de maintenir un nombre de contacts suffisant pour que la résistance de contact se limite, en fait, à la résistance des effets dynamiques (création et ruptures de points de contacts) et des composants du film de transfert à l'interface. Ce nombre de points de contact est quasi-constant [35].

| Matériau | f_1 | f_2 |
|----------|-------|-------|
| Cuivre | 0,106 | 0,067 |
| Au-Cu | 0,125 | 0,043 |
| CuO-Cu | 0,102 | 0,040 |
| Moyenne | 0,111 | 0,050 |

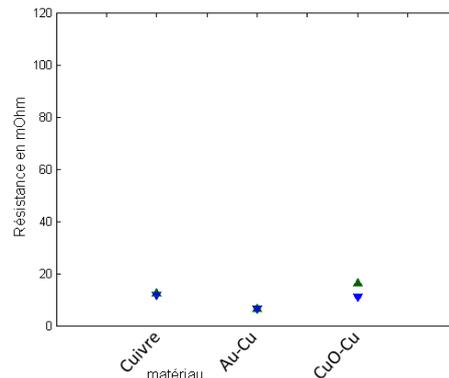
(a) Coefficients de Frottement

| Matériau | $m\Omega$ | |
|---------------|-----------|---------|
| | R_1^F | R_2^F |
| Cuivre Cw024a | 11,6 | 12,6 |
| Cuivre-Au | 6,6 | 6,4 |
| Cuivre-CuO | 11,2 | 16,4 |

(b) Résistances de Film de Transfert



(c) Coefficients de Frottement



(d) Résistances de Film de Transfert

Figure III.62 - Influence de la Résistivité sur la Résistance de Film de Transfert et le Frottement

En ce qui concerne le frottement, dont les résultats sont visibles tableau (III.62(a)) et figure III.62(c) ci-dessus, les résultats montrent que la présence ou pas d'oxyde à la surface des disques n'influence pas le frottement global, et c'est logique puisque nous venons de dire que celui-ci est éliminé de la surface dès qu'il y a mouvement relatif. De faibles variations d'un disque à l'autre sont visibles, mais non significatives (la définition d'un coefficient de frottement se fait en général à 10 ou 20 % près).

En ce qui concerne les différences dues à la polarité, nous retrouvons un constat de Bouchoucha et col. [43] selon qui les coefficients négatifs sont plus élevés que les positifs. Nos résultats et ceux de Bouchoucha vont à l'encontre des constatations de Spry & Scherer [5] qui conjecturèrent qu'il n'y a pas de corrélation entre polarité et coefficient de frottement.

4.2 Résultats entre Résistances de Film et Oxydation

Sur la figure III.63 suivante, les segments gris matérialisent la résistance du film de transfert (pour les 5 premiers matériaux) et celle du film d'oxyde initialement présent sur le disque revêtu de CuO. La figure représente l'équilibre entre oxydation, décapage et dépôt de film de transfert sur le disque :

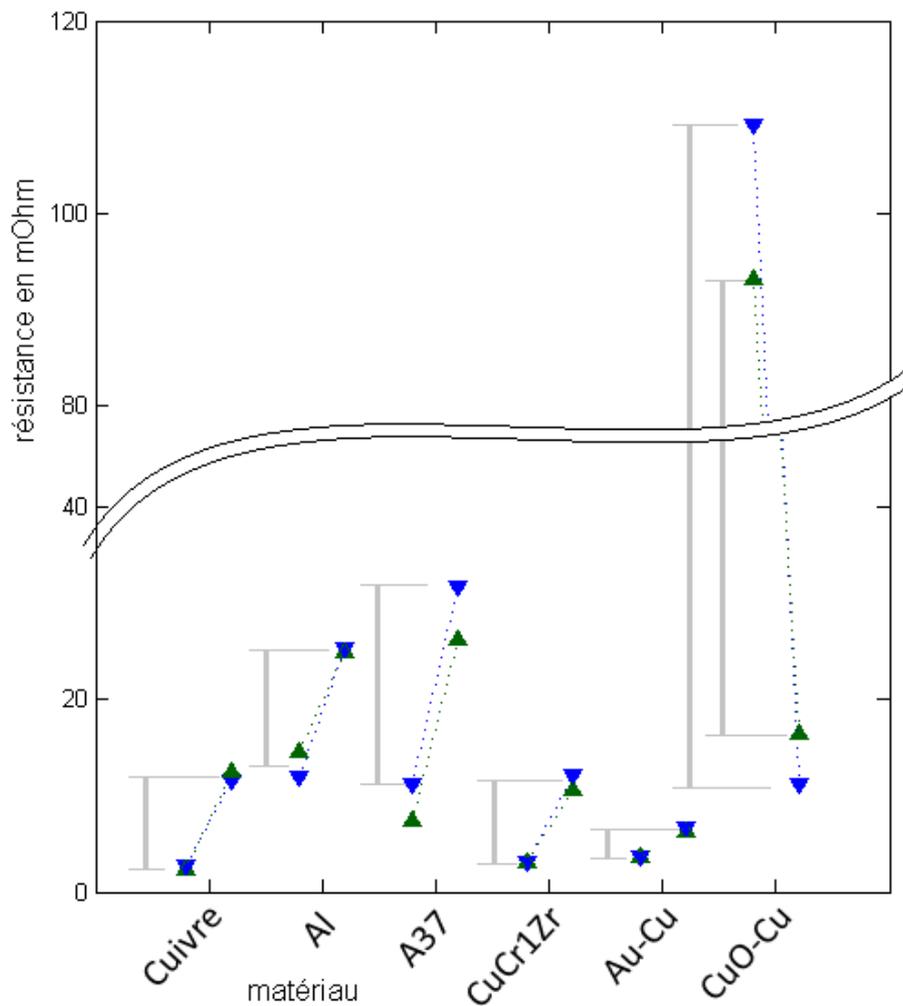


Figure III.63 - Passage de la résistance de film de surface à la résistance de film de transfert pour chaque matériau.

CAS DU DISQUE REVÊTU D'OR :

HYPOTHÈSE : Le disque revêtu d'Or est dépourvu d'oxydes en surface, la résistance de film de surface correspond en théorie à une valeur minimale.

RÉSULTATS : Dans le cas réel cette hypothèse n'est pas vérifiée, car le disque revêtu d'or a été considéré comme un disque en cuivre avec un film d'or, ce qui est abusif. La résistance de constriction du contact balai-Or doit justifier l'écart entre nos attentes et la mesure. Nous aurions du considérer non pas une résistance de constriction Cuivre-Graphite + résistance d'un film d'or mais une résistance de constriction Or-Graphite suivie de la résistance du film d'or et de celle du disque (en série).

HYPOTHÈSE : Le disque revêtu d'Or ne contribue pas à générer des éléments oxydables dans le film de transfert : la résistance de film de transfert est causée par la composition de film issue des éléments du balai.

RÉSULTATS : Les résultats donnant une résistance de film de transfert la plus basse de tous les essais, elle minimise les phénomènes et appuie la théorie de l'oxydation des éléments provenant du disque dans le film de transfert .

CAS DES DISQUES CUIVRE ET CuCr_1Zr :

HYPOTHÈSE : La dureté du disque a une influence.

RÉSULTATS : Les résultats des deux disques considérés sont tout à fait comparables, la dureté du disque n'influe pas significativement sur les résistances.

CAS DES DISQUES ALUMINIUM ET ACIER :

HYPOTHÈSE : Les oxydes présents dans le film de transfert sont prépondérants dans la résistance de contact.

RÉSULTATS : Les oxydes d'aluminium et de fer sont plus résistifs que les oxydes de cuivre et participent dans une plus grande proportion à l'accroissement de la résistance de contact. + 15 à 20 $m\Omega$ environ à comparer aux + 8 à 9 $m\Omega$ des disques cuivrés.

Néanmoins puisque nous n'avons pas pu lier directement la résistivité des oxydes en question et le surcroît de résistance, c'est qu'il existe une interaction avec un autre paramètre que nous n'avons pas pu identifier. Les propriétés de croissance des oxydes doivent vraisemblablement entrer également en jeu.

CAS DES DISQUES REVÊTUS DE CuO :

HYPOTHÈSE : Le balai décape le (les) oxyde(s) plus efficacement que le (les) oxyde(s) naturel(s) ne se forme(nt).

RÉSULTATS : Nous pouvons voir sur la figure III.63 que la résistance causée par le film de CuO, calculée à 109 et 93 $m\Omega$ pour les balai négatif et positif est considérablement diminuée par le frottement du balai. Les mesures ultérieures montrent en effet que sans intervention extérieure les résistances de contact rejoignent des valeurs comparables à ces des disques cuivrés..

CONCLUSION :

L'hypothèse selon laquelle l'oxydation a un rôle important dans la résistance de contact est validée, mais pas là où nous l'attendions. C'est bien l'oxydation au sein du film de transfert qui augmente la résistance de contact. Nous avons pu vérifier l'effet décapeur important du balai et l'état d'oxydation initial du disque semble donc n'avoir aucune influence sur le résultat final. Les résultats de résistance de film de transfert montrent que la valeur de résistance est la conséquence directe de **l'équilibre entre la vitesse de croissance et la résistivité des oxydes** au sein du film de transfert.

5 CORRÉLATION TEMPORELLE ENTRE RÉSISTANCE ET FROTTEMENT

Nous venons d'étudier l'influence des paramètres des matériaux sur la résistance et le frottement. Une analyse graphique de la résistance et du frottement a permis de distinguer une interaction entre les deux. Les fortes valeurs de résistances sont quasi-systématiquement associées à des fortes valeurs de frottement. Nous allons présenter ces résultats.

5.1 Constat Graphique

Voici représentés en figure III.64 des graphes (un par matériau) comportant la résistance de contact mesurée en fonction du coefficient de frottement. L'intégralité des points de l'essai est représentée sur chaque graphe.

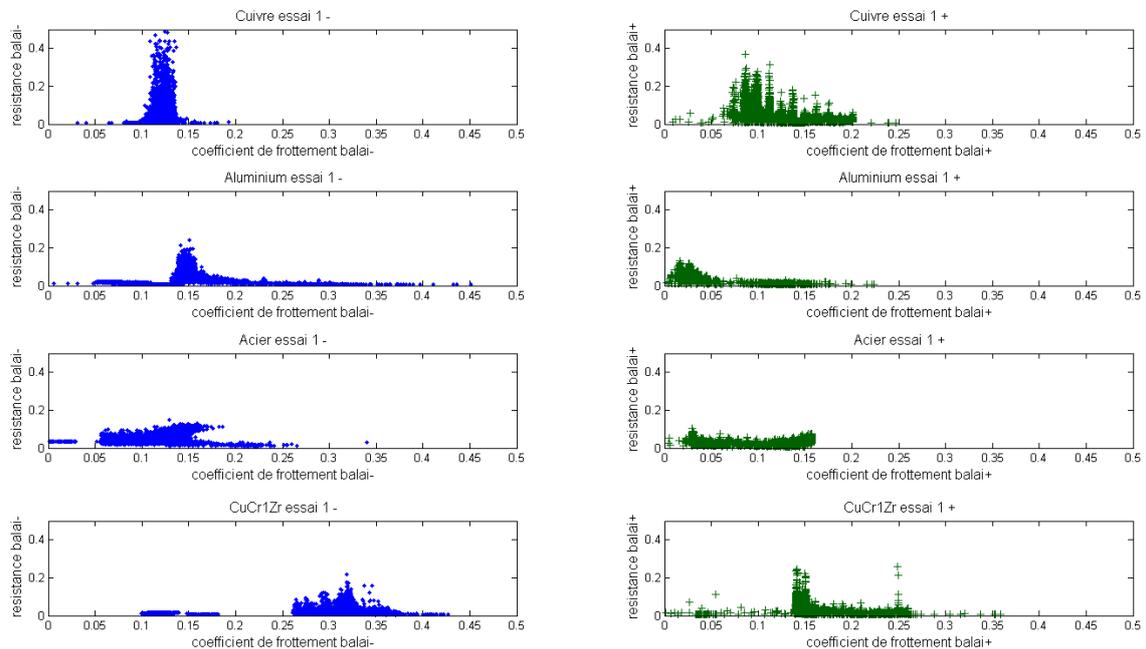


Figure III.64 - Graphes résistance-frottement pour les matériaux non revêtus.

Pour le cuivre, l'aluminium et le CuCr1Zr, il apparaît assez nettement deux choses : la première est

que le coefficient de frottement est assez bien borné par une valeur minimale au-dessus de laquelle se trouve la majorité des points. Le deuxième constat est la décroissance visible de la résistance de contact lorsque le coefficient de frottement augmente. Les fortes résistances se trouvent, pour chaque matériau, aux frottements les plus faibles de la plage de fonctionnement.

Pour une majorité d'essais dont nous ne ferons pas le détail (*me dire si c'est pertinent de le mettre en annexe merci !*), on peut appliquer une courbe enveloppe décroissante qui n'exclut pas de points ou alors seulement une part marginale (36 000 à 40 000 points sont présents sur chaque graphe). Les essais réalisés avec l'acier sont les seuls pour lesquels la corrélation n'est pas évidente.

La figure III.65 ci-dessous présente les graphes résistance-frottement des matériaux Cu-Or et Cu-CuO :

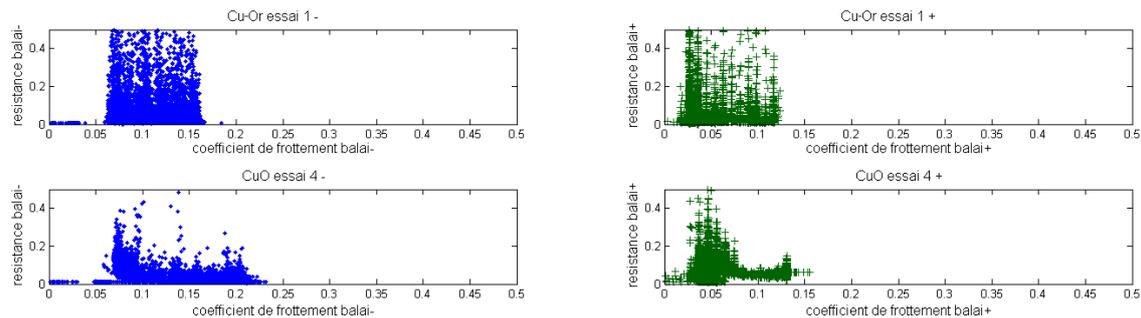


Figure III.65 - Graphes résistance-frottement pour les matériaux revêtus.

La corrélation graphique est moins nette que pour le cuivre ou l'aluminium par exemple, mais elle applicable. On constate qu'il y a une certaine variabilité de la plage de frottement. Pour les mêmes amplitudes en résistances, les disques Cuivre ont une plage de frottement deux fois moindre que les disques Cu-Or. Graphiquement nous ne pouvons pas conclure sur ce type de singularités.

5.2 Synthèse et Limites du Constat Graphique

Les deux graphes précédents nous permettent aussi de juger très rapidement des principales différences de comportement entre les matériaux. Sur des plages de frottement comparables, les essais Cu-Or ont eu une dispersion de résistances de contact bien plus élevée que les essais Cu-CuO. Les graphes situent également très simplement les plages de frottement et de résistance et on retrouve bien les constat effectués précédemment, comme par exemple la plage de frottement plus élevée sur les matériaux plus durs (CuCr1Zr).

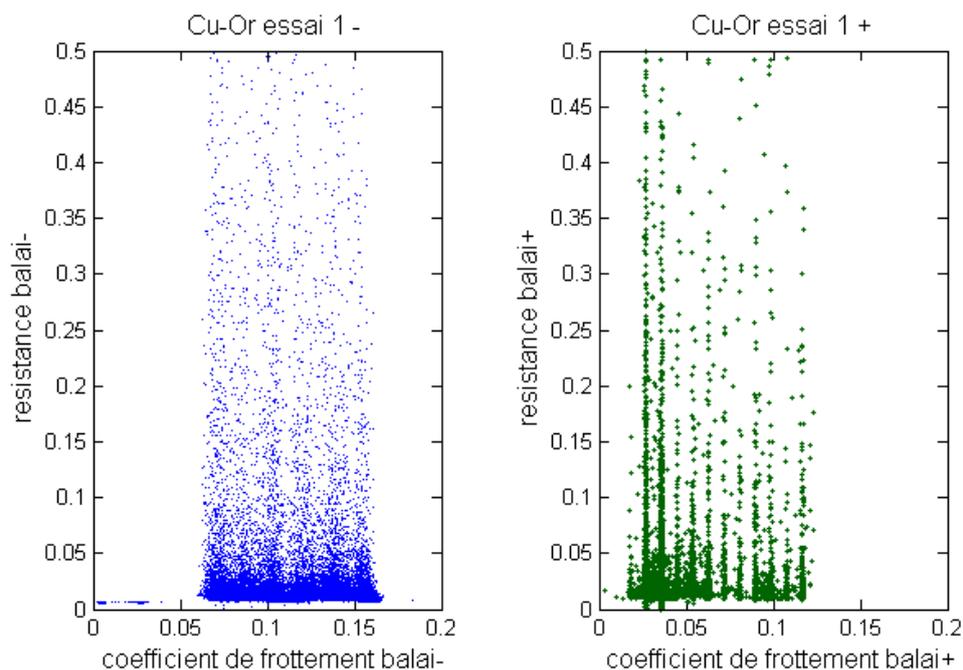


Figure III.66 - Détail des graphes résistance-frottement pour le Cu-Or.

En revanche la représentation graphique atteint ses limites et pourrait s'avérer trompeuse en faisant penser que les résistances de contact de l'Or sont plus élevées en moyenne que celles des autres matériaux. Comme l'atteste la figure III.66 précédente, dont la taille des points a été réduite et l'échelle verticale dilatée, il n'en est rien : ce n'est que la dispersion élevée qui fait que quelques centaines de points sont affichées à de forte valeurs de résistance, mais elles sont contrebalancées par la très forte concentration (mise en évidence ci-dessous) de dizaines de milliers de points aux plus faibles valeurs de résistance.

Nous avons cherché une autre méthode d'analyse plus pertinente et donc souhaité étudier l'intercorrélation des signaux de résistance et de frottement.

6 INTERCORRÉLATION ENTRE RÉSISTANCE ET FROTTEMENT

Nos contacts électriques glissants semblent admettre une corrélation entre la résistance de contact et le coefficient de frottement [35]. Cela dépend entre autres des matériaux. La première hypothèse sur l'origine des variations de résistance de contact portait sur les effets mécaniques et conditions au contact balai-bague. Les analyses de nos essais montrent que la résistance de contact est fortement influencée par la composition et l'oxydation du film de transfert, mais il se trouve qu'il y a une corrélation avec le coefficient de frottement du contact balai-bague.

6.1 Principe de l'intercorrélation

L'intercorrélation est une caractéristique qui peut être calculée pour tout couple de signaux de moyenne nulle. Elle consiste en un produit de convolution des deux signaux et la valeur d'intercorrélation caractérisant le couple de signaux est d'autant plus élevée que les amplitudes se trouvent sur des fréquences communes. De par le principe du produit de convolution, il y d'importants effets de bord qui sont très visibles sur les courts fichiers de démonstration ci-dessous (le signal d'intercorrélation est fortement diminué dès qu'on s'éloigne du centre du graphe). L'intercorrélation \mathcal{X}_{corr} vaut alors :

$$X_{corr}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) \cdot Y(t - \tau) dt \quad (58)$$

L'intercorrélation normée X_{corr} du couple de signaux est rapportée au produit des normes des deux signaux.

$$X_{corr}(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} X(t) \cdot Y(t - \tau) dt}{|X(t)||Y(t)|} \quad (59)$$

Application à deux signaux sinusoïdaux :

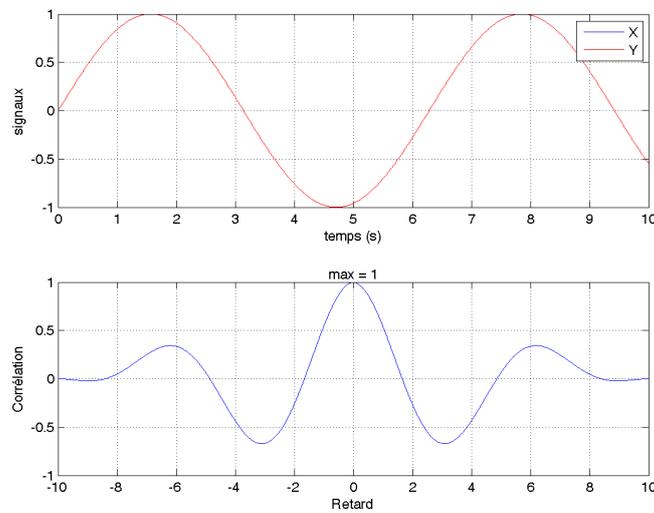


Figure III.67 - *En Haut*- Superposition de deux signaux de type sinusoïdaux exactement semblables. *En Bas*- intercorrélation normée des deux signaux.

Cette corrélation est totale puisque les signaux sont égaux et non déphasés. L'intercorrélation normée, égale à $\max(X_{corr})$ vaut 1.

