



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



N° d'Ordre :76/Doct/2020
Série :02/GM /2020

THESE

Présentée pour obtenir le diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : GENIE MECANIQUE

Option : MECANIQUE APPLIQUEE EN ENGINEERING

Par :

BENFOUGHAL Abdeldjalil

THEME

**ETUDE COMPARATIVE DU COMPORTEMENT TRIBOTHERMIQUE
DES CONTACTS ELECTRODYNAMIQUE SECS CUIVRE-GRAPHITE
ET GRAPHITE- GRAPHITE**

Soutenue le : 19/11/ 2020

Devant le Jury :

Président :	B. Necib	Prof. Université des Frères Mentouri, Constantine
Rapporteur :	A. Bouchoucha	Prof. Université des Frères Mentouri, Constantine
Examineurs :	S. Chekroud	Prof. Ecole Nationale Polytechnique, Constantine
	Y. Mouadji	MCA. Ecole Nationale Polytechnique, Constantine
	A. Chorfia	MCA. Université des Frères Mentouri, Constantine

Résumé

Titre de la thèse:

Etude comparative du comportement tribothermique des contacts électrodynamique secs
Cuivre-Graphite et Graphite- Graphite

Résumé

Notre travail s'intéresse à l'étude comparative du comportement tribologique et thermique des contacts glissants sec des couples cuivre-graphite et graphite-graphite avec et sans passage du courant électrique. Dans ce but, une série des essais expérimentaux ont été effectués sur plusieurs échantillons à l'aide d'un tribomètre de type pion-disque sur lequel, on a monté un dispositif pour assurer le passage du courant électrique.

Des techniques de caractérisations ont été utilisées pour analyser les changements de la chimie des surfaces et de la topographie des tribo-contacts. Ces analyses indiquent que le courant électrique, la charge normale, la vitesse de glissement et la nature du matériau ont une influence plus ou moins importante sur le comportement tribologique des couples de matériaux et sur l'effet de la couche d'oxyde créée à l'interface des antagonistes.

La modélisation analytique (Archard) et numérique (COMSOL Multiphysics) sont présentes dans cette étude pour calculer le coefficient de frottement et la température de contact, et de les comparer avec les résultats expérimentaux obtenus. Une bonne concordance a été enregistrée.

Mots clés: Frottement, usure, température de contact, charge normale, vitesse de glissement, courant électrique, cuivre-graphite, graphite-graphite, film d'oxyde.

Abstract

Title of the thesis:

Comparative study of the tribothermal behavior of dry electrodynamic contacts Copper-Graphite and Graphite-Graphite

Abstract

Our work focuses on the comparative study of tribological and thermal behavior of dry sliding contacts for copper-graphite and graphite-graphite pairs with and without electrical current. For this purpose, a series of experimental tests were carried out on several samples using a pin-disc tribometer on which will be mounted a device to ensure the passage of electric current.

Characterisation techniques were used to analyze changes in the surface chemistry and topography of tribo-contacts. these analyzes indicate that the electric current, the normal load, the sliding speed and the nature of the material have a more or less important influence on the tribological behavior of the materials pair and on the effect of the oxide layer created in the interface of the antagonists.

Analytical (Archard) and numerical (COMSOL Multiphysics) modelling are present in this study to calculate the friction coefficient and contact temperature, and to compare them with the experimental results obtained. A good concordance was recorded.

Key words: Friction, wear, contact temperature, normal load, sliding speed, electrical current, copper-graphite, graphite-graphite, oxide film.

المخلص

عنوان الأطروحة :

دراسة مقارنة السلوك التريبوحراري للتلامس الإلكتروديناميكي الجاف نحاس - جرافيت و جرافيت - جرافيت

المخلص

يرتكز عملنا على دراسة مقارنة السلوك التريبولوجي والحراري لحركة الانزلاق الجاف للأزواج نحاس- جرافيت وجرافيت- جرافيت من دون وبمرور التيار الكهربائي. لهذا الغرض، أجرينا سلسلة من الاختبارات التجريبية على عدة عينات باستخدام التريبومتر أصبع- قرص حيث قمنا بتركيب جهاز عليها لضمان مرور التيار الكهربائي.