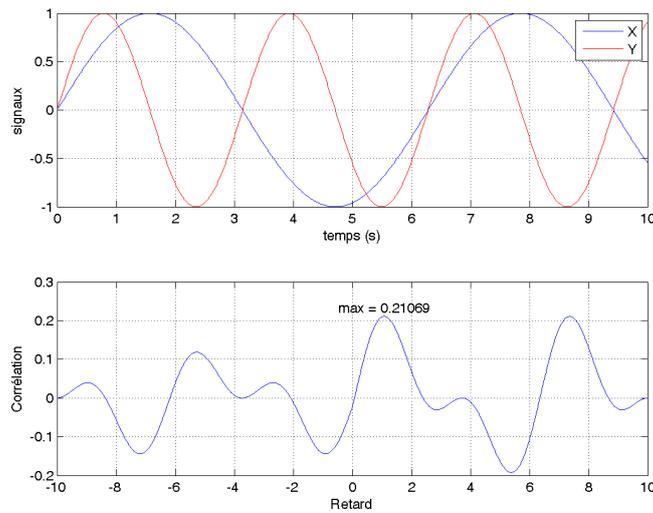


Figure III.68 - *En Haut*- Superposition de deux signaux de type sinusoidaux: $X(t) = \sin t$ et $Y(t) = \sin 2t$. *En Bas*- intercorrélation normée des deux signaux.

Cette corrélation est partielle car les deux signaux ne partagent que la moitié des fréquences entre eux. $\max(X_{corr})$ vaut 0,21. Or deux signaux qui partagent la moitié de leurs fréquences communes sont tout de même fortement corrélés. On constate en fait que la valeur de l'intercorrélacion normée décroît très rapidement depuis 1. 0,20 constitue donc une intercorrélacion que nous qualifierons de forte.

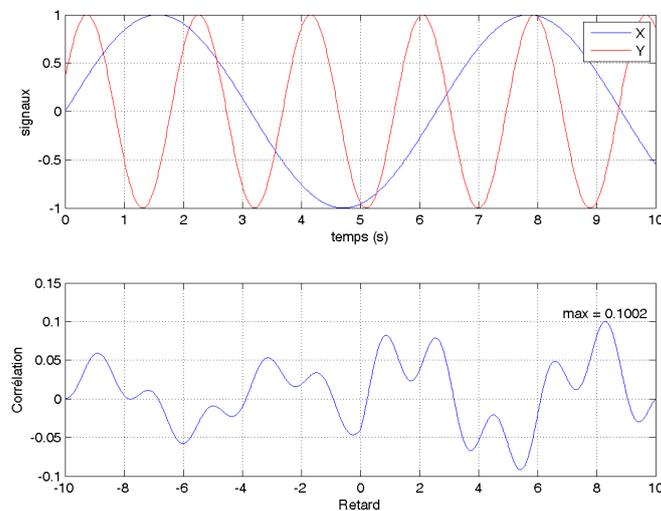


Figure III.69 - *En Haut*- Superposition de deux signaux de type sinusoidaux $X(t) = \sin t$ et $Y(t) = \sin \sqrt{11}t + \frac{\pi}{9}$. *En Bas*- intercorrélacion normée des deux signaux.

Cette corrélation est assez faible entre les deux signaux car le rapport des périodes des signaux est irrationnel (égal à $\sqrt{11}$) et les signaux sont déphasés de $\frac{\pi}{9}$ qui n'est pas un multiple ou sous multiple de $\sqrt{11}$. En conséquence, l'intercorrélacion normée vaut 0,10. Nous qualifierons cette intercorrélacion

de faible

Compte tenu de nos conditions expérimentales et des résultats obtenus, nous pouvons considérer que le niveau d'intercorrélation d'un couple de signaux peut être évalué comme suit :

| valeur d'intercorrélation normée | corrélation |
|--------------------------------------|-------------|
| $\max(X_{corr}) \leq 0,05$ | aucune |
| $0,05 \leq \max(X_{corr}) \leq 0,10$ | faible |
| $0,10 \leq \max(X_{corr}) \leq 0,15$ | moyenne |
| $0,15 \leq \max(X_{corr}) \leq 0,20$ | forte |
| $0,20 \leq \max(X_{corr})$ | très forte |

Table III.24 - Échelonnement des niveaux d'intercorrélation de deux signaux

Il est intéressant de noter que l'intercorrélation est très peu sensible à l'amplitude. Celle-ci serait par exemple égale à 1 pour $X(t) = \sin t$ et $Y(t) = 2 \sin t$.

L'intercorrélation ne pouvant être calculée que pour des signaux de moyenne nulle, le traitement appliqué à chaque signal de frottement et de résistance de contact a notamment ôté à chaque signal sa valeur moyenne pour le centrer sur 0 en moyenne. Appliquée à nos signaux, sur l'intervalle d'essai $[0; t_f]$, t_f étant la fin de l'essai, nous obtenons pour un couple de signaux une intercorrélation qui vaut respectivement pour les signaux négatif et positif :

$$\mathcal{X}_{corr}^-(\tau) = \int_0^{t_f} R_1^m(t) \cdot F_1(t - \tau) dt \quad (60)$$

et

$$\mathcal{X}_{corr}^+(\tau) = \int_0^{t_f} R_2^m(t) \cdot F_2(t - \tau) dt \quad (61)$$

Ainsi l'intercorrélation normée de chacun des signaux vaut :

$$X_{corr}^-(\tau) = \frac{\int_0^{t_f} R_1^m(t) \cdot F_1(t - \tau) dt}{|R_1^m(t)| |F_1(t)|} \quad (62)$$

$$X_{corr}^+(\tau) = \frac{\int_0^{t_f} R_2^m(t) \cdot F_2(t - \tau) dt}{|R_2^m(t)| |F_2(t)|} \quad (63)$$

6.2 Mise en Évidence

L'analyse qui vient d'être présentée a été effectuée pour chacun des 22 essais réalisés et pour chacune des polarités. Les courbes associées pourront être consultées en intégralité en annexe A. Nous ne présenterons ici que les résultats les plus caractéristiques.

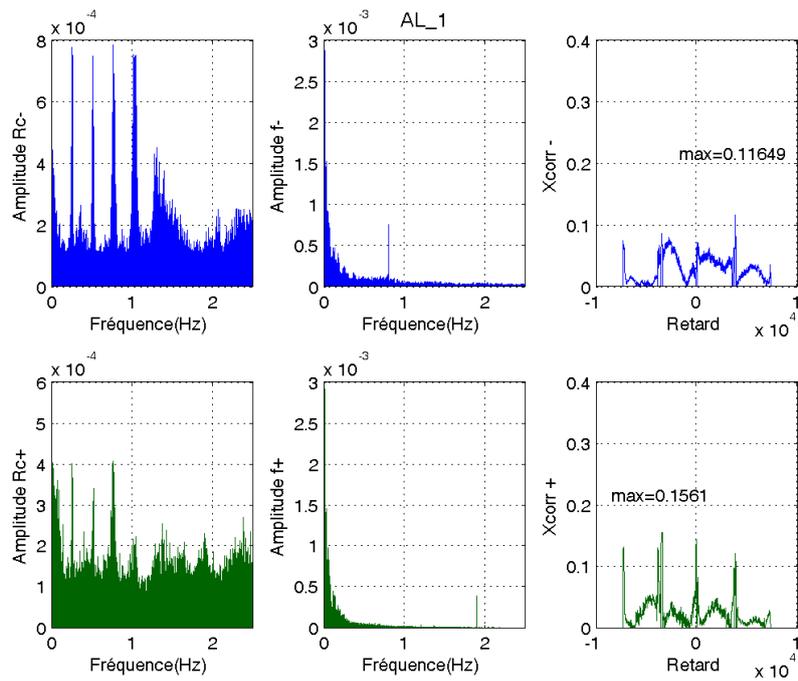


Figure III.70 - Analyse spectrale et intercorrélacion des signaux de l'essai Aluminium n°1.

À gauche- Spectres de Résistances de contact.

Au centre- Spectres des signaux de frottement.

À droite- Courbe $X_{corr}(\tau)$.

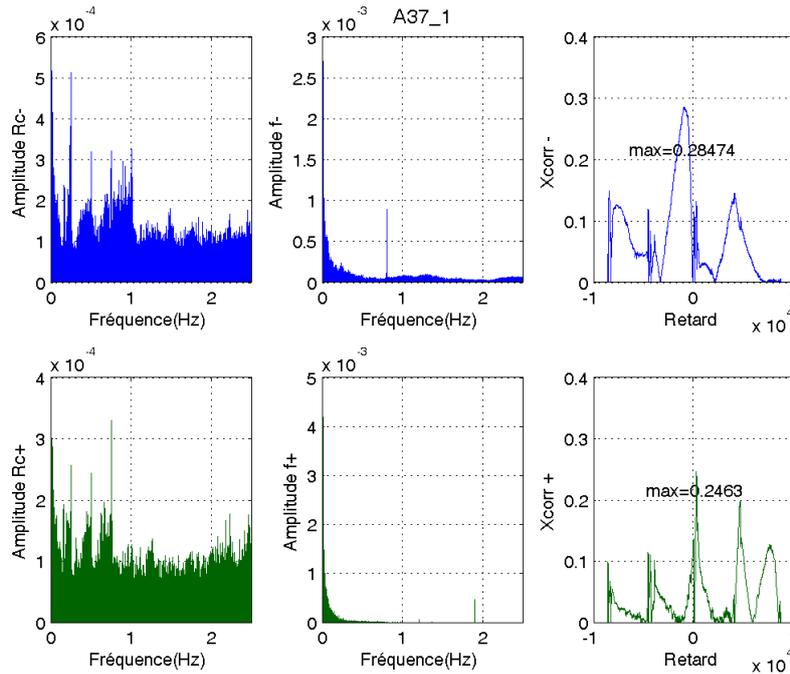


Figure III.71 - Analyse spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Acier A37 n°1.

À gauche- Spectres de Résistances de contact.

Au centre- Spectres des signaux de frottement.

À droite- Courbe $X_{corr}(\tau)$.

| matériau | essai | Xcorr- | Xcorr+ |
|---|-------|--------|--------|
| Cu Cuivre standard Cw024 | 1 | 0.103 | 0.149 |
| | 2 | 0.213 | 0.132 |
| | 3 | 0.258 | 0.173 |
| Al Aluminium 1050 | 1 | 0.116 | 0.156 |
| | 2 | 0.234 | 0.213 |
| | 3 | 0.18 | 0.252 |
| A37 Acier | 1 | 0.284 | 0.246 |
| | 2 | 0.279 | 0.278 |
| | 3 | 0.314 | 0.29 |
| CuCr1Zr | 1 | 0.098 | 0.147 |
| | 3 | 0.188 | 0.125 |
| | 4 | 0.172 | 0.104 |
| Au Cuivre revêtu d'Or | 1 | 0.115 | 0.082 |
| | 2 | 0.076 | 0.118 |
| | 3 | 0.056 | 0.022 |
| CuO Cuivre revêtu d'oxyde noir de | 1 | 0.198 | 0.226 |
| | 3 | 0.273 | 0.286 |
| | 4 | 0.665 | 0.184 |

| légende de la colorisation | |
|----------------------------|--|
| valeur de Xcorr | |
| 0 à 0,05 | |
| 0,05 à 0,10 | |
| 0,10 à 0,15 | |
| 0,15 à 0,20 | |
| > 0,20 | |

Figure III.72 - Tableau colorisé présentant les valeurs de corrélation obtenue pour chaque essai, en fonction de la valeur sur une échelle croissante.

On remarque en particulier sur le tableau colorisé ci-dessus (III.72) que l'intercorrélacion de l'or est médiocre et est certainement causée par la grande dispersion des mesures effectuées. Les autres résultats montrent une bonne corrélation globale entre résistance et frottement. Mention spéciale à l'acier dont la corrélation est excellente, ce qui confirme bien que l'allure des courbes peut être trompeuse. Nous pouvons relier ces résultats aux allures des courbes présentées au III.5 dans la mesure où les signaux les plus dispersés ont les intercorrélacions les moins bonnes.

6.3 Synthèse de L'intercorrélacion

Nous n'exploiterons pas le cas singulier de l'Or dans cette synthèse.

Nous avons la confirmation du fort lien entre résistance et frottement. Nous avons 15 valeurs sur 30 supérieures à 0,20 (dans nos exemples 0,21 correspondait à la moitié des fréquences commune), et 21 valeurs sur 30 supérieures à 0,15 ce qui est considérable. Il y a un effet modéré de la polarité sur la valeur de l'intercorrélacion que le tableau III.25 résume ci-dessous.

| Matériau | $max(X_{corr}^-)$ | $max(X_{corr}^+)$ |
|----------------|-------------------|-------------------|
| Cuivre Cw024 | 0,191 | 0,151 |
| Aluminium 1050 | 0,177 | 0,207 |
| Acier A37 | 0,292 | 0,271 |
| CuCr1Zr | 0,153 | 0,125 |
| CuO | 0,379 | 0,232 |
| moyenne | 0,238 | 0,197 |

Table III.25 - Effets de la polarité sur l'intercorrélacion de deux signaux

La corrélation est globalement meilleure pour le balai négatif que pour le balai positif. Nous constatons les faibles valeurs du CuCr1Zr : elles peuvent être expliquées car les résistances sont comparables à celles du cuivre Cw024a mais les valeurs de frottement enregistrées sont plus élevées, nous perdons donc en corrélation puisque nous rappelons que le constat est de résistance décroissant lorsque le frottement augmente.

Ce constat est comparable à celui effectué par Bouchoucha et col. [43] : la résistance de contact augmente si le coefficient de frottement diminue. La raison peut se trouver dans le fait que lorsque le taux d'usure s'élève, un troisième corps se crée entre le balai et le disque. ce troisième corps, composé entre autres de graphite, agit comme un lubrifiant solide de la "partie mécanique" du contact mais il est résistif et engendre donc l'accroissement des résistances de contact.

Cela pourrait également justifier que les résistances de contact négatives sont plus élevées que les positives : puisque le sens de passage du courant est favorable au transfert de particules du balai négatif sur le disque et que le disque agit également comme un décapeur abrasant la surface, la partie superflue du film de transfert pourrait constituer ce troisième corps.

Ce phénomène justifie également la corrélation résistance frottement plus forte pour le balai négatif (sauf dans le cas de l'aluminium).

La figure III.73 ci-dessous a été retravaillée avec des marqueurs trois fois plus petits que les autres figures. Nous y voyons les fortes concentrations de points (encadrées de rouge).

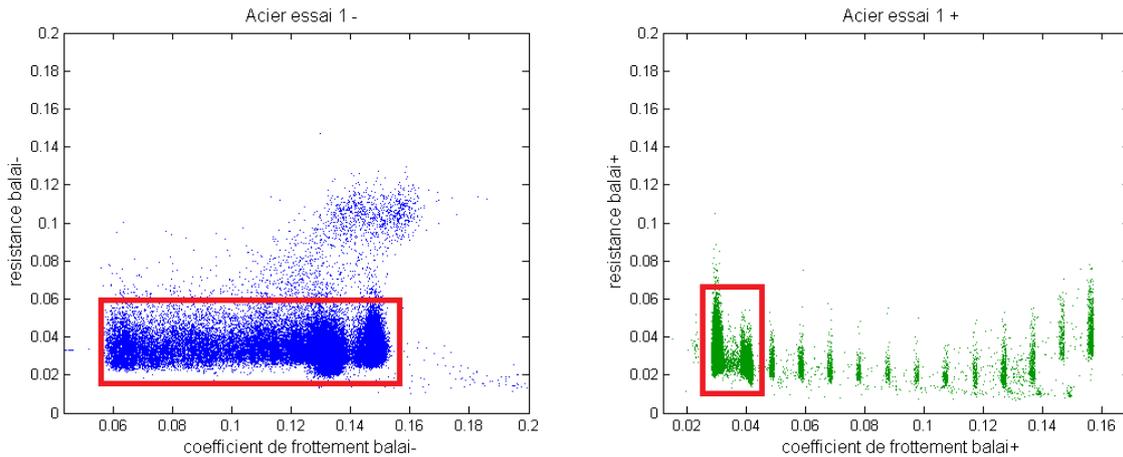


Figure III.73 - Détail des graphes résistance-frottement pour l'Acier.

Enfin, cette analyse met en évidence une corrélation très forte pour le cas de l'acier. Cela n'était précédemment pas visible car l'Acier A37 n'est pas le siège de grande variations de résistance (on ne pouvait donc pas détecter graphiquement que celle-ci décroissait nettement lorsque le frottement augmentait) et maintient ses coefficients de frottement à des valeurs peu dispersées. La corrélation est donc forte bien que non visible sur les graphes temporels.

7 SYNTHÈSE GÉNÉRALE

Les disciplines de la mécanique, de l'électricité et de la physique-chimie sont aussi liées dans la problématique de variations de résistances de contact qu'elles sont différentes et bien séparées l'une de l'autre. Nous avons choisi de baser l'essentiel de nos travaux sur l'interaction électro-mécanique. Le tribosystème est complexe à cause de la variété de paramètres gravitant autour de celui-ci dans le cas réel et le contact balai-bague est sous de multiples influences, qui sortent même parfois du domaine Mécanique-Electrique-Physico-chimique puisque des effets magnétiques baignent le contact sur l'alternateur.

Le phénomène aurait pu rester discret comme il l'était vraisemblablement pendant de nombreuses années si le contexte actuel n'avait pas poussé aux plus abouties recherches de performance maximale de la machine. Alors que l'origine des perturbations avait été précédemment mise en évidence comme étant le contact balai bague, nous avons sorti ce couple de contacts de son environnement pour entamer une analyse de son comportement électro-mécanique.

Nous avons instrumenté un tribomètre dédié à ces essais et avons créé la méthode de traitement des données et d'analyse associée à ces essais. Nous avons ainsi pu caractériser l'influence de la mécanique sur l'électricité : c'est-à-dire l'influence des propriétés de différents matériaux sur les résistances électriques de contact. L'isolement des variables sur le banc que nous avons mis au point nous a permis de mener un protocole d'essais dont les résultats et analyses ont rejoint certaines conclusions de l'étude bibliographique.

7.1 Rôle du film de Transfert

Nous avons vérifié que le choix du matériau du disque n'a pas d'influence directe sur la résistance de contact. En fait l'influence existe mais elle est négligeable, de l'ordre du pour mille. Après les analyses des disques revêtus il apparaît que le siège du phénomène que nous cherchons à identifier se trouve en surface, à l'interface du contact. Il s'y trouve des oxydes assez peu résistants [43], [45],

un film de transfert naturel, modifié par le passage du courant électrique [2] et un troisième corps éventuel et issu de la recirculation des débris d'abrasion [43].

Si, comme nous venons de le voir, le film de transfert est influencé par les matériaux en présence, un essai d'inversion des matériaux permettrait de le confirmer : des essais avec des disques tous identiques en cuivre standard Cw024a et des balais composés respectivement de cuivre et graphite, d'aluminium et graphite, d'acier et graphite, confirmeraient nos constatations suivant lesquelles l'oxydation au sein du film de transfert est importante. En effet, les mêmes matériaux se trouveraient en présence dans le film de transfert, mais le cuivre serait apporté par le disque et, respectivement, l'aluminium et l'acier seraient apportés par le balai. La présence de ces matériaux dans le balai permettrait de valider que le paramètre influent est bien l'oxydation **dans** le film de transfert.

Il faudra cependant prêter attention à ce que la fraction de métal apportée par le balai sera plus faible que lorsqu'elle était apportée par le disque. Il peut être pertinent d'utiliser des balais fortement chargés en métal ou bien d'estimer précisément la part de résistance causée par la part graphitée du film de transfert dont le dépôt sera probablement influencé par la nature du métal. Dans le cas où ça ne serait pas le cas il conviendrait néanmoins de vérifier que le choix du métal dans le balai ne modifie pas le processus de dépôt de film.

Nous avons cru que l'effet du décapage mécanique qui améliorait les qualités du contact était dû à l'abrasion des couches d'oxydes présentes en surface et au retour d'un contact balai-matériau sans l'entremise de ses oxydes. Cependant nous avons montré que le balai décape les oxydes et que le dépôt excessif de film de transfert est problématique. Le bénéfice de l'abrasion mécanique que nous constatons venait donc de l'élimination du film de transfert et non pas de l'élimination du film d'oxydes.

Peut-être pourrait-il être envisagé d'expérimenter des balais sans graphite ; ils pourraient être composés de matériaux décapants, d'une âme conductrice à faible taux d'usure et d'un éventuel lubrifiant améliorant les conditions de frottement.

7.2 La Lubrification

À ce propos, nous préciserons que, nous l'avons vu, le rôle du film de transfert est aussi la lubrification du contact et la baisse du coefficient de frottement et du taux d'usure. Nous avons fait des essais trop courts pour quantifier le taux d'usure, mais celui-ci est étudié sur les électro-tribomètres présentés dans ce document. Il apparaît que certains types de lubrifiants peuvent améliorer le comportement du contact balai-bague ou balai-disque. De l'eau par exemple, même en très faible quantité, peut avoir une influence significative sur le frottement [35], [47].

Dans le même registre mais avec un lubrifiant différent, à savoir une graisse au bisulfure de Molybdène du commerce, la figure III.74 montre, lors d'un essai réalisé sur l'électro-tribomètre n° 2 chez VALEO, le gain qu'il est possible d'obtenir en termes de tension de contact (courant constant) :

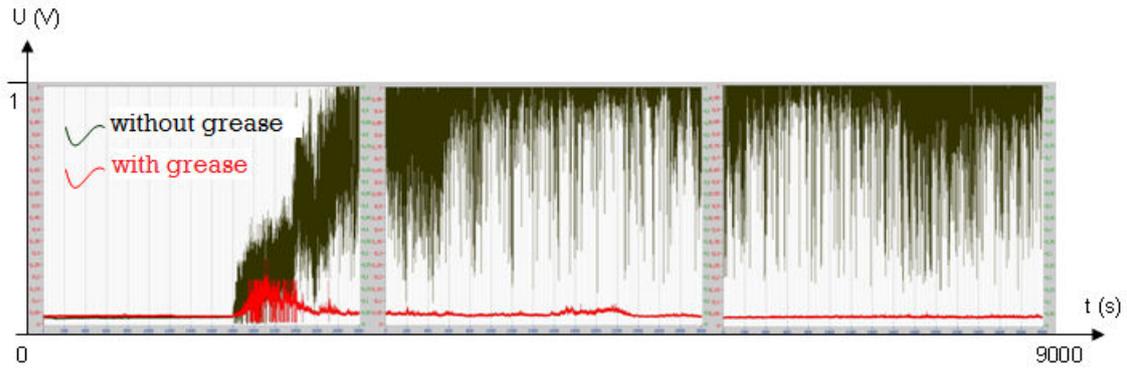


Figure III.74 - Comparaison du comportement du contact standard et avec ajout de graisse MoS_2 .
Vitesse égale à 3000 tr/min, charge normale 2,7 N, $i_{exc} = 3A$, température $110^\circ C$

Des essais similaires ont été menés avec différents lubrifiants, et seul les lubrifiants à base de silicone (puissant isolant) étaient médiocres. Les autres lubrifiants (graisse à roulements, suif, etc.) apportaient tous une amélioration sensible des tensions de contact (et donc intrinsèquement des résistances de contact).

7.3 Perspectives Expérimentales

Pour renforcer la forte corrélation entre résistance de contact et frottement que nous avons mise en évidence, le test sur le même type de disque de nouveaux balais pourrait éclairer ce lien. En effet, de nombreuses nuances prototypes ont été développées et leur taux de cuivre variait de 0 à 95 %. Des mesures simultanées de résistances de contact et de coefficients de frottement permettrait de vérifier la corrélation que nous proposons, à savoir que la résistance de contact croît lorsque le coefficient de frottement décroît.

Nous l'avons vu, cette étude était essentiellement basée sur l'interaction électro-mécanique. Le lien Mécano-Physico-chimique pourrait être confirmé en utilisant par exemple un balai susceptible d'oxyder le disque, le but étant de trouver la limite de capacité de décapage du balai par exemple.

Un lien Electro-Physico-chimique serait, lui, probablement mise en évidence par un fonctionnement en immersion dans un électrolyte permettant une oxydation électro-chimique des éléments, ce qui pourrait également permettre de déterminer la limite du pouvoir décapant du balai.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Abordant un sujet méconnu et complexe, les travaux présentés dans ce document ont pour ambition d'apporter à la connaissance du contact balai-bague quelques éléments de premier ordre permettant une meilleure compréhension des phénomènes qui siègent dans le contact. Ces éléments constituent une base solide permettant de poursuivre les expérimentations et de développer par la suite un modèle de comportement.

Ces phénomènes, nous l'avons vu, peuvent avoir différentes origines mais se situent tous dans l'interface entre les éléments en contact, plus précisément dans le film de transfert. L'approche électromécanique proposée a permis d'obtenir des informations importantes sur le contact : alors que les caractéristiques des matériaux en contact n'ont finalement qu'un rôle des plus limités, leur contribution au film de transfert est primordiale. On a pu, en effet, constater des résistances de film de transfert variant du simple au triple alors que les caractéristiques des matériaux n'induisaient directement qu'une variation de quelques pour mille.

Les essais de différents matériaux que nous avons menés nous ont permis de faire une comparaison différentielle des comportements en résistance et en frottement, ceci grâce au choix justifié des matériaux. Nous avons comparé l'influence de leurs propriétés sur les résistances de contact et c'est ainsi que nous pouvons dire que l'oxydation n'a pas le rôle que nous lui supposions. Elle est en fait très rapidement éliminée du contact. Les duretés et résistivités des matériaux ne comptent que très peu sur la résistance du film de transfert et c'est pourtant bien lui qui est la source des variations de résistances de contact.

Dans ce film, en plus des effets mécaniques connus, comme le glissement ou la rotation des grains de graphite, ou encore l'enroulement des particules de graphite arrachées du contact, contient des particules métalliques provenant du balai (cuivre) et du disque (matériau du disque) et les phénomènes électriques et thermiques dans le film peuvent amener à une oxydation des particules métalliques augmentant la résistance de contact lorsque celles-ci se glissent entre un point de contact du balai avec la bague/le disque.

Compte-tenu du rôle difficile à prédire du film de transfert et de nos conclusions, nous pouvons dire que supprimer le film de transfert permettra de mieux contrôler les phénomènes de variations de résistance de contact. C'est expérimentalement possible, mais est-ce transposable dans le cas réel ? Un approfondissement des recherches en ce sens semble souhaitable : le supprimer augmenterait le coefficient de frottement et, selon toute vraisemblance, l'usure. Or l'intérêt de supprimer le film de transfert est de supprimer sa résistance et non pas son apport au frottement. L'usage de matériaux "autolubrifiants" (liquides ou solides) pourrait compenser l'effet lubrifiant solide du graphite, sans en apporter les effets néfastes.

La suppression du film de transfert semble être une solution si on se remémore le fait que la résistance de contact négative est, de surcroît, augmentée par la forte résistance de constriction du graphite déposé sur la piste. Là où nous croyions que le film de transfert protégeait la piste d'une oxydation préjudiciable au fonctionnement, il s'avère que c'est bien lui qui pose problème. Nous en voulons pour preuve certains essais menés chez VALEO avec des balais fortement chargés en cuivre (> 70 % de cuivre) qui amènent à une minimisation des résistances et une forte valeur de frottement sur laquelle il est probablement possible d'intervenir.

Nous avons révélé de fortes interactions entre les différentes disciplines intervenant dans notre étude et nos résultats sont une avancée significative sur la question des variations de résistance. Ces travaux éclairent les aspects électromécaniques au contact et se veulent être à la fois une base documentaire solide sur les contacts électriques glissants comparables à ceux étudiés (sens du courant constant, densité de courant dite "faible") et un préambule mettant en évidence les futures recherches à mener pour une compréhension de l'ensemble des phénomènes et, à terme, le pilotage possible du comportement des contacts.

Table des figures

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Présentation du principe général de fonctionnement de la dynamo et de l'alternateur faisant apparaître la position des résistances de contact variables R_1 et R_2 qui nous intéressent. À <i>Gauche</i> - La dynamo : les contacts électriques glissants de résistance R_1 et R_2 se trouvent dans le circuit de puissance. À <i>Droite</i> - L'alternateur : les contacts électriques glissants de résistance R_1 et R_2 se trouvent dans le circuit d'excitation. | 11 |
| 1.2 | Rotor (induit) de la dynamo : vue de détail | 12 |
| 1.3 | Le contact balai-collecteur à l'arrière de la dynamo | 13 |
| 1.4 | Architecture générale d'un alternateur | 14 |
| 1.5 | Principe du redressement du courant induit dans le stator | 15 |
| 1.6 | Vue arrière de l'alternateur : paire de contacts balai-bague | 16 |
| 1.7 | Schéma électrique de l'alimentation du rotor | 16 |
| 1.8 | Superposition de deux courbes de débit. Machines identiques, conditions expérimentales identiques | 18 |
| 1.9 | Zoom sur les différents cas de figure | 18 |
| 1.10 | Balai Carbone-Lorraine C7364 | 20 |
| 1.11 | Balai Carbone-Lorraine C7364 en coupe | 20 |
| 1.12 | Vue en coupe de la nuance C8673-02 composée de 80% de cuivre. | 21 |
| 1.13 | Vue en coupe de la nuance D7492 composée de 95% de cuivre. | 21 |
| 1.14 | Zoom sur les bagues en partie arrière du rotor et dimensions de celles-ci. | 22 |
| 1.15 | Schématisation d'un contact tribologique à une seule direction de mouvement | 23 |
| 1.16 | <i>D'après [45], [46]</i> Représentation schématique d'un système avec troisième corps. A1 et A2 sont les solides en contact, B1-C1 et B2-C2 sont les films de transfert respectivement déposés sur A1 et A2, le troisième corps (suivant la définition cinématique) est le siège du gradient de vitesse visant à accommoder les vitesses de surface U1 et U2 des couches statiques B1-C1 et B2-C2. | 26 |
| 1.17 | Modèle d'aspérité hémisphérique en contact de Hertz sphère-plan | 27 |
| 1.18 | <i>D'après [45]</i> Représentation de l'arrangement cristallographique du graphite en Hexagonal Compact | 28 |
| 1.19 | <i>D'après [39]</i> - Lignes de courant et équipotentielles d'un contact électrique parfait entre deux solides conducteurs | 30 |
| 1.20 | <i>D'après [39]</i> Variation de la résistance de contact en fonction de l'effort normal sur le contact. | 33 |
| 1.21 | <i>D'après [9]</i> L'interface d'un contact électrique graphite - métal. En A, le cas où l'oxyde est éliminé de l'aspérité, en B le cas où l'oxyde est maintenu. | 35 |
| 1.22 | <i>D'après [9]</i> Graphes de renversement de sens de passage du courant. <i>En haut et en simultané</i> : Courant et Tension lors d'un passage de polarité négative à positive. <i>En bas et en simultané</i> : Courant et Tension lors d'un passage de polarité positive à négative. 36 | 36 |

| | | |
|-------|---|----|
| 1.23 | Schémas électriques du rotor À <i>Gauche</i> - le schéma électrique du circuit d'excitation. À <i>Droite</i> - le schéma de principe du circuit d'excitation avec représentation des composants réels. | 40 |
| 1.24 | Mesure (en \mathbb{U}) de la résistance équivalente du circuit d'excitation. À <i>Gauche</i> - Mesure deux pointes appliquée à notre cas. À <i>Droite</i> - Raison de l'appellation <i>Mesure en \mathbb{U}</i> . Le voltmètre mesure la tension U_{B+} aux bornes du dipôle équivalent $R_1 + r + R_2$. A l'ampèremètre mesure le courant i_{exc} | 41 |
| 1.25 | Schémas de la mesure en \mathbb{H} avec petits balais À <i>Gauche</i> - Le schéma électrique. À <i>Droite</i> - Le schéma de principe. Les résistances R et R' correspondent aux résistances de contact des petits balais, R_1 et R_2 aux résistances de contact recherchées, i_{f1} et i_{f2} sont les courants "de fuite" utilisés pour la mesure par les voltmètres | 43 |
| 1.26 | Montage des "petits balais" | 44 |
| 1.27 | Mesure en H | 44 |
| 1.28 | Représentation du système Multi-physique constitué par le couple balai-bague | 47 |
| II.29 | Principe de la mesure en \mathbb{Y} | 49 |
| II.30 | Mesure en Y | 49 |
| II.31 | Tribomètre bi-pion du LISMMA | 51 |
| II.32 | Schéma de principe du tribomètre pion-disque. Un seul bras porte-pion est représenté pour plus de clarté. | 52 |
| II.33 | <i>D'après [50]</i> - Configuration et positionnement théorique des deux bras du tribomètre bi-pion du LISMMA | 53 |
| II.34 | Schéma de principe mécanique du montage disque et balais + balai de référence de mesure F_N est la charge normale appliquée sur le contact F_1 et F_2 sont les forces tangentielles de frottement, respectivement du balai négatif et positif $F_{ressort}$ est l'effort normal (dirigé suivant un rayon du disque) appliqué sur le balai de mesure | 53 |
| II.35 | Porte-balais spécifiques isolés électriquement pour le Tribomètre bi-pion du LISMMA | 54 |
| II.36 | Tribomètre bi-pion du LISMMA : vue des pions (balais) et du disque, le balai de référence est visible en position radiale sur la tranche du disque. | 55 |
| II.37 | La centrale d'acquisition. | 55 |
| II.38 | Schéma de principe de l'acquisition des mesures effectuées. | 56 |
| II.39 | Principe de l'étalonnage des coefficients de linéarité de la jauge à chaque essai. | 59 |
| II.40 | Représentation schématique du déroulement d'un essai lors des phases de mesure. | 64 |
| II.41 | Lecture des marqueurs des graphes de résistance statique. Pour chaque matériau les marqueurs sont groupés par trois, chaque groupe de trois correspondant à un instant de mesure. Le premier groupe pour $t = 0$ h, le deuxième pour $t = 1$ h et le troisième pour $t = 2$ h. | 66 |
| II.42 | Évolution des Résistances de Contact Statiques des balais négatifs, par matériau. | 67 |
| II.43 | Évolution des Résistances de Contact Statiques des balais positifs, par matériau. | 67 |
| II.44 | Évolution des Résistances de Contact Statiques pour les disques revêtus de CuO. | 69 |
| II.45 | Évolution dans le temps de la résistance statique de contact. | 70 |
| II.46 | Résistance statique de contact moyenne. | 70 |
| II.47 | Résistance Dynamique de contact du balai positif. Les marqueurs bas et haut sont les mini et maxi, le marqueur intermédiaire est la moyenne de la population. | 71 |

| | | |
|--------|--|-----|
| II.48 | Comparaison entre matériaux de l'analyse spectrale des résistances de contact dynamiques. <i>En Bleu</i> - Analyse du balai négatif. <i>En Vert</i> - Analyse du balai positif. | 73 |
| II.49 | Coefficients de frottement des balais, fonction des matériaux. <i>En Bleu</i> - Balais Négatifs. <i>En Vert</i> - Balais Positifs. | 74 |
| II.50 | Comparaison entre matériaux de l'analyse spectrale des coefficients de frottement. <i>En Bleu</i> - Analyse du balai négatif. <i>En Vert</i> - Analyse du balai positif. | 75 |
| II.51 | Analyse spectrale (résistance à gauche, frottement à droite) d'un essai d'inversion de polarité. <i>En Bleu</i> - Analyse du balai négatif (instrumenté sur le bras précédemment instrumenté en positif). <i>En Vert</i> - Analyse du balai positif (instrumenté sur le bras précédemment instrumenté en négatif). | 76 |
| III.52 | Courbes de mesures de résistances de contact et de frottement pour différents matériaux. | 79 |
| III.53 | Détail d'une courbe expérimentale. | 80 |
| III.54 | Coefficients de frottement des balais, fonction des matériaux. | 85 |
| III.55 | Coefficients de frottement des balais, inversion de polarité. | 86 |
| III.56 | (Non-)Influence des caractéristiques des oxydes sur le frottement | 87 |
| III.57 | (Non-)Influence de la Résistivité sur la résistance propre et le frottement | 88 |
| III.58 | Influence de la Résistivité sur la résistance propre et le frottement | 89 |
| III.59 | Influence des caractéristiques des oxydes sur les résistances du film de surface | 90 |
| III.60 | (Non-)Influence des caractéristiques des oxydes sur le film de transfert | 91 |
| III.61 | Résistances de films de transfert fonction des revêtements. | 92 |
| III.62 | Influence de la Résistivité sur la Résistance de Film de Transfert et le Frottement | 93 |
| III.63 | Passage de la résistance de film de surface à la résistance de film de transfert pour chaque matériau. | 94 |
| III.64 | Graphes résistance-frottement pour les matériaux non revêtus. | 96 |
| III.65 | Graphes résistance-frottement pour les matériaux revêtus. | 97 |
| III.66 | Détail des graphes résistance-frottement pour le Cu-Or. | 98 |
| III.67 | <i>En Haut</i> - Superposition de deux signaux de type sinusoïdaux exactement semblables. <i>En Bas</i> - intercorrélation normée des deux signaux. | 99 |
| III.68 | <i>En Haut</i> - Superposition de deux signaux de type sinusoïdaux : $X(t) = \sin t$ et $Y(t) = \sin 2t$. <i>En Bas</i> - intercorrélation normée des deux signaux. | 100 |
| III.69 | <i>En Haut</i> - Superposition de deux signaux de type sinusoïdaux $X(t) = \sin t$ et $Y(t) = \sin \sqrt{11}t + \frac{\pi}{9}$. <i>En Bas</i> - intercorrélation normée des deux signaux. | 100 |
| III.70 | Analyse spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Aluminium n°1. <i>À gauche</i> - Spectres de Résistances de contact. <i>Au centre</i> - Spectres des signaux de frottement. <i>À droite</i> - Courbe $X_{corr}(\tau)$ | 102 |
| III.71 | Analyse spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Acier A37 n°1. <i>À gauche</i> -Spectres de Résistances de contact. <i>Au centre</i> - Spectres des signaux de frottement. <i>À droite</i> - Courbe $X_{corr}(\tau)$ | 103 |
| III.72 | Tableau colorisé présentant les valeurs de corrélation obtenue pour chaque essai, en fonction de la valeur sur une échelle croissante. | 103 |
| III.73 | Détail des graphes résistance-frottement pour l'Acier. | 105 |
| III.74 | Comparaison du comportement du contact standard et avec ajout de graisse MoS_2 . Vitesse égale à 3000 tr/min, charge normale 2,7 N, $i_{exc} = 3A$, température 110°C | 107 |
| III.1 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Aluminium n°1 (AL 1). <i>En Bleu</i> - Balai négatif. <i>En Vert</i> - Balai positif. | 118 |

| | | |
|--------|--|-----|
| III.2 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Aluminium n°2 (AL 2). <i>En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.</i> | 119 |
| III.3 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Aluminium n°3 (Al 3). <i>En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.</i> | 119 |
| III.4 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Acier A37 n°1 (A37 1). <i>En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.</i> | 120 |
| III.5 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Acier A37 n°2 (A37 2). <i>En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.</i> | 120 |
| III.6 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Acier A37 n°3 (A37 3). <i>En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.</i> | 121 |
| III.7 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Or-Cuivre Au n°1 (Au 1). <i>En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.</i> | 121 |
| III.8 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Or-Cuivre Au n°2 (Au 2). <i>En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.</i> | 122 |
| III.9 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Or-Cuivre Au n°3 (Au 3). <i>En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.</i> | 122 |
| III.10 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Cuivre n°1 (Cu 1). <i>En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.</i> | 123 |
| III.11 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Cuivre n°2 (Cu 2). <i>En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.</i> | 123 |
| III.12 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Cuivre n°3 (Cu 3). <i>En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.</i> | 124 |
| III.13 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Cuivre n°4 (Cu 4). <i>En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.</i> | 124 |
| III.14 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai CuO-Cuivre n°1 (CuO 1). <i>En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.</i> | 125 |
| III.15 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai CuO-Cuivre n°2 (CuO 2). <i>En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.</i> | 125 |
| III.16 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai CuO-Cuivre n°3 (CuO 3). <i>En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.</i> | 126 |
| III.17 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai CuO-Cuivre n°4 (CuO 4). <i>En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.</i> | 126 |
| III.18 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai CuO-Cuivre n°5 (CuO 5). <i>En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.</i> | 127 |
| III.19 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai CuO-Cuivre n°6 (CuO 6). <i>En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.</i> | 127 |
| III.20 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai CuCr1Zr n°1 (Z 1). <i>En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.</i> | 128 |
| III.21 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai CuCr1Zr n°3 (Z 3). <i>En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.</i> | 128 |
| III.22 | Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai CuCr1Zr n°4 (Z 4). <i>En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.</i> | 129 |
| III.1 | Principe de la mesure appliqué aux bancs d'essais | 130 |
| III.2 | Le porte-balai spécifique développé pour l'Electro-Tribomètre VALEO À Gauche - Le Porte-Balai Massif développé. À Droite - Le montage d'essai. | 131 |
| III.3 | L'Electro-Tribomètre n°1 VALEO À Gauche - Vue sur la monobague dans le système complet. À Droite - Vue d'ensemble du banc. | 132 |

| | | |
|--------|---|-----|
| III.4 | L'Electro-Tribomètre n°2 VALEO <i>À Gauche</i> - Vue de l'enceinte où se trouvent les deux arbres porte-monobague pour deux essais simultanés. <i>Au Centre</i> - Partie Opérative du banc avec accès à l'enceinte où température et hygrométrie sont contrôlées. <i>À Droite</i> - Partie Commande du banc. | 132 |
| III.1 | Dimensionnel adopté pour la fabrication des disques utilisés sur le tribomètre bi-pion. | 133 |
| III.2 | Exemple de réalisation d'un disque destiné au tribomètre bi-pion. Matériau : Cuivre revêtu d'Or. | 134 |
| III.3 | Mesure du défaut géométrique d'un disque en position d'essai. | 135 |
| III.1 | Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Cuivre Cw024a. <i>En Bleu</i> - Balai négatif. <i>En Vert</i> - Balai positif. | 136 |
| III.2 | Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Aluminium. <i>En Bleu</i> - Balai négatif. <i>En Vert</i> - Balai positif. | 137 |
| III.3 | Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Acier A37. <i>En Bleu</i> - Balai négatif. <i>En Vert</i> - Balai positif. | 137 |
| III.4 | Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Cuivre-Chrome-Zirconium. <i>En Bleu</i> - Balai négatif. <i>En Vert</i> - Balai positif. | 138 |
| III.5 | Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Cuivre Revêtus d'Or. <i>En Bleu</i> - Balai négatif. <i>En Vert</i> - Balai positif. | 138 |
| III.6 | Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Cuivre Revêtus de CuO. <i>En Bleu</i> - Balai négatif. <i>En Vert</i> - Balai positif. | 139 |
| III.7 | Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Cuivre Cw024a. <i>En Bleu</i> - Balai négatif. <i>En Vert</i> - Balai positif. | 139 |
| III.8 | Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Aluminium. <i>En Bleu</i> - Balai négatif. <i>En Vert</i> - Balai positif. | 140 |
| III.9 | Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Acier A37. <i>En Bleu</i> - Balai négatif. <i>En Vert</i> - Balai positif. | 140 |
| III.10 | Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Cuivre-Chrome-Zirconium. <i>En Bleu</i> - Balai négatif. <i>En Vert</i> - Balai positif. | 141 |
| III.11 | Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Cuivre Revêtus d'Or. <i>En Bleu</i> - Balai négatif. <i>En Vert</i> - Balai positif. | 141 |
| III.12 | Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Cuivre Revêtus de CuO. <i>En Bleu</i> - Balai négatif. <i>En Vert</i> - Balai positif. | 142 |