تم استخدام تقنيات التوصيف لتحليل التغيرات في كيمياء وطوبوغرافيا السطوح في مكان التلامس. تشير هذه التحليلات إلى أن التيار الكهربائي، القوة الناظمية، سرعة الانزلاق وطبيعة المادة لها تأثير مهم أو أقل أهمية على السلوك التريبولوجي لأزواج المواد وعلى تأثير طبقة الأكسيد التي تم إنشاؤها في السطح البيئي.

الدراسة التحليلية (نموذج آرشار) والرقمية (كومسول ميلتيفيزكس) موجودة في هذه الدراسة لحساب معامل الاحتكاك النظري ودرجة حرارة التلامس، ولمقارنتها بالنتائج التجريبية التي تم الحصول عليها. تم تسجيل توافق جيد.

الكلمات الرئيسية : الاحتكاك ، التآكل ، درجة حرارة التلامس ، القوة الناظمية ، سرعة الانزلاق ، التيار الكهربائي ، نحاس - جرافيت ، جرافيت - جرافيت ، طبقة الأكسيد.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à:

*Mon père et ma mère qui par leur dévouement et leur affection ont été pour
moi un soutiens tout au long de mes études et ma vie;*

ma femme;

Mes fils Abdelmouiz et Tadj eddine;

Mon frère et mes sœurs

Tous mes amis

REMERCIEMENTS

Je voudrai en premier lieu remercier chaleureusement mon directeur de thèse de Doctorat Monsieur BOUCHOUCHA Ali, Professeur de l'Université des Frères Mentouri Constantine, pour avoir accepté de diriger ce travail.

Je remercie aussi Monsieur NECIB Brahim, Professeur de l'Université des Frères Mentouri, Constantine de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce travail.

Je tiens aussi à remercier les autres membres de jury Messieurs S. Chekroud, Professeur de l'Ecole Nationale Polytechnique, Constantine, Y. Mouadji, MCA de l'Ecole Nationale Polytechnique, Constantine et A. Chorfia, MCA de l'Université des Frères Mentouri, Constantine d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Enfin, je tiens à remercier vivement tous les membres du Laboratoire de Mécanique du Département de Génie Mécanique de l'Université des Frères Mentouri.

Sommaire

INTRODUCTION.....	1
Nomenclature.....	3

CHAPITRE I

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE CONTACT DES SURFACES SOLIDES

I. 1. Introduction.....	5
I. 2. Structure D'un Système Tribologique.....	5
I. 3. Rappels élémentaires sur la géométrie de contact.....	6
I. 3. 1. Surface d'un solide.....	6
I. 3. 2. Surface de contact.....	7
I. 3. 3. La mécanique de contact.....	9
I. 3. 4. Contact de Hertz.....	10
I. 3. 5. Contact plastique.....	12
I. 3. 5. 1. Critère de plasticité.....	13
I. 3. 5. 1. 1. Critère de Tresca	13
I. 3. 5. 1. 2. Critère de Von Mises.....	13
I. 4. Les phénomènes de la tribologie.....	13
I. 4. 1. Le frottement.....	14
I. 4. 1. 1. Modèles du frottement.....	15
I. 4. 1. 1. 1. Modèle classique.....	15
I. 4. 1. 1. 2. Modèle de Bowden et Tabor.....	16
I. 4. 1. 2. Aspects thermiques des interfaces glissantes.....	18
I. 4. 1. 2. 1. modèle thermique.....	19
I. 4. 1. 3. Les mécanismes de génération de chaleur au cours du frottement.....	20
I. 4. 1. 3. 1. Génération de chaleur au niveau des contacts.....	21
I. 4. 1. 3. 2. La génération de chaleur dans le volume interstitiel.....	21
I. 4. 2. L'usure.....	21
I. 4. 2. 1 Phases de l'usure.....	22
I. 4. 2. 2. Les principaux modes d'usure.....	23
I. 4. 2. 2. 1. Abrasion.....	23
I. 4. 2. 2. 2. Erosion.....	24
I. 4. 2. 2. 3. Adhésion.....	24