Liste des tableaux

| | | |
|--------|--|-----|
| .1 | Notations latines utilisées dans ce document - 1 | 7 |
| .2 | Notations latines utilisées dans ce document - 2 | 8 |
| .3 | Notations grecques utilisées dans ce document. | 8 |
| II.4 | <i>D'après Norme et [25]</i> - Caractéristiques essentielles du Cuivre Cw024a | 60 |
| II.5 | <i>D'après Norme et [25]</i> - Caractéristiques essentielles de l'Aluminium AL1050. | 61 |
| II.6 | Caractéristiques essentielles de l'Acier A37. | 61 |
| II.7 | Caractéristiques essentielles du Cuivre-Chrome-Zirconium CuCr1Zr. | 62 |
| II.8 | <i>D'après Norme et [25]</i> - Caractéristiques essentielles du Cuivre revêtu de CuO. | 62 |
| II.9 | Caractéristiques essentielles du Cuivre revêtu d'Or. | 62 |
| II.10 | Plan d'essais détaillé. | 65 |
| II.11 | Synthèse des Résistances Statiques de Contact. | 71 |
| II.12 | Synthèse des Résistances Dynamiques de Contact. | 72 |
| II.13 | Synthèse des Coefficients de Frottement Moyens. | 74 |
| II.14 | Synthèse des principales caractéristiques d'essai | 77 |
| III.15 | Notations utilisées pour la caractérisation des résistances de contact statiques | 80 |
| III.16 | Synthèse des Résistances Statiques de Contact. | 80 |
| III.17 | Notations expérimentales définies pour le calcul de la résistance du film. | 82 |
| III.18 | Valeurs de théorique de la résistance propre (résistance matériaux + résistance de constriction). | 83 |
| III.19 | Valeurs des résistances du film initialement en présence sur le disque (film d'oxydes et d'impuretés éventuelles). | 83 |
| III.20 | Valeurs des résistances des films de transfert en fonction des matériaux et de la polarité. | 84 |
| III.21 | Synthèse des Coefficients de Frottement. | 85 |
| III.22 | Rappel de la configuration des disques à l'état neuf. | 92 |
| III.23 | Résistance de Film de Surface suivant Revêtement. | 92 |
| III.24 | Échelonnement des niveaux d'intercorrélation de deux signaux | 101 |
| III.25 | Effets de la polarité sur l'intercorrélation de deux signaux | 104 |
| III.1 | Relevés de diamètre des pistes. | 143 |

Bibliographie

- [1] http://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_l'electricite
- [2] Erle I. SHOBERT, THE PHYSICS AND CHEMISTRY OF SLIDING CONTACTS, éditions *Chemical Publishing Company, Inc. New York*, 1965
- [3] Y.TAMAI, CONTACT RESISTANCE BETWEEN SURFACE-OXIDIZED METALS IN REPEATED SLIDING, WEAR 1 (5) 377, éditions *ELSEVIER*, 1957
- [4] F.P. BOWDEN & J.P.B. WILLIAMSON, ELECTRICAL CONDUCTION IN SOLIDS INFLUENCE OF THE PASSAGE OF CURRENT BETWEEN SOLIDS, WEAR 2 (3) 238, éditions *ELSEVIER*, 1958
- [5] W.J. SPRY & P.M. SCHERER, COPPER OXIDE FILM FORMATION AT CARBON-COPPER SLIDING INTERFACE, WEAR 4 (2) 137, éditions *ELSEVIER*, 1961
- [6] J. SPREADBROUGH, FRICTIONAL BEHAVIOUR OF GRAPHITE, WEAR 5 (1) 18, éditions *ELSEVIER*, 1961
- [7] J.N. KING & H. WILMAN, THE FRICTION AND WEAR PROPERTIES, DURING ABRASION, OF COMPRESSED GRAPHITE-POWDER COMPACTS AND COMMERCIAL GRAPHITISED CARBONS, WEAR 5 (3) 213, éditions *ELSEVIER*, 19XX
- [8] I.W. STANLEY, AERODYNAMIC FILMS BETWEEN CARBON BRUSHES AND SLIP RINGS, WEAR 5 (5) 363, éditions *ELSEVIER*, 1962
- [9] J.E. THOMSON & J.B. TURNER, THE PART PLAYED BY A METAL OXYDE IN DETERMINING THE CHARACTERISTICS OF A GRAPHITE METAL INTERFACE, WEAR 6 (1) 30, éditions *ELSEVIER*, 1962
- [10] P.J. BRYANT, P.L. GUTSHALL & L.H. TAYLOR, STUDY OF MECHANISMS OF GRAPHITE FRICTION AND WEAR, WEAR 7 (1) 118, éditions *ELSEVIER*, 1964
- [11] B.R.G. SWINNERTON & M.J.B. TURNER, BLISTERING OF GRAPHITE FILMS IN SLIDING CONTACTS, WEAR 9 (2) 142, éditions *ELSEVIER*, 1966
- [12] E.C. PIKE & J.E. THOMSON, ON THE POSSIBLE APPLICATIONS OF PYROLYTIC GRAPHITE AS A BRUSH MATERIAL AND A CRITICAL ASSESSMENT OF THE USE OF BRUSHES WITH TRUNCATED CONICAL TIPS TO STUDY THE RUNNING CHARACTERISTICS OF GRAPHITE MATERIALS, WEAR 13 (4/5) 247, éditions *ELSEVIER*, 1969
- [13] D.W. MCKEE & R.H. SAVAGE, CHEMICAL FACTORS IN CARBON BRUSH WEAR, WEAR 22 (2) 193, éditions *ELSEVIER*, 1972
- [14] J.M. CASSTEVENS, INFLUENCE OF HIGH VELOCITIES AND HIGH CURRENT ON THE FRICTION AND WEAR BEHAVIOUR OF COPPER-GRAPHITE BRUSHES, WEAR 48 (1) 121, éditions *ELSEVIER*, 1977
- [15] R.A. MARSHALL, THE DESIGN OF THE BRUSHES FOR THE CANBERRA HOMOPOLAR GENERATOR, REP. N°EP-RR-3, 1964
- [16] B. STERNLICHT & H. APKARIAN, INVESTIGATION OF MELT LUBRICATION, ASLE TRANS. 2, 1960
- [17] J.K. LANCASTER, INSTABILITIES IN THE FRICTIONAL BEHAVIOUR OF CARBONS AND GRAPHITES, WEAR 34 (3) 275, éditions *ELSEVIER*, 1975
- [18] R.A. MARSHALL, THE MECHANISMS OF CURRENT TRANSFER IN HIGH CURRENT SLIDING CONTACTS, WEAR 37 (2) 233, éditions *ELSEVIER*, 1976

- [19] J.K. LANCASTER, THE INFLUENCE OF THE CONDITIONS OF SLIDING ON THE WEAR OF ELECTRO-GRAPHITIC BRUSHES, éditions *British Journal of Applied Physics*, 1962
- [20] R. HOLM, ELECTRIC CONTACTS HANDBOOK, éditions *Springer-Verlag*, 1958
- [21] G.ROSSET, ELECTRODINAMIQUE PCSI, LES NOUVEAUX PRÉCIS BRÉAL, éditions *Bréal*, 2003
- [22] S.BELKHIAT & F.KERAGHEL, LES ELECTRONS SECONDAIRES DANS LE PROCESSUS AUGER À LA SURFACE D'UN ALLIAGE CU-BE, éditions *Les Courriers du Savoir*, pp 75-80, juin 2004
- [23] F.MONTAIGNE, EFFETS TUNNEL DÉPENDANT DU SPIN, DES SIMPLES AUX DOUBLES JONCTIONS, éditions *Université de PARIS VII - Denis DIDEROT*, oct 1999
- [24] F. DELMOTTE, (Thèse) DÉPÔTS DE FILMS MINCES Si-N_x ASSISTÉS PAR PLASMA HAUTE DENSITÉ. ETUDES CORRÉLÉES DE LA PHASE GAZEUSE DE L'INTERFACE SiN_x/INP ET DE LA PASSIVATION DU TRANSISTOR BIPOLAIRE À L'HÉTÉROJONCTION INP, éditions *Université de PARIS-SUD*, pp143 et suivantes, mai 1998
- [25] G.V. SAMSONOV, THE OXIDE HANDBOOK, éditions *IFI/Plenium Publishing Corp.*, 1973
- [26] P. BERNARD, (Thèse) ETUDE DU POLISSAGE MÉCANOCHEMIE DU CUIVRE ET MODÉLISATION DU PROCESSUS D'ENLÈVEMENT DE MATIÈRE, éditions *Ecole Centrale de LYON*, mai 2006
- [27] G.M. BARTENEV & V.V. LAVRENTEV, FRICTION AND WEAR OF POLYMERS, Tribology Series, 6, éditions *ELSEVIER*, 1981
- [28] N.V. DEMKIN, FAKTICHESKAYA PLOSHCAD KONTAKTA (THE ACTUAL CONTACT AREA), éditions *AN SSSR (Akademiâ Nauk Svaz Sovetskych Socialisticheskych Republik)*, Moscow, 1965
- [29] J.F. ARCHARD, PROCEEDINGS ROYAL SOCIETY A243 (1957) 190, 1957
- [30] M.L. ZANI, LA MESURE DE RUGOSITÉ ? QUELQUES NORMES ET PLUSIEURS DIZAINES DE PARAMÈTRES, éditions *MESURES n°758*, pp 59-63, 2003
- [31] F.P. BOWDEN & D.TABOR, THE FRICTION AND LUBRICATION OF SOLIDS, éditions *CLARENDON Press*, Part I, 1950; Part II, 1964
- [32] N.V. DEMKIN, TEORIYA TRENIYA I IZNOSA (THEORY OF FRICTION AND WEAR), éditions *Nauka, Moscow*, 1965
- [33] P-H. CORNUAULT, (Thèse) CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DU COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE DE MATÉRIAUX CARBONÉS POUR APPLICATIONS ÉLECTRIQUES, *École Centrale Lyon*, 2008
- [34] B. KWIECINSKA & H.I. PETERSON, GRAPHITE, SEMI-GRAPHITE, NATURAL COKE AND NATURAL CHAR CLASSIFICATION - ICCP SYSTEM, éditions *International Journal of Coal Geology*, 2004
- [35] M. BRAUNOVIC, V.V. KONCHITS & N.K. MYSCHKIN, ELECTRICAL CONTACTS : FUNDAMENTALS, APPLICATIONS AND TECHNOLOGY, éditions *CRC Press*, 2007
- [36] R. GRAS, F. ROBBE-VALLOIRE & C. RICHARD, COURS DE TRIBOLOGIE DE L'UNIVERSITÉ TECHNIQUE DE COMPIÈGNE, 2001
- [37] AFNOR - UNM, SPÉCIFICATION GÉOMÉTRIQUE DES PRODUITS (GPS), 11ÈME ÉDITION, éditions de l'AFNOR, 2002
- [38] H. HERTZ, ÜBER DIE BERÜHRUNG FESTER ELASTISCHER KÖRPER, *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 1982
- [39] H. ESSONE OBAME, (Thèse) ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES DÉFAUTS DES CONNECTEURS ENCARTABLES DORÉS ET MISE EN ŒUVRE D'OUTILS DE DIAGNOSTIC, *Université de Rennes I*, 2012
- [40] R. CAYREL & E. SCHATZMAN, SUR LA POLARISATION INTERSTELLAIRE DES PARTICULES DE GRAPHITE, *Annales d'Astrophysique*, Vol. 17, 1954
- [41] R. S. TIMSIT, ELECTRICAL CONDUCTION THROUGH SMALL CONTACTS SPOTS, *IEEE Proceedings of the 50th Holm Conference on Electrical Contacts*, 2004
- [42] M.B. READ, J.H. LANG & A.H. SLOCUM, CONTACT RESISTANCE IN FLAT THIN FILMS, *IEEE Proceedings of the 55th Holm Conference on Electrical Contacts*, 2009

- [43] A. BOUCHOUCHA, C. BOUBECHOU, H. ZAIDI, S. CHEKROUD, A. MEKROUD, INFLUENCE DES PARAMÈTRES THERMOÉLECTROMÉCANIQUES SUR LE COMPORTEMENT EN FROTTEMENT DES COUPLES CUIVRE-ACIER ET CUIVRE-GRAPHITE, Conception, Fabrication et Durabilité, éditions *TRANSVALOR - Presse des Mines*, Paris, 2012
- [44] R. HOLM, ELECTRICAL CONTACTS, 4^{ème} édition, *Springer-Verlag*, Berlin, 1967
- [45] L. FECHANT, LE CONTACT ELECTRIQUE, éditions *Hermès*, Paris, 1995
- [46] Y. BERTHIER, L. VINCENT & M. GODET, FRETTEMENT CORROSION : ASPECTS FONDAMENTAUX, DESCRIPTIONS DES PHÉNOMÈNES, *Contrôle Qualité Industriel n°155*, 1989
- [47] H. ZAIDI & J. FRÊNE, COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE DES LUBRIFIANTS SOLIDES GRAPHITE ET MOS_2 SOUS DIFFÉRENTS ENVIRONNEMENTS GAZEUX, Actes JIFT 2008 - Tribologie et Développement Durable *Presses Polytechniques et universitaires Normandes*, Lausanne, 2012
- [48] R. HOLM, ELECTRIC CONTACTS, Boktryckeri Aktiebolag, éditions *Almqvist & Wiksells*, Uppsala (SWE), 1946
- [49] I. CARON, M. QUILLIEN, T. DA SILVA & F. ROBBE-VALLOIRE, MÉTROLOGIE STATIQUE, APPLICATION À LA MÉCANIQUE DES SOLIDES, Cours 2007-2008
- [50] P. ADJADJ, (Thèse) INFLUENCE DU MILIEU CRYOTECHNIQUE SUR LE COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE DES MATÉRIAUX HÉTÉROGÈNES, Paris VI, 1988

Annexe A

Résultats d'intercorrrelation normée des signaux de résistance et de frottement pour chaque essai

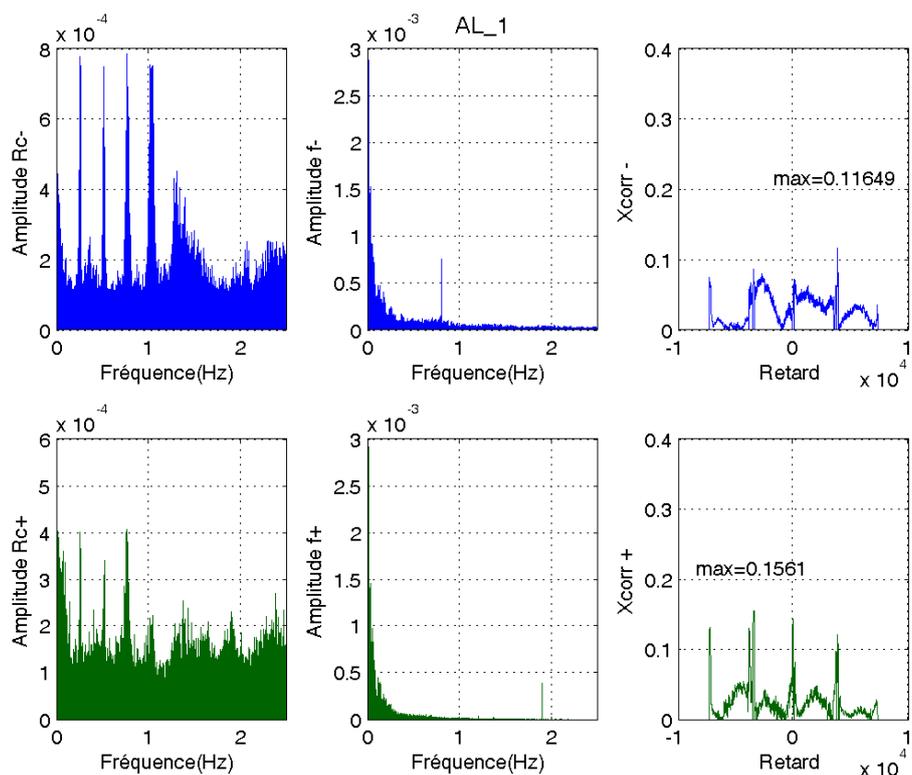


Figure III.1 - Analyse Spectrale et intercorrrelation des signaux de l'essai Aluminium n°1 (AL 1). En Bleu- Balai négatif. En Vert- Balai positif.

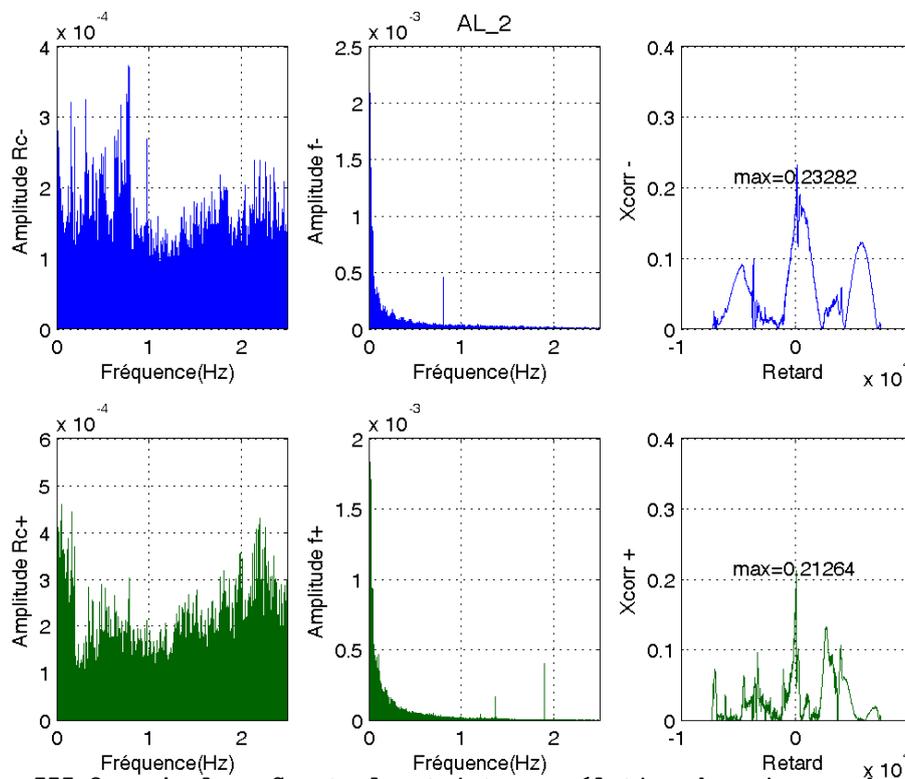


Figure III.2 - Analyse Spectrale et intercorrélration des signaux de l'essai Aluminium n°2 (AL 2). *En Bleu*- Balai négatif. *En Vert*- Balai positif.