I. 4. 2. 2. 4. Corrosion.....	25
I. 4. 2. 2. 5. Par fatigue.....	25
I. 4. 2. 2. 6. Par oxydation.....	25
I. 4. 2. 3. Modélisation d'usure.....	26
I. 4. 2. 3. 1. Usure abrasive.....	26
I. 4. 2. 3. 2. Usure adhésive.....	27
I. 4. 2. 4. L'usure d'un point de vue énergétique.....	28
I. 5. Contact électrique des surfaces solides.....	29
I. 5. 1. Contact stationnaire.....	29
I. 5. 2. Contact dynamique.....	30
I. 5. 3. Résistance électrique de contact.....	30
I. 5. 4. Effet du courant électrique dans un contact dynamique.....	32
I. 5. 4. 1. Le frottement et l'usure.....	32
I. 5. 4. 2. Evolution de la température.....	34
I. 6. Processus d'oxydation des métaux.....	34
I. 6. 1. Graphite.....	35
I. 6. 2. Cuivre.....	36
I. 7. Conclusion.....	38

CHAPITRE II

DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET TECHNIQUE DE CARACTERISATION

II.1. Introduction.....	45
II.2. Dispositif expérimental.....	45
II.2.1. Tribomètre.....	45
II. 2. 1. 1. Erreur du tribomètre.....	47
II.2.2. passage du courant électrique.....	48
II.3. Techniques de mesure.....	49
II.3.1. Charge normale.....	49
II.3.2 Vitesse de glissement.....	50
II.3.3. Coefficient de frottement.....	50
II.3.4. Usure du pion.....	50
II.3.5. Température de contact.....	51
II.4. Matériaux utilisés.....	51

II.4.1. Disque.....	51
II.4.2. Pion.....	51
II.5. Techniques de caractérisation.....	53
II.5.1. Microscope optique.....	54
II.5.2. Microscope Electronique à Balayage (MEB + EDS).....	54
II.6. Conditions d'essais.....	55
II. 7. Conclusion.....	56

CHAPITRE III

ETUDE THERMOMECHANIQUE DES COUPLES TRIBOLOGIQUES SANS PASSAGE DU COURANT ELECTRIQUE

III.1. Introduction.....	58
III. 2. Résultats expérimentaux.....	58
III. 2. 1. Evolution du coefficient de frottement.....	58
III. 2. 1. 1. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps d'essai.....	58
III. 2. 1. 2. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps pour différentes charges normales.....	59
III. 2. 1. 3. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps pour différentes vitesses de glissement.....	62
III. 2. 1. 4. Modélisation du coefficient de frottement.....	64
III. 2. 2. Evolution du taux d'usure.....	67
III. 2. 2. 1. Evolution de l'usure en fonction de la charge appliquée.....	67
III. 2. 2. 2. Evolution de l'usure en fonction de la vitesse de glissement.....	68
III. 2. 3. Evolution de la température de contact à l'interface.....	69
III. 2. 3. 1. Evolution de la température de contact en fonction du temps d'essai.....	69
III. 2. 3. 2. Evolution de la température de contact en fonction du temps pour différentes charges appliquées et vitesse de glissement.....	70
III. 2. 3. 3. Evolution de la température de contact en fonction de la charge appliquée et la vitesse de glissement.....	72
III. 2. 4. Evolution de l'énergie dissipée au niveau du contact.....	74
III. 2. 4. 1. Evolution de l'énergie dissipée en fonction de la charge appliquée.....	74
III. 2. 4. 2. Evolution de l'énergie dissipée en fonction de la vitesse de glissement....	74
III. 3. Calcul théorique de la température de contact d'après la théorie d'archard.....	75

III. 3. 1. Pour le couple cuivre-graphite en fonction de la charge appliquée.....	75
III. 3. 2. Pour le couple graphite-graphite en fonction de la charge appliquée.....	76
III. 3. 3. Pour le couple cuivre-graphite en fonction de la vitesse de glissement.....	77
III. 3. 4. Pour le couple graphite-graphite en fonction de la vitesse de glissement.....	78
III. 4. Modélisation numérique de la température de contact.....	79
III. 4. 1. Maillage.....	79
III. 4. 2. Influence des paramètres mécaniques sur la température de contact (numérique).....	80
III. 4. 2. 1 Cartographie surfacique pour différentes charge normale.....	80
III. 4. 2. 2. Comparaison entre les températures de contact numérique et expérimentale.....	85
III. 5. Discussion.....	87
III. 5. 1. Effet de la charge appliquée sur le frottement et l'usure.....	87
III. 5. 2. Effet de la vitesse de glissement sur le frottement et l'usure.....	89
III. 5. 3. Effet de la charge appliquée et la vitesse de glissement sur la température de contact.....	91
III. 6. Conclusion.....	93