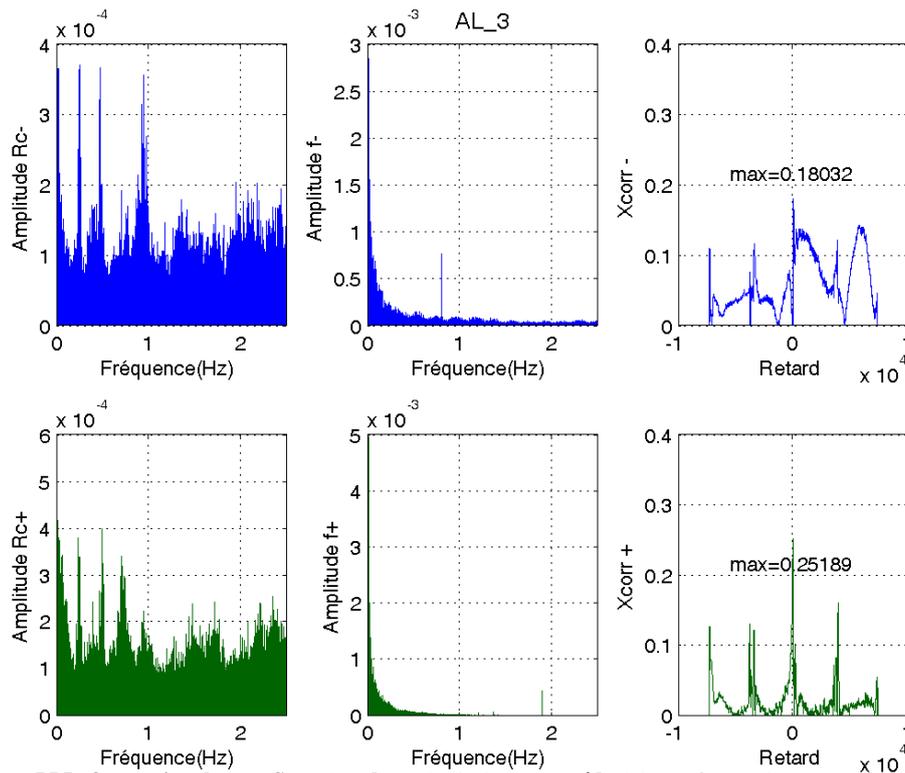


Figure III.3 - Analyse Spectrale et intercorrélration des signaux de l'essai Aluminium n°3 (AL 3). *En Bleu*- Balai négatif. *En Vert*- Balai positif.

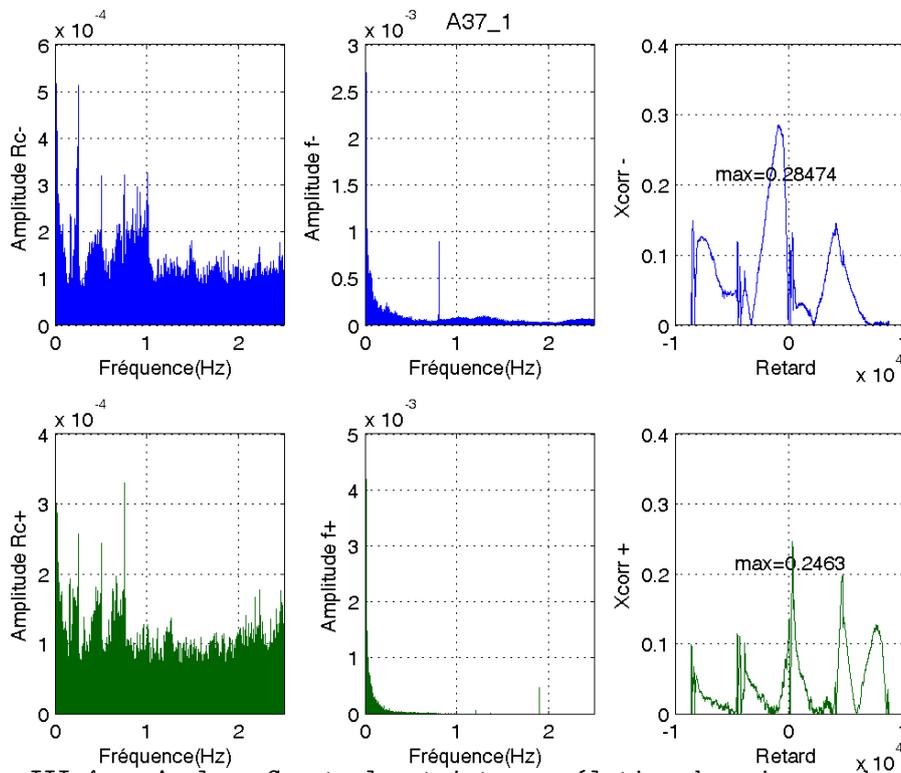


Figure III.4 - Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Acier A37 n°1 (A37 1). *En Bleu-* Balai négatif. *En Vert-* Balai positif.

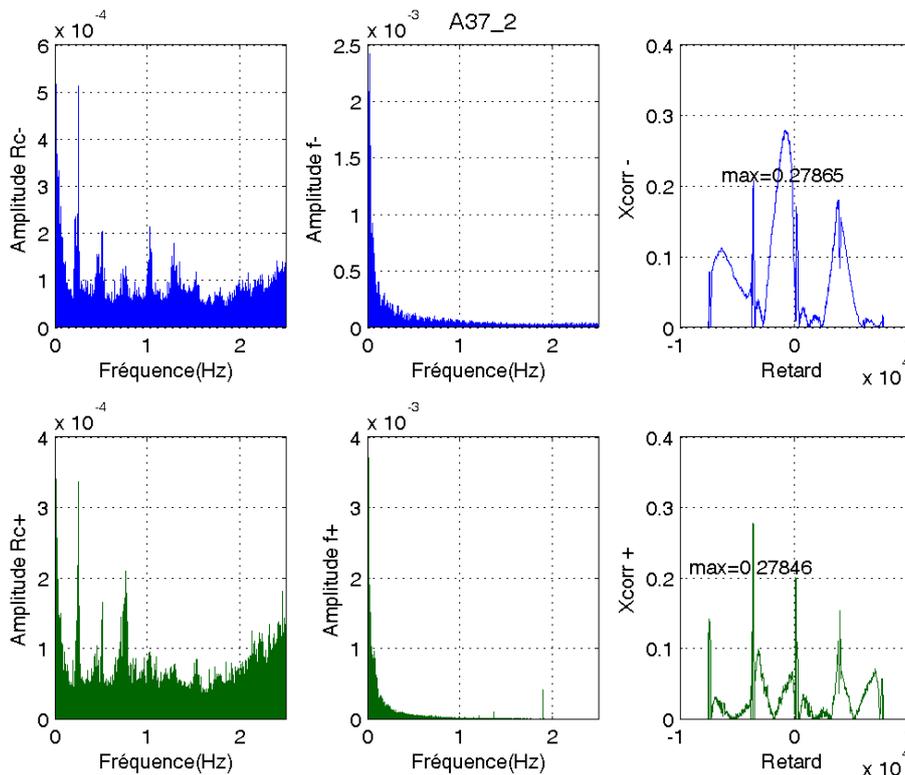


Figure III.5 - Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Acier A37 n°2 (A37 2). *En Bleu-* Balai négatif. *En Vert-* Balai positif.

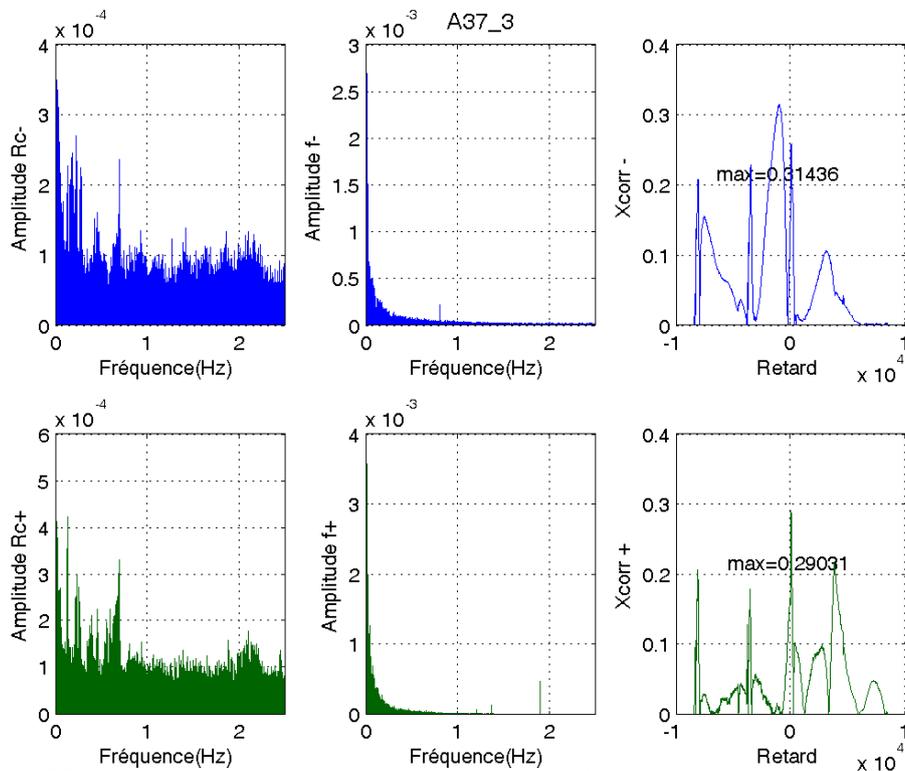


Figure III.6 - Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Acier A37 n°3 (A37 3). *En Bleu-* Balai négatif. *En Vert-* Balai positif.

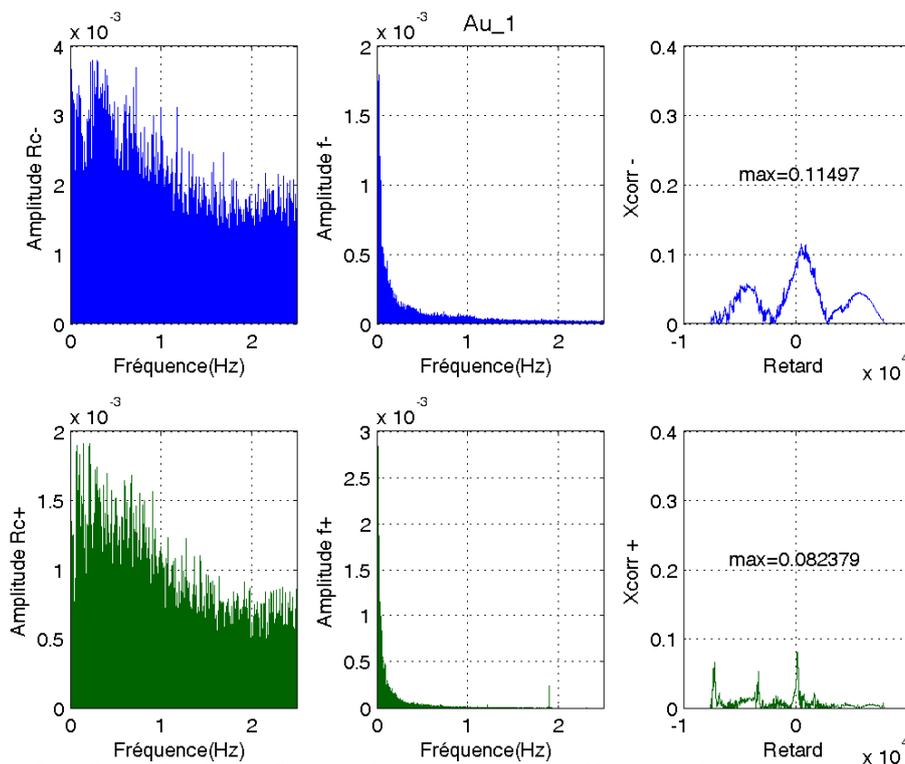


Figure III.7 - Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Or-Cuivre Au n°1 (Au 1). *En Bleu-* Balai négatif. *En Vert-* Balai positif.

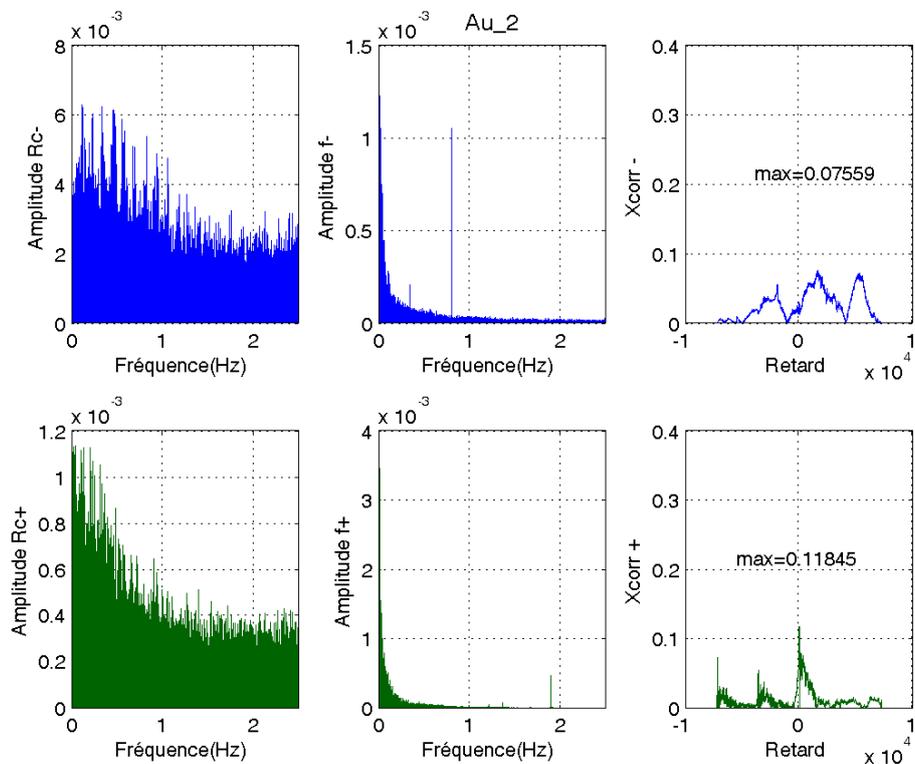


Figure III.8 - Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Or-Cuivre Au n°2 (Au 2). *En Bleu-* Balai négatif. *En Vert-* Balai positif.

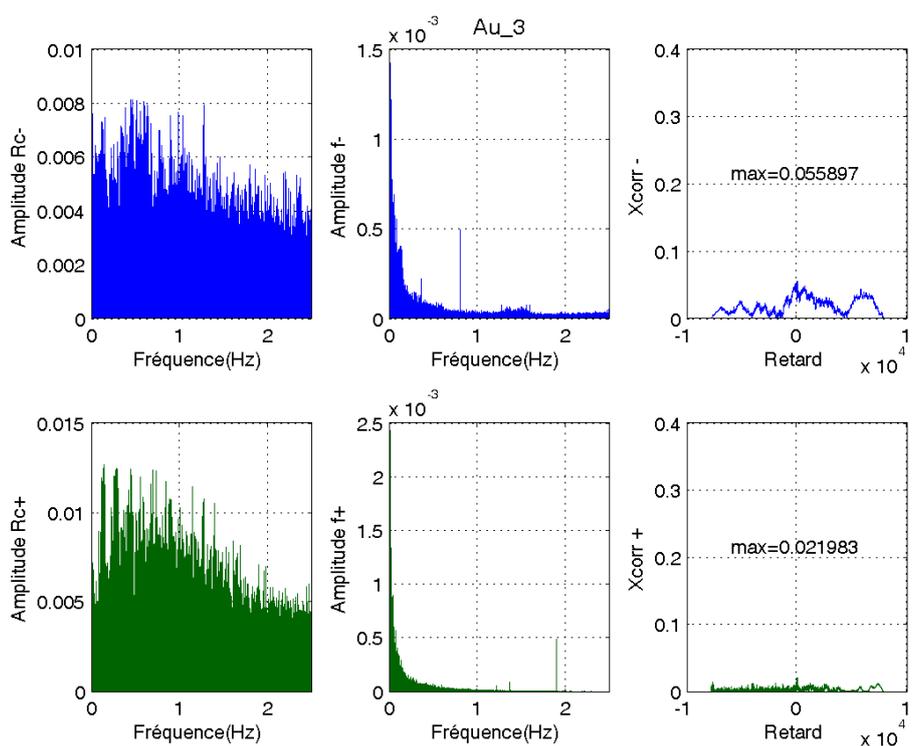


Figure III.9 - Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai Or-Cuivre Au n°3 (Au 3). *En Bleu-* Balai négatif. *En Vert-* Balai positif.

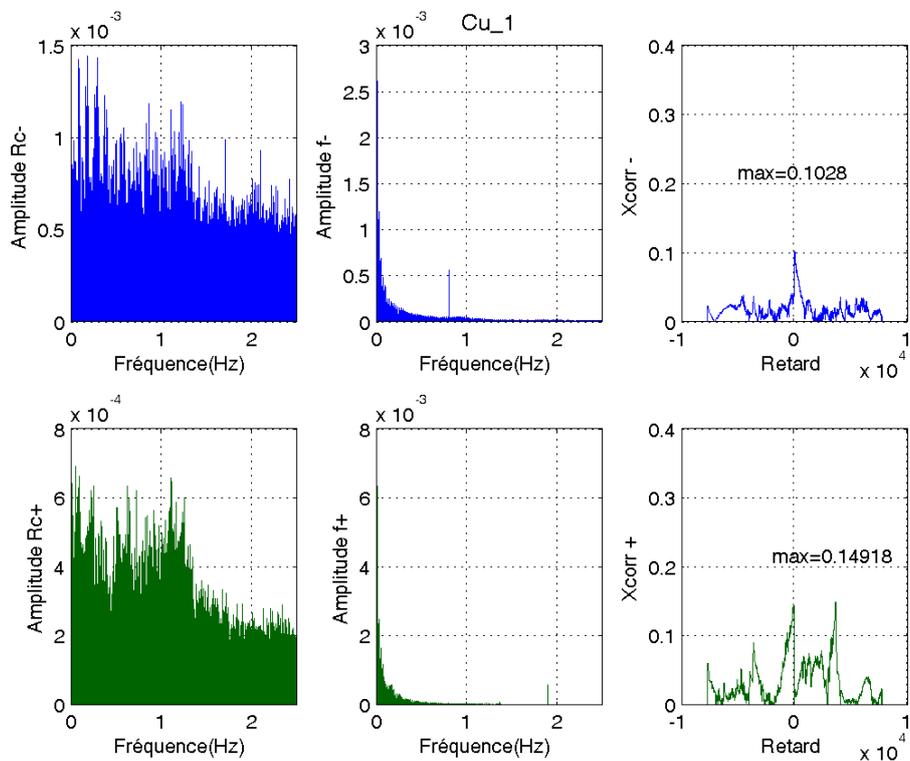


Figure III.10 - Analyse Spectrale et intercorrélacion des signaux de l'essai Cuivre n°1 (Cu 1). *En Bleu-* Balai négatif. *En Vert-* Balai positif.

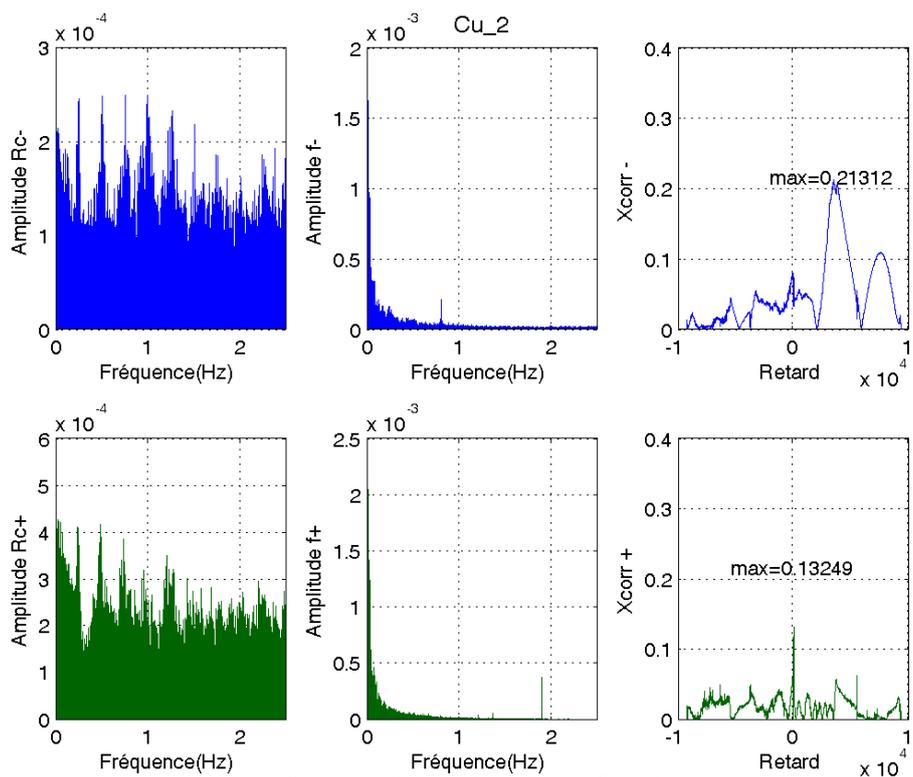


Figure III.11 - Analyse Spectrale et intercorrélacion des signaux de l'essai Cuivre n°2 (Cu 2). *En Bleu-* Balai négatif. *En Vert-* Balai positif.