CHAPITRE IV

EFFET DU COURANT ELECTRIQUE SUR LE COMPORTEMENT THERMOTRIBOLOGIQUE DANS UN CONTACT DYNAMIQUE SEC

IV. 1. Introduction.....	96
IV. 2. Résultats expérimentaux.....	96
IV. 2. 1. Evolution du coefficient de frottement.....	96
IV. 2. 1. 1. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps d'essai.....	96
IV. 2. 1. 2. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps pour différentes charges normales.....	97
IV. 2. 1. 3. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la charge appliquée.....	99
IV. 2. 1. 4. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps pour différentes intensités de courant électrique.....	99
IV. 2. 1. 5. Evolution du coefficient de frottement en fonction du courant électrique	101
IV. 2. 2. Evolution du taux d'usure.....	101

IV. 2. 2. 1. Evolution de l'usure en fonction de la charge appliquée.....	101
IV. 2. 2. 2. Evolution de l'usure en fonction du courant électrique.....	102
IV. 2. 3. Evolution de la température de contact à l'interface.....	103
IV. 2. 3. 1. Evolution de la température de contact en fonction du temps d'essai.....	103
IV. 2. 3. 2. Evolution de la température de contact en fonction du temps pour différentes charges appliquées et courants électriques.....	104
IV. 2. 3. 3. Evolution de la température de contact en fonction de la charge appliquée et le courant électrique.....	107
IV. 3. Discussion.....	108
IV. 3. 1. Effet du courant électrique sur le comportement en frottement.....	108
IV. 3. 2. Effet du courant électrique sur le comportement en usure.....	110
IV. 3. 3. Effet du courant électrique sur la température de contact.....	119
IV. 4. Conclusion.....	122
CONCLUSION GENERALE.....	127

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le frottement est l'un des problèmes les plus anciens et les plus importants rencontrés dans les applications d'ingénierie. C'est un processus très complexe lié aux facteurs mécaniques, thermiques, physico-chimiques et métallurgiques. Ce phénomène devient une source de chaleur qui provoque une élévation locale de la température à l'interface des deux matériaux en contact. La dissipation d'énergie mécanique à l'interface due au frottement qui devient une source de chaleur est proportionnelle à la charge appliquée et la vitesse de glissement des antagonistes.

Les surfaces antagonistes sont détériorées par frottement. Cette détérioration peut prendre plusieurs formes, telles que la déformation plastique, la fatigue des contacts et l'usure à l'interface.

Dans le cas d'un contact électrique glissant, il existe plusieurs sources de dissipation thermique telles que : la dissipation due au frottement mécanique, la dissipation due à l'effet Joule et dans certaines conditions la dissipation due à l'effet de l'arc électrique. Cette dissipation est capable d'affecter les propriétés des matériaux et les caractéristiques interfaciales des éléments et de modifier, dans certaines situations, leur structure de surface.

Le couple cuivre-graphite est une combinaison importante de matériaux tribologiques utilisés dans les applications de contact électrique glissant telles que les moteurs électriques et générateurs. Durant le fonctionnement, des balais en graphite s'usent et écourtent la durée de vie du couple. L'usure de ces derniers augmente avec le temps, ceci engendre des phénomènes d'arcs électriques. Ce phénomène détériore les éléments du couple.

Le comportement en frottement régit principalement les propriétés des surfaces des composants afin d'améliorer leur résistance à l'usure et à la corrosion, et donc de réduire le frottement. Plusieurs modèles ont été développés pour expliquer ce comportement. Un certain nombre de recherches montrent que le comportement en frottement et en usure dépend largement de la charge normale, la vitesse de glissement, le courant électrique, le type de matériaux, la géométrie, l'humidité, la lubrification et les vibrations. Plusieurs études confirment que le passage du courant électrique réduit le coefficient de frottement des contacts glissants. Cette diminution a été attribuée à une couche lubrifiante formée sur les surfaces de contact par effet Joule.

La tribologie est la science qui s'intéresse aux phénomènes susceptibles produire entre des pièces en contact, immobiles ou en mouvement relatifs. Elle regroupe la lubrification, le frottement et l'usure des éléments. Elle a été subdivisée en deux grands domaines : les contacts lubrifiés par un fluide et les contacts dits secs pour lesquels le lubrifiant est soit un lubrifiant solide, soit un revêtement ou un traitement de surface.