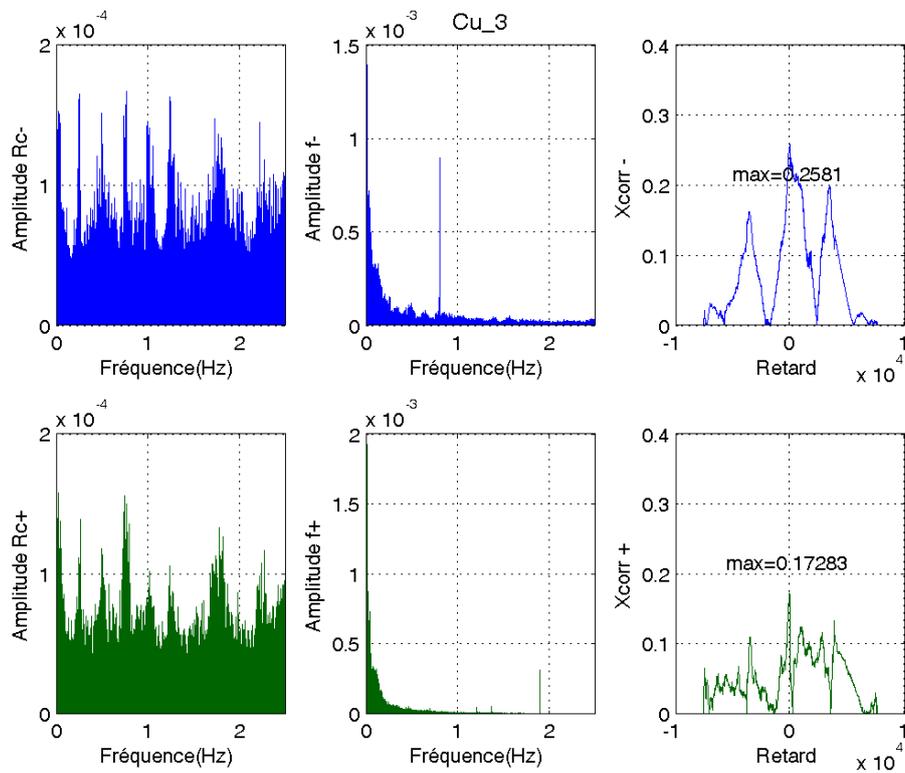


Figure III.12 - Analyse Spectrale et intercorrélacion des signaux de l'essai Cuivre n°3 (Cu 3). *En Bleu-* Balai négatif. *En Vert-* Balai positif.

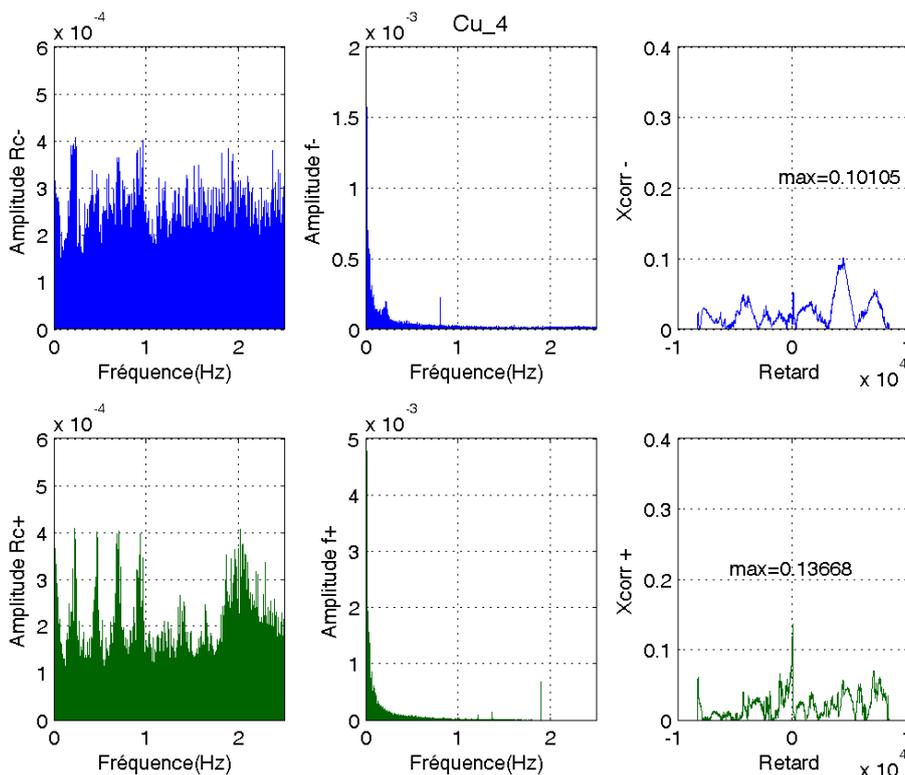


Figure III.13 - Analyse Spectrale et intercorrélacion des signaux de l'essai Cuivre n°4 (Cu 4). *En Bleu-* Balai négatif. *En Vert-* Balai positif.

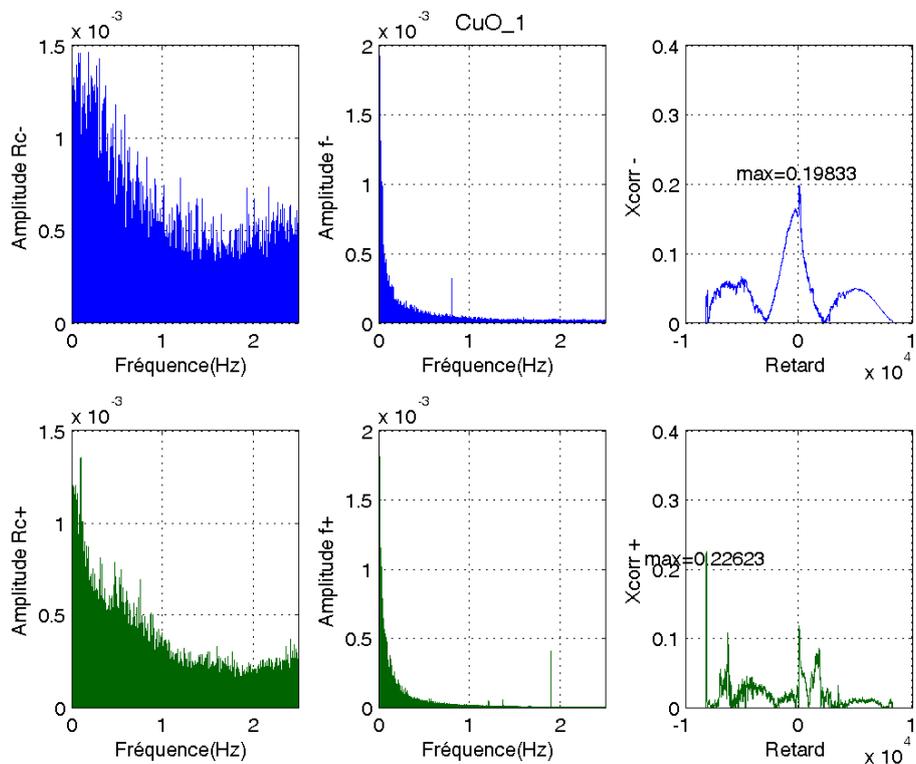


Figure III.14 - Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai CuO-Cuivre n°1 (CuO 1). *En Bleu-* Balai négatif. *En Vert-* Balai positif.

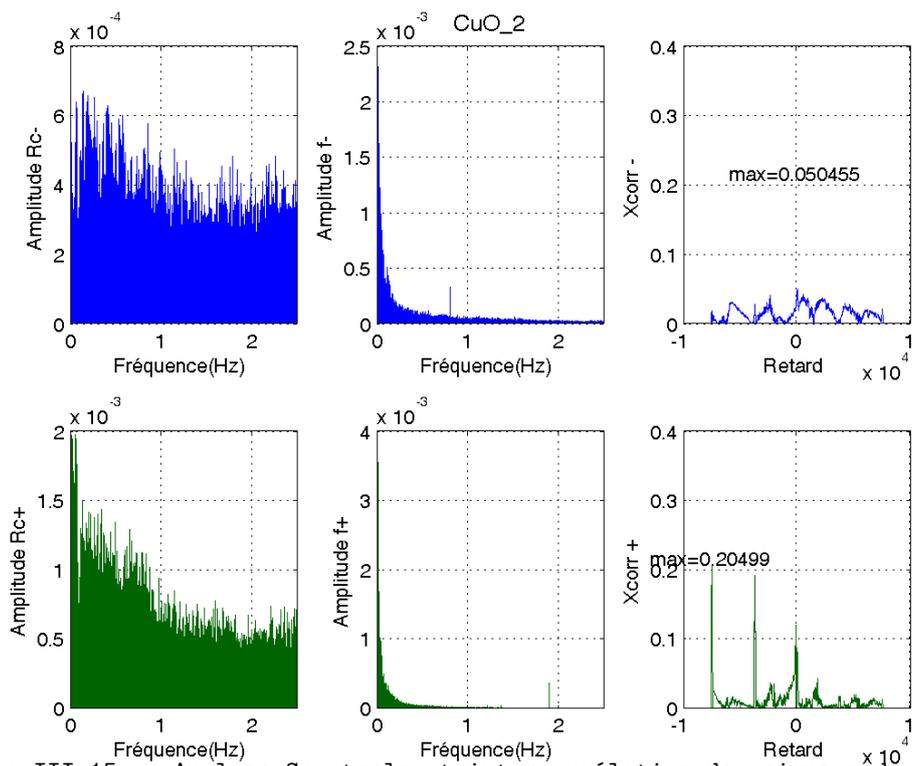


Figure III.15 - Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai CuO-Cuivre n°2 (CuO 2). *En Bleu-* Balai négatif. *En Vert-* Balai positif.

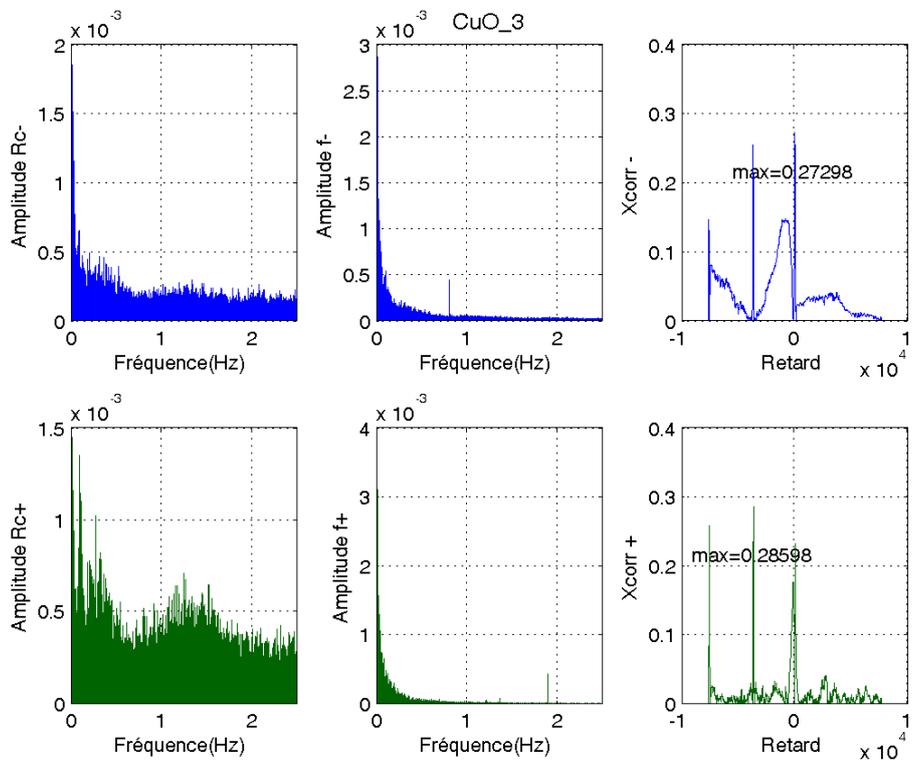


Figure III.16 - Analyse Spectrale et intercorrélacion des signaux de l'essai CuO-Cuivre n°3 (CuO 3). *En Bleu-* Balai négatif. *En Vert-* Balai positif.

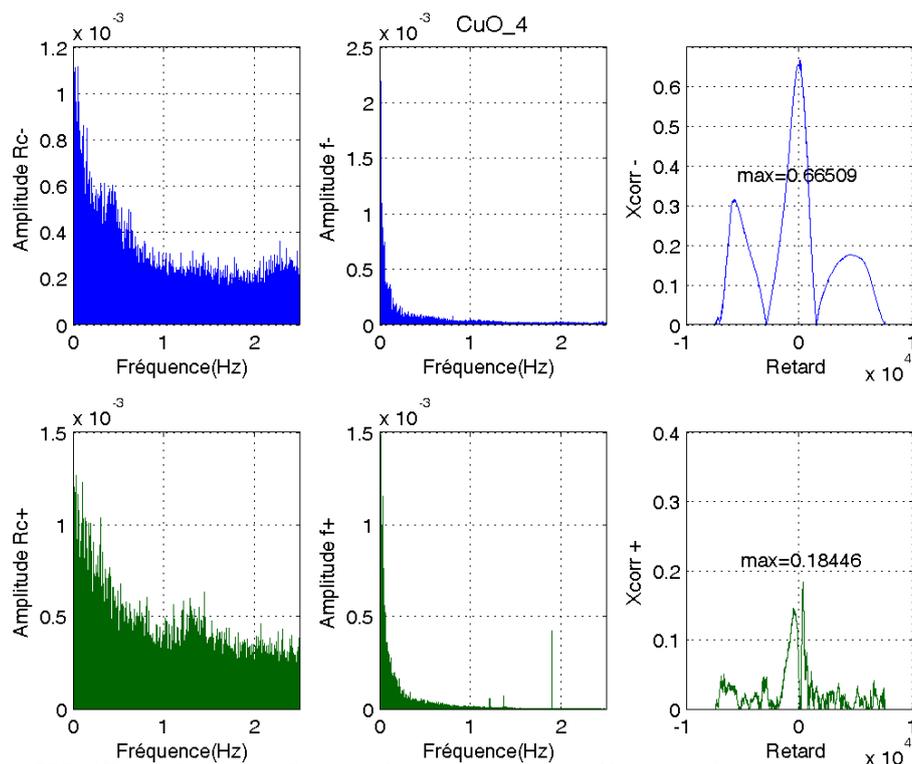


Figure III.17 - Analyse Spectrale et intercorrélacion des signaux de l'essai CuO-Cuivre n°4 (CuO 4). *En Bleu-* Balai négatif. *En Vert-* Balai positif.

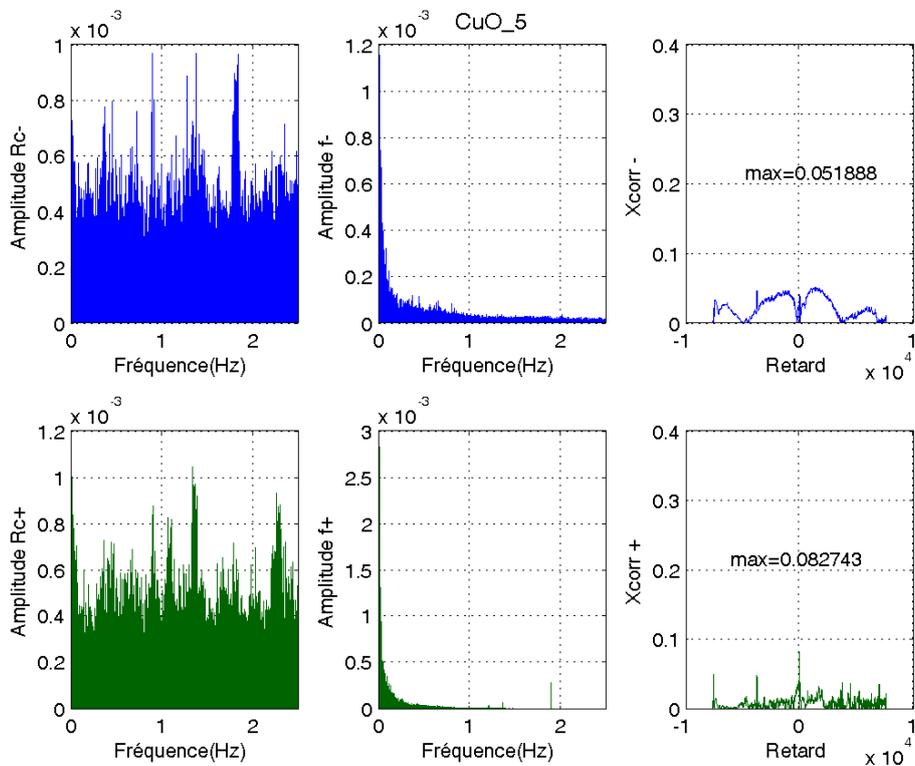


Figure III.18 - Analyse Spectrale et intercorrélacion des signaux de l'essai CuO-Cuivre n°5 (CuO 5). *En Bleu-* Balai négatif. *En Vert-* Balai positif.

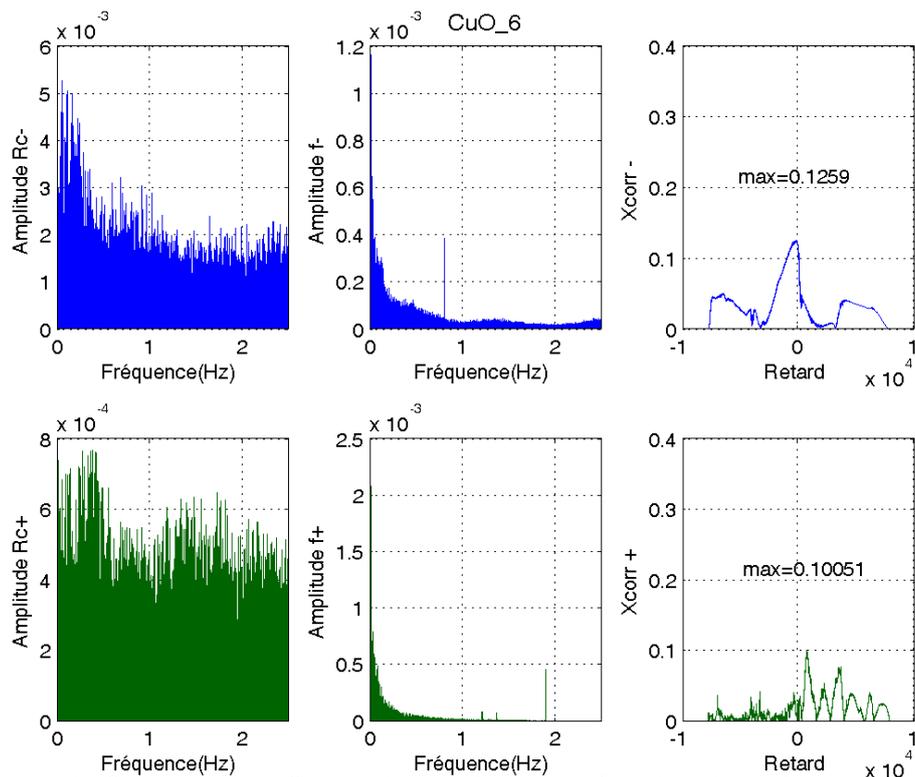


Figure III.19 - Analyse Spectrale et intercorrélacion des signaux de l'essai CuO-Cuivre n°6 (CuO 6). *En Bleu-* Balai négatif. *En Vert-* Balai positif.

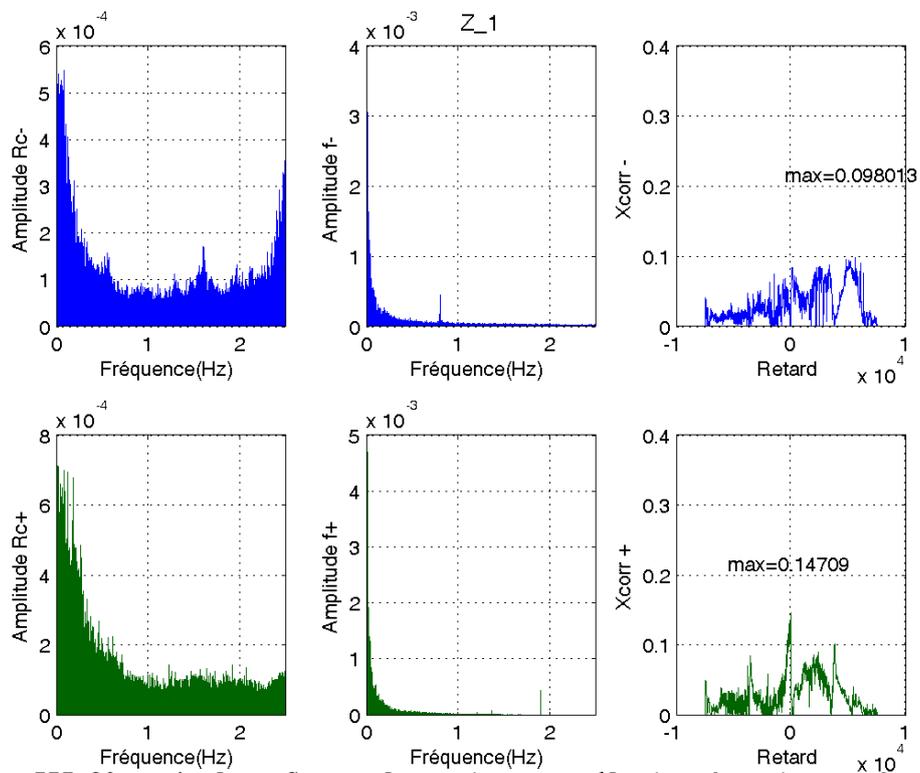


Figure III.20 - Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai CuCr1Zr n°1 (Z 1). *En Bleu-* Balai négatif. *En Vert-* Balai positif.

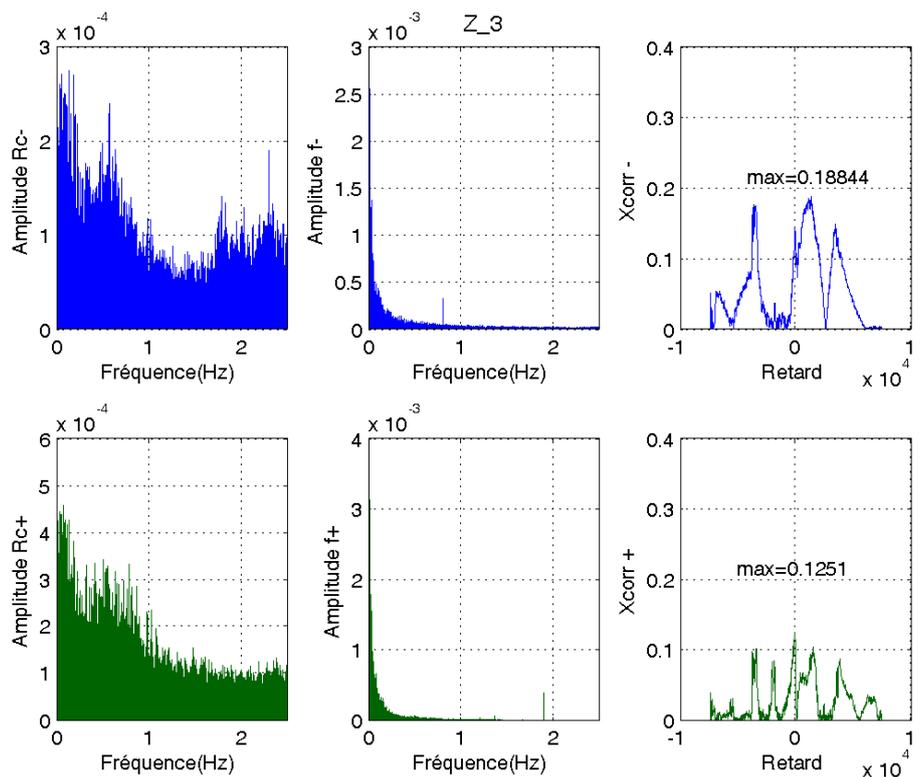


Figure III.21 - Analyse Spectrale et intercorrélation des signaux de l'essai CuCr1Zr n°3 (Z 3). *En Bleu-* Balai négatif. *En Vert-* Balai positif.

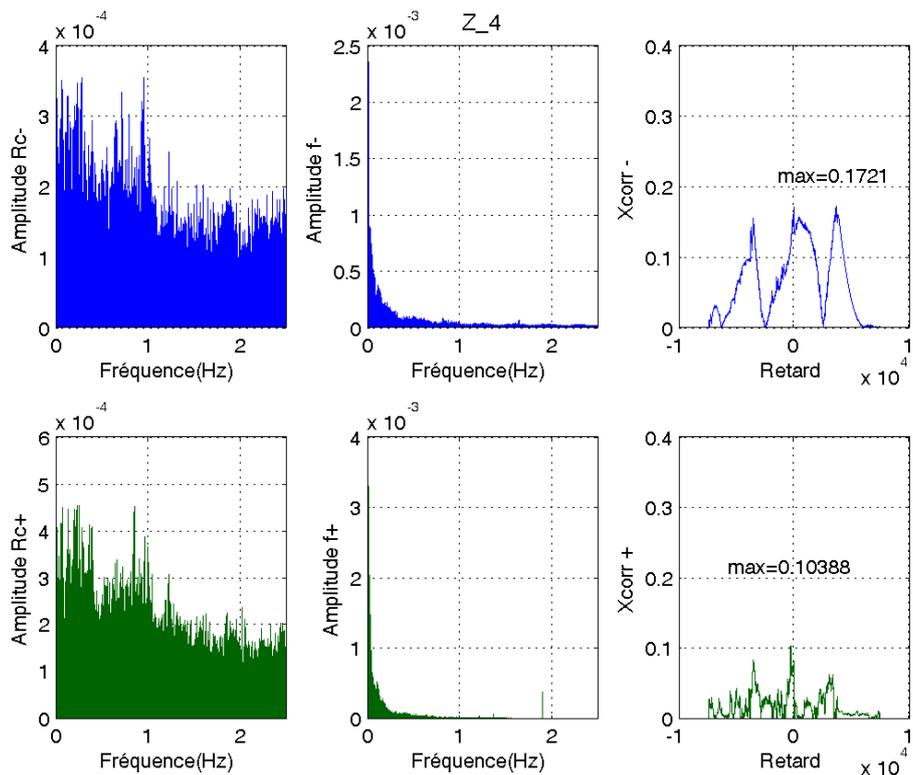


Figure III.22 - Analyse Spectrale et intercorrélacion des signaux de l'essai CuCr1Zr n°4 (Z 4). *En Bleu-* Balai négatif. *En Vert-* Balai positif.

Annexe B

Électro-tribomètres VALEO

La figure III.1 présente le principe de la mesure développée. Dans ce schéma-là, la résistance variable R_v est utilisée seulement pour régler i_{exc} lorsque U_{B+} est fixé et simuler la résistance du rotor.

Pour simplifier le montage nous pouvons disposer de bagues uniques larges (dites mono-bagues ou bagues mono-pièce) permettant de faire frotter le balai de référence en position centrale entre les pistes des balais de puissance¹.

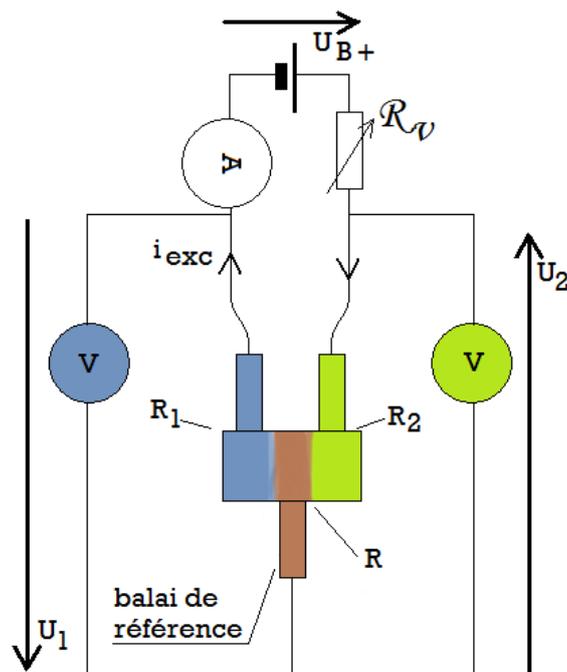


Figure III.1 - Principe de la mesure appliqué aux bancs d'essais

Cette méthode permet de mesurer chacune des résistances avec une référence unique (le balai central inférieur). On supprime les perturbations issues des modes propres de la machine, de l'amortissement de la bobine, de l'échauffement de celle-ci, etc. Le balai de référence n'introduit, de plus,

1. Lors de la fabrication, ces bagues ne forment qu'une seule pièce qui est découpée ensuite en deux lors de l'usinage final du rotor et de la mise aux cotes. Nous prélevons donc les pièces avant qu'elles passent la phase d'usinage final

aucune perturbation tribo-électrique sur la piste des balais de puissance.

Afin de recréer des conditions proches de celles sur une machine réelle, les composants utilisés seront au maximum issus des composants de série. Ainsi nous avons dessiné, autour d'une cage porte-balais de série, avec ses ressorts et balais de série, un montage permettant de s'affranchir des défauts évoqués précédemment et qui avaient eu pour conséquences des fonctions contraintes que devait satisfaire la nouvelle architecture. Le système peut, de plus, fonctionner pour des durées d'essai de plusieurs centaines d'heures sans discontinuer. Un choix judicieux de matériaux (PEEK², aluminium) assure la résistance thermique et l'isolation électrique. De par sa géométrie massive, le système évite tout risque de mauvais maintien des balais et les mesures de tensions, courant, températures, sont effectuées avec quatre chiffres significatifs. Le porte-balais spécifique est présenté figure III.2 :

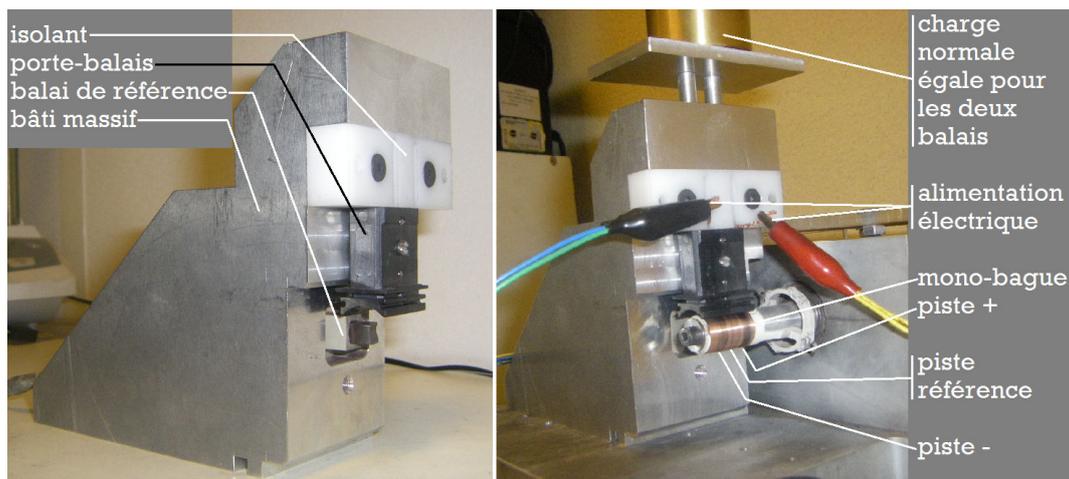


Figure III.2 - Le porte-balai spécifique développé pour l'Electro-Tribomètre VALEO

À Gauche - Le Porte-Balai Massif développé.

À Droite - Le montage d'essai.

Cette architecture est parfaitement intégrée au banc (figure III.3) dont le développement avait permis une certaine modularité.

2. Poly Ether Ether Ketone

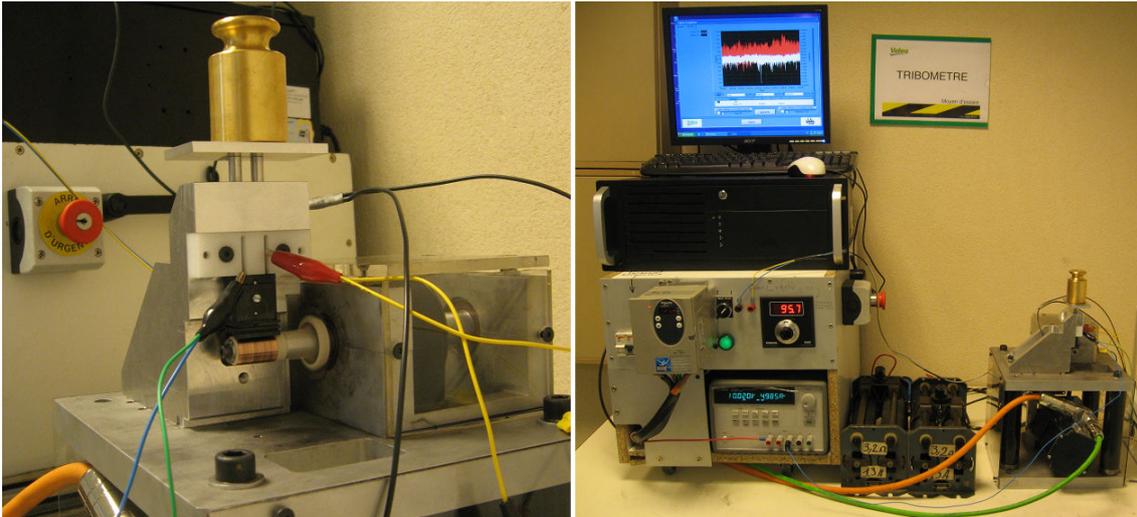


Figure III.3 - L'Electro-Tribomètre n°1 VALEO
À Gauche - Vue sur la monobague dans le système complet.
À Droite - Vue d'ensemble du banc.

À la suite des essais réalisés sur l'Electro-Tribomètre n°1, la mesure et la méthode choisie pour la réaliser ont été transposées dans un banc disposant de fonctionnalités nouvelles (plage de vitesses plus importante, deux essais simultanés possibles, enceinte régulée en température et hygrométrie, etc.). Ce nouveau banc, l'Electro-Tribomètre n°2 (figure III.4), a été mis en service en 2011.



Figure III.4 - L'Electro-Tribomètre n°2 VALEO
À Gauche - Vue de l'enceinte où se trouvent les deux arbres porte-monobague pour deux essais simultanés.
Au Centre - Partie Opérative du banc avec accès à l'enceinte où température et hygrométrie sont contrôlées.
À Droite - Partie Commande du banc.

Annexe C

Géométrie et Tolérances de Fabrication des Disques d'Essai[L3690]

Les dimensions des disques sont imposées fonctionnellement par les caractéristiques du banc d'essai. Celles-ci sont présentées ci-dessous :

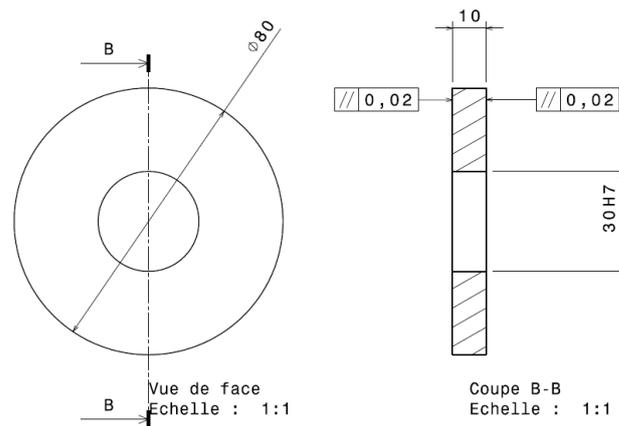


Figure III.1 - Dimensionnel adopté pour la fabrication des disques utilisés sur le tribomètre bi-pion.

Des disques possédant les caractéristiques dimensionnelles énumérées plus haut ont été fabriqués dans une quantité adaptée aux besoins d'essais (4 à 12 pièces) dans chacun de ces matériaux :

- * Acier A37
- * Aluminium 1050
- * Cuivre Cw024
- * Cuivre allié CuCr_1Zr
- * Cuivre Cw024 revêtu de $7\mu\text{m}$ d'or (ex : voir figure III.2)
- * Cuivre Cw024 revêtu d'oxyde de cuivre CuO



Figure III.2 - Exemple de réalisation d'un disque destiné au tribomètre bi-pion. Matériau: Cuivre revêtu d'Or.

Nous verrons un peu plus loin les raisons pour lesquelles ont été choisis ces matériaux. Nous avons choisi de créer sur le tribomètre bi-pion du LISMMA des conditions suffisamment proches de celles du cas réel de l'alternateur, de manière à maîtriser les paramètres souhaités sur un banc d'essais normalisé. Cela permet de ne pas introduire de déviation qui puisse être seulement due à des paramètres différents. Parmi ceux-ci, il est important de maîtriser la rugosité des disques d'essais réalisés.

Chaque disque a été passé à la toile abrasive pour assurer que son Ra moyen, mesuré radialement suivant trois directions uniformément réparties, sur chaque face, soit bien compris entre 0,8 et 1,6 μm . Chacune des valeurs se situe, après rectification si besoin, dans la fourchette du standard VALEO qui situe le Ra entre 0,8 μm et 1,6 μm .

Le défaut de circularité maximum admissible sur un collecteur standard VALEO est de $e = 0,02$ mm sur un tour, ou de $h_d = 6\mu m$ sur 15° . A la vitesse de rotation $v = 3000$ tr/min, un tour est effectué en $\frac{1}{50}$ e de seconde, et 15 degrés angulaires sont parcourus en $\frac{1}{1200}$ e de seconde. La vitesse verticale correspondant à un dénivelé de 6 μm sur 15° est :

$$v_{15} = \frac{6 \cdot 10^{-6}}{\frac{1}{1200}} = 7,2 \cdot 10^{-3} m/s \quad (C.1)$$

et la vitesse verticale correspondant à un dénivelé de 0,02mm sur un tour est de :

$$v_{360} = \frac{20 \cdot 10^{-6}}{\frac{1}{50}} = 1 \cdot 10^{-3} m/s \quad (C.2)$$

La valeur la plus contraignante est v_{360} et le montage assuré par le tribomètre bi-pion doit donc assurer un défaut maximum tel que la vitesse verticale du balai soit toujours plus faible que $1 \cdot 10^{-3}$ m/s.

En ce qui concerne le défaut de forme, le maximum acceptable $h_{d-disque}$ doit vérifier :

$$h_{d-disque} \leq v_{360} \omega_d \quad (C.3)$$

$$\Rightarrow h_{d-disque} \leq 0,011 mm \quad (C.4)$$

Lors des mesures effectuées au comparateur, il le défaut de géométrie sur un tour est proche de la valeur limite, mais demeure inférieur à 0,01 mm.



Figure III.3 - Mesure du défaut géométrique d'un disque en position d'essai.

Annexe D

Graphes d'analyse fréquentielle des résistances de contact et des coefficients de frottement

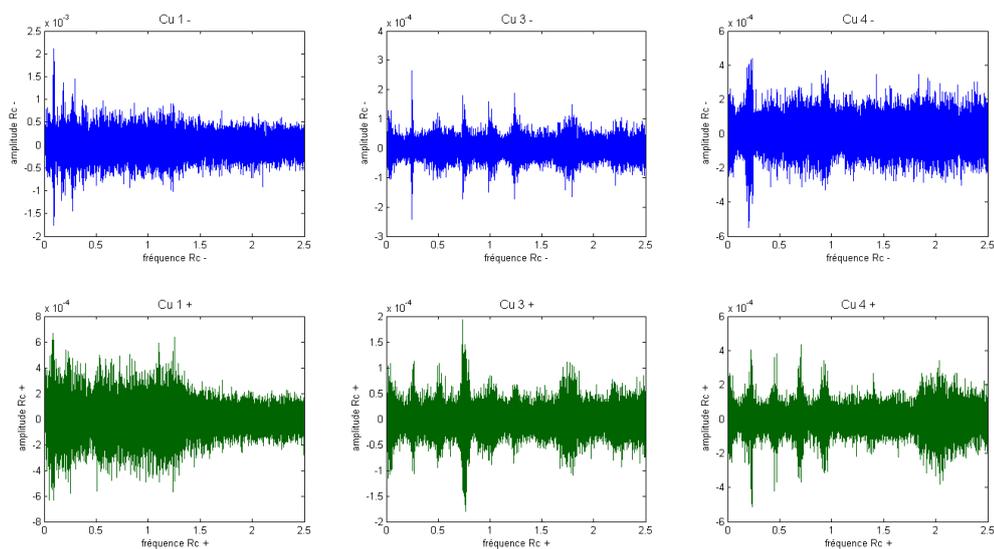


Figure III.1 - Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Cuivre Cw024a.

En Bleu- Balai négatif.

En Vert- Balai positif.

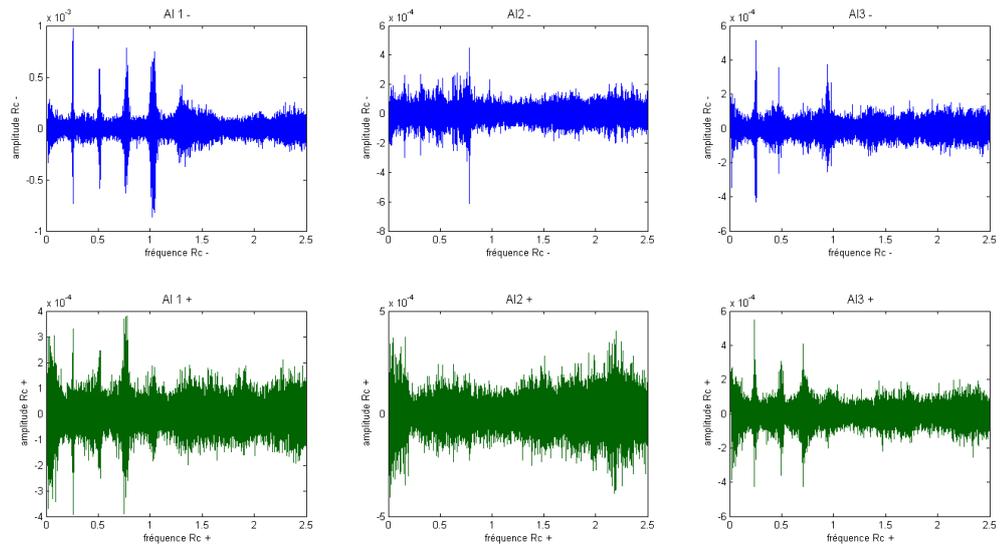


Figure III.2 - Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Aluminium.
En Bleu- Balai négatif.
En Vert- Balai positif.