L'objectif de ce travail est d'étudier expérimentalement, et à sec, l'influence des paramètres mécaniques et électriques sur le comportement tribologique et thermique des couples de matériau glissant cuivre-graphite et graphite-graphite. La conséquence de ces paramètres sur le comportement en frottement et en usure ont été mises en évidence, notamment, la contribution d'un film d'oxyde créé à l'interface de contact à cause de passage du courant électrique. La confrontation des résultats par un modèle théorique et numérique est présente. Des observations microscopiques et des analyses de la surface frottante ont permis de mettre en évidence ce rôle.

De ce fait, le contenu de la thèse est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre, une étude bibliographique a été faite sur la structure d'un système tribologique, les phénomènes de la tribologie et l'effet du courant électrique dans un contact dynamique sec.

Le deuxième chapitre présente le montage et la démarche du dispositif expérimental, les techniques de mesure des paramètres expérimentaux, les caractéristiques des matériaux utilisés et les techniques de caractérisations des surfaces usés.

Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus du coefficient de frottement, de l'usure et de la température de contact sans passage du courant électrique. Une comparaison a été faite entre les deux couples de matériaux cuivre-graphite et graphite-graphite et une confrontation des résultats obtenus avec ce qui donne le calcul théorique et numérique. Ainsi que une discussion des résultats.

Enfin, le quatrième chapitre regroupe les résultats expérimentaux obtenus sur le frottement, l'usure et la température de contact où l'interface des surfaces frottantes est traversée par un courant électrique continu. Les changements dans la chimie de surface et la topographie des tribo-surface ont été caractérisé en utilisant la Microscopie Electronique à Balayage (MEB) avec une Spectroscopie à Dispersion d'Energie intégré (EDS).

NOMENCLATURE

A : aire apparente de contact [m^2]

a : rayon de contact [m]

E : module de Young [N/m^2]

P_0 : pression maximale [N/m^2]

P_n : pression nominale [N/m^2]

δ : pénétration de l'indenteur [m]

R : rayon de l'indenteur [m]

P : charge normale [N]

β : mesurant la différence des propriétés élastiques entre les deux solides

G : module élastique de cisaillement [N/m^2]

μ : coefficient de frottement

ν : coefficient de Poisson

σ_x : contrainte normale dans le direction normale x [MPa]

σ_y : contrainte normale dans le direction normale y [MPa]

σ_z : contrainte normale dans le direction normale z [MPa]

τ_{xy} : contrainte tangentielle [MPa]

σ_e : contrainte équivalente [MPa]

τ : Contrainte de cisaillement [N/m^2]

τ_{max} : contrainte maximale de cisaillement [MPa]

F : force tangentielle [N]

A_a : aire apparente de contact [m^2]

A_r : aire réelle de contact [m^2]

V : la vitesse linéaire de glissement [m/s]

t : le temps de contact [s]

h : profondeur de pénétration [m]

U : volume usé [m³]

R_c : résistance électrique de contact [Ω]

V_c : différence de potentiel de contact [V]

I : intensité du courant électrique [A]

σ : résistivité électrique [Ωm]

m_i : masse initiale de l'échantillon [mg]

m_f : masse finale de l'échantillon [mg]

Δm : perte de masse [mg]

$F_{\text{affichée}}$: Force tangentielle donné par le capteur piézo-électrique [N]

ρ : masse volumique [kg/m³]

K : conductivité thermique [w/m.K]

C_p : chaleur spécifique [J/Kg.K]

H : dureté du matériau [N/m²]

k : coefficient d'usure

CHAPITRE I :
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR
LE CONTACT DES SURFACES
SOLIDES

I. 1. Introduction

La tribologie est la science et la technologie des surfaces en interaction dans un mouvement relatif. L'application de la tribologie en ingénierie est utilisée pour étudier : le frottement qui est la résistance à un déplacement imposé, l'usure suite à la dégradation des surfaces qui se traduit par une perte de matière et la lubrification qui consiste à interposer un fluide entre les antagonistes. C'est une science pluridisciplinaire faisant intervenir des notions de mécanique, de physicochimie et de la science des matériaux en général.

La tribologie s'appuyait au départ sur l'étude des volumes des matériaux avec une domination des concepts de la mécanique permettant d'établir des lois de comportement. Ensuite, en passant vers l'étude des surfaces grâce aux concepts de la physique des surfaces. Après tout, la recherche en tribologie porte sur l'étude de la dynamique des interfaces.