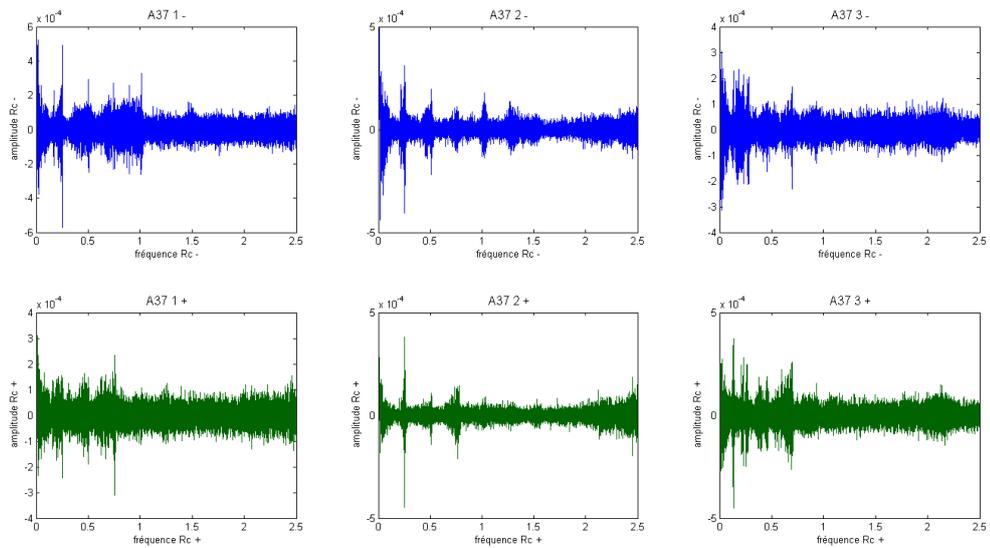


Figure III.3 - Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Acier A37.
En Bleu- Balai négatif.
En Vert- Balai positif.

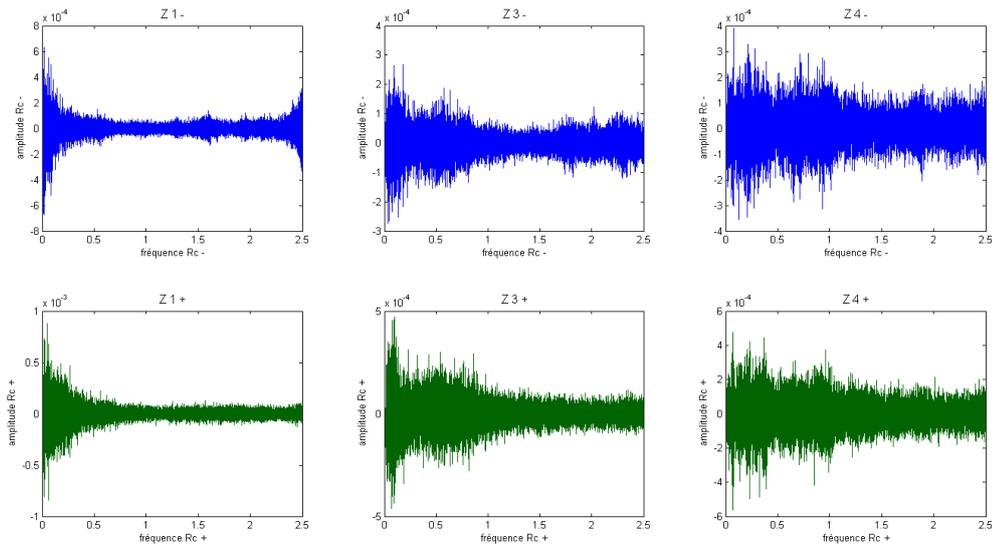


Figure III.4 - Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Cuivre-Chrome-Zirconium.
En Bleu- Balai négatif.
En Vert- Balai positif.

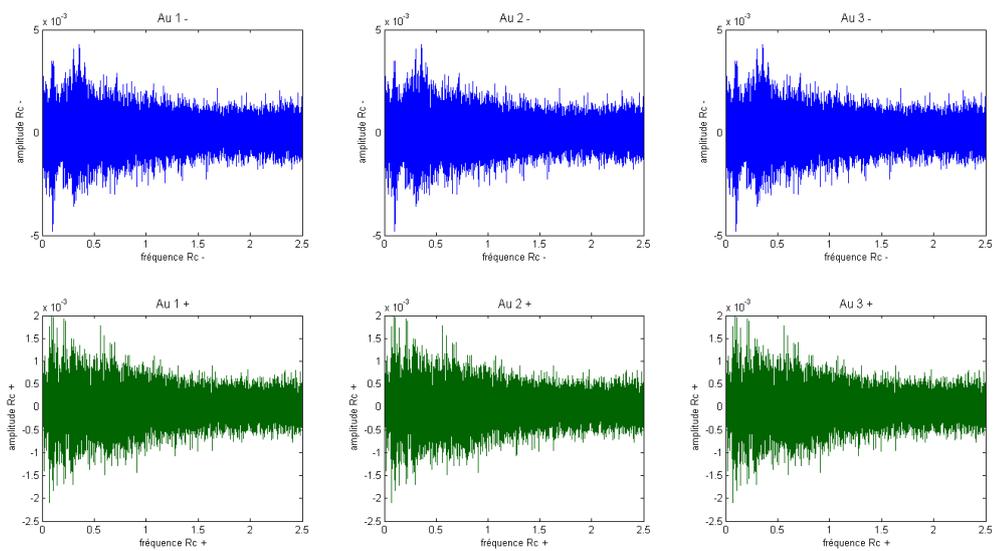


Figure III.5 - Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Cuivre Revêtus d'Or.
En Bleu- Balai négatif.
En Vert- Balai positif.

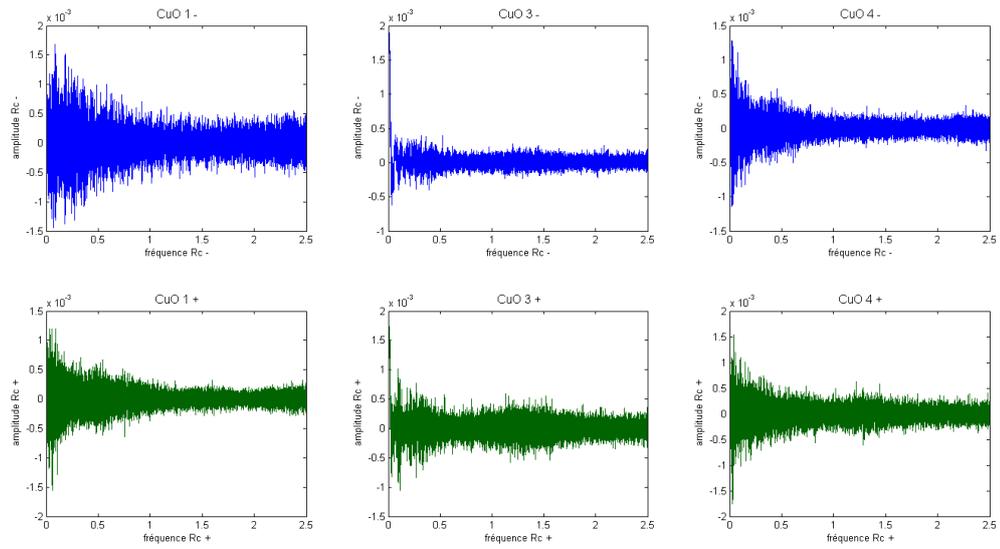


Figure III.6 - Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Cuivre Revêtus de CuO.
En Bleu- Balai négatif.
En Vert- Balai positif.

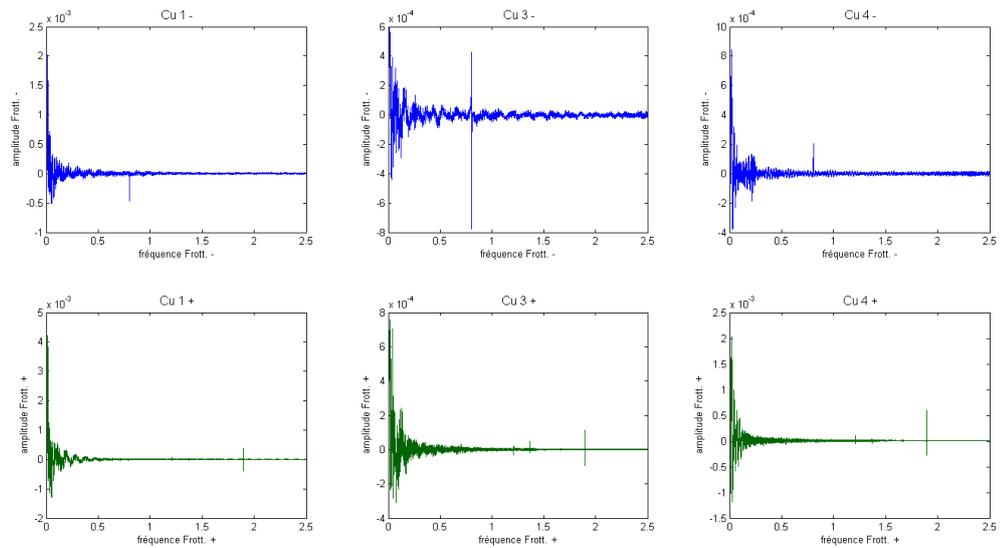


Figure III.7 - Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Cuivre Cw024a.
En Bleu- Balai négatif.
En Vert- Balai positif.

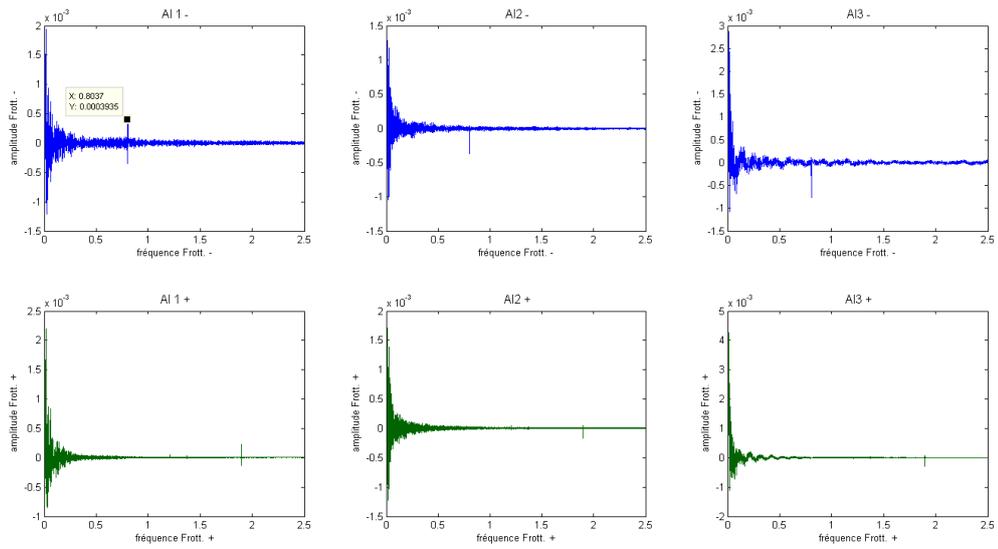


Figure III.8 - Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Aluminium.
En Bleu- Balai négatif.
En Vert- Balai positif.

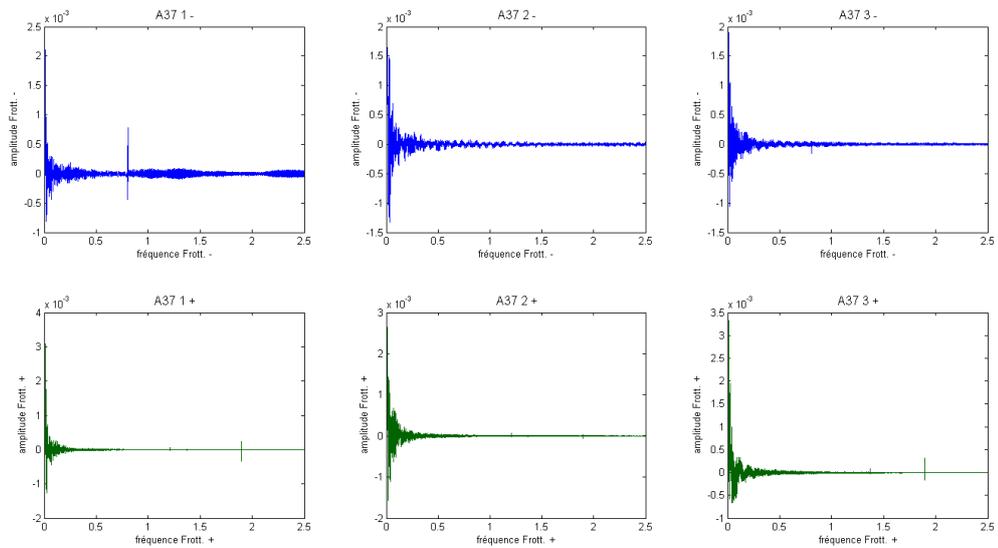


Figure III.9 - Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Acier A37.
En Bleu- Balai négatif.
En Vert- Balai positif.

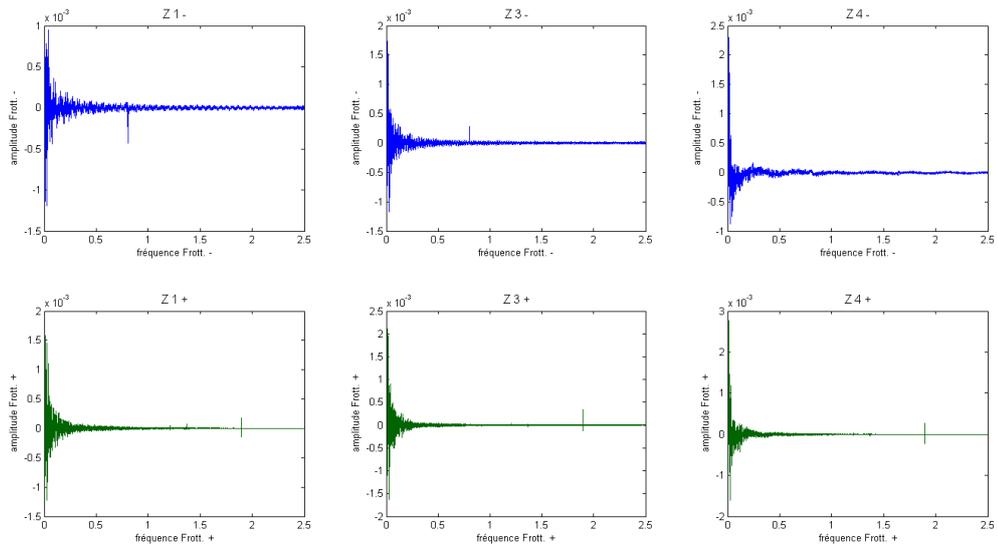


Figure III.10 - Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Cuivre-Chrome-Zirconium.
En Bleu- Balai négatif.
En Vert- Balai positif.

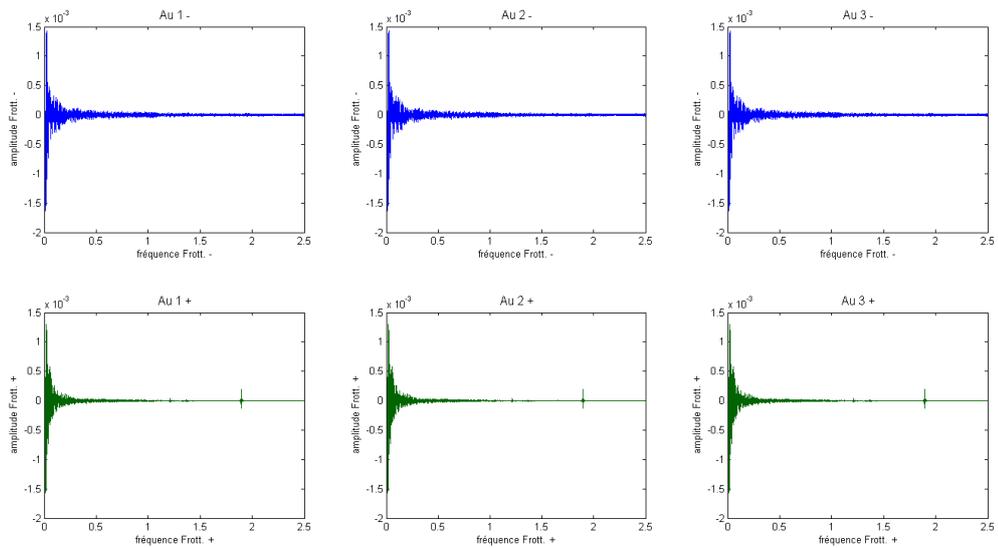


Figure III.11 - Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Cuivre Revêtus d'Or.
En Bleu- Balai négatif.
En Vert- Balai positif.

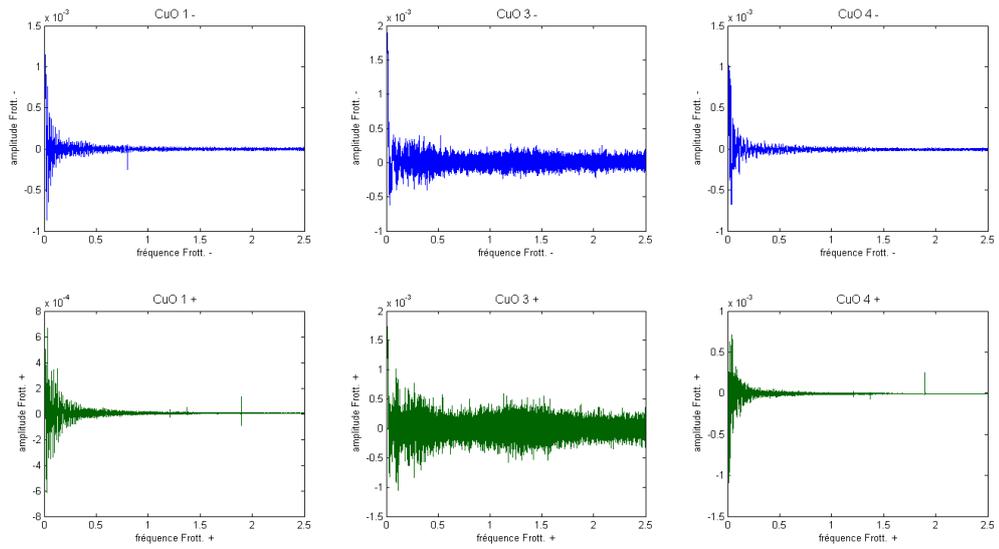


Figure III.12 - Analyse Spectrale des signaux de résistance de contact des disques Cuivre Revêtus de CuO.
En Bleu- Balai négatif.
En Vert- Balai positif.

FROTTEMENT

Annexe E

Réglages du tribomètre

Le choix de la vitesse de rotation du tribomètre a été effectué pour que la vitesse linéaire du balai soit la même pour le tribomètre à sa vitesse de rotation ω_d que pour le contact balai-bague lorsque l'essai est réalisé sur l'alternateur à sa vitesse de rotation $\omega_r = 3000$ tr/min, vitesse dont on sait qu'elle est suffisante pour voir apparaître les variations de résistance de contact et vitesse qui est utilisée pour les essais réalisés sur alternateur complet.

Nous appellerons v_{b-r} , v_{b-d} respectivement la vitesse de glissement du contact balai-rotor, balai-disque, en m/s. On impose $v_{b-r} = v_{b-d}$

$$v_{b-r} = \omega_r d_{bague} \pi = 2,34 \text{ m/s} \quad (\text{E.1})$$

$$v_{b-d} = \omega_d d_{piste} \pi \quad (\text{E.2})$$

$$\Rightarrow \omega_d = \frac{v_{b-r}}{d_{piste} \pi} \quad (\text{E.3})$$

Nous devons choisir quelle est la référence que nous choisissons pour déterminer la vitesse de rotation ω_d . En effet, comme les pistes positive et négative sont concentriques, à vitesse de rotation donnée la vitesse linéaire de chacun des deux balais ne sera pas égale, bien que proche. Un essai réalisé dans la campagne permettra cependant de valider la symétrie du montage en cas d'inversion de polarité du système. La table suivante III.1 présente les mesures de positionnement de chacune des pistes sur le disque lors d'un essai préalable et leur diamètre moyen associé.

| bague VALEO | | | |
|----------------|---------------|---------------|-------------|
| polarité piste | diamètre int. | diamètre ext. | diam. moyen |
| + | 14,3 mm | / | 14,3 mm |
| - | 14,3 mm | / | 14,3 mm |

| disque LISMA | | | |
|--------------|---------------|---------------|-------------|
| polarité | diamètre int. | diamètre ext. | diam. moyen |
| + | 55,6 mm | 64,9 mm | 60,25 mm |
| - | 66,4 mm | 75,7 mm | 71,05 mm |

Table III.1 - Relevés de diamètre des pistes.

La vitesse linéaire balai-rotor est $v_{b-r} = 2,25 \text{ m/s}$ à 3000 tr/min. On prend comme référence la vitesse du balai positif, placé en piste extérieure.

Nous retiendrons donc comme vitesse de rotation du tribomètre :

$$\omega_d = 63,3 \text{ rd/s} = 605 \text{ tr/min} \quad (\text{E.4})$$