Dans ce chapitre, on présente les principaux éléments d'un système tribologique nécessaires pour étudier un contact dynamique sec dans des conditions de travail atmosphérique et le processus d'oxydation des deux matériaux utilisés.

I. 2. Structure D'un Système Tribologique

Un système tribologique se définit comme un système mécanique, formé de deux solides en contact dynamique sec ou lubrifié. Ces deux corps évoluent dans un milieu ambiant et peuvent être séparés par un film intermédiaire nommé troisième corps [1]. Les éléments d'un système tribologique sont : Le corps 1, le corps 2, l'interface et l'environnement ambiant (Fig. I. 1).

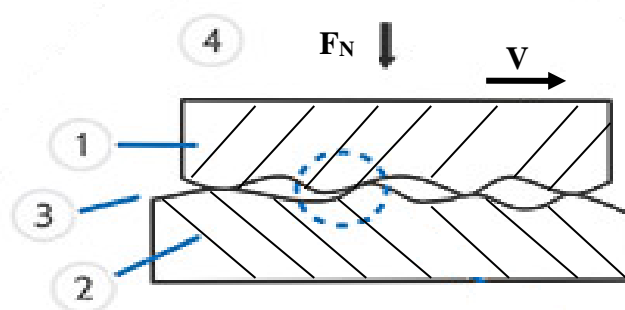


Figure I. 1. Système tribologique (1) corps 1, (2) corps 2, (3) interface, (4) environnement ambiant.

I. 3. Rappels sur la géométrie de contact

I. 3. 1. Surface d'un solide

La surface d'un corps ou un solide est le lieu d'un nombre infini des points séparant ce corps du milieu environnant, représente une petite couche d'épaisseur comprise entre 10^{-2} et 10^{-6} mm. Les propriétés mécaniques et la composition chimique de cette zone peuvent être différentes de celles du cœur du matériau. La surface peut être recouverte par un film contaminant, d'oxydes et écrouie dans le cas des métaux.

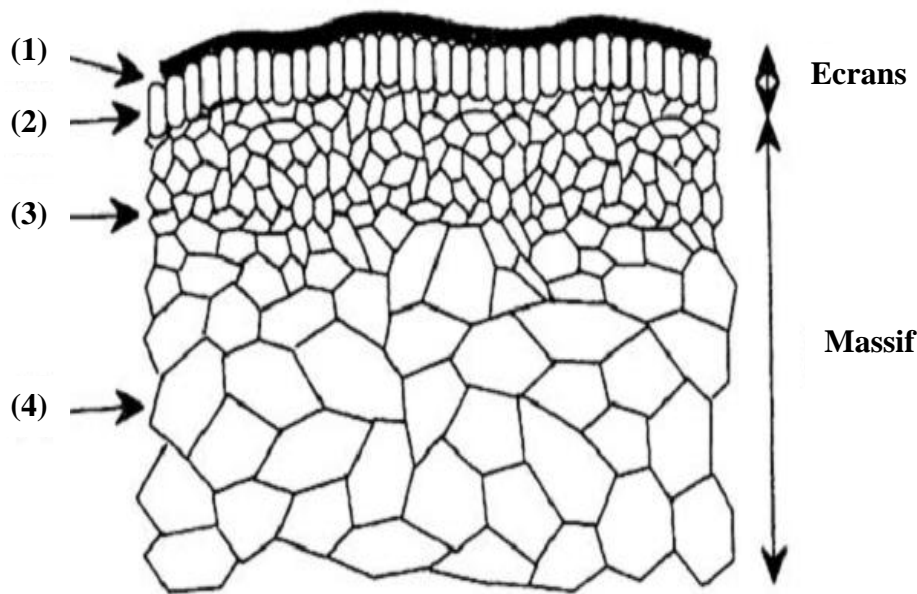


Figure I. 2. Vue théorique en coupe d'un solide [1], (1) film de contamination, (2) film d'oxyde, (3) zone mécaniquement perturbée, (4) matériau massif.

Ces couches ne sont pas un handicap mais constitue généralement une protection pour le solide (meilleure résistance mécanique, meilleure tenue à la corrosion). Un exemple typique est l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3 ou alumine) qui se forme naturellement sur l'aluminium. Cette couche de quelques nanomètres (Fig. I. 3) suffit à protéger l'aluminium contre la corrosion. Il est courant d'augmenter son épaisseur par un procédé d'anodisation.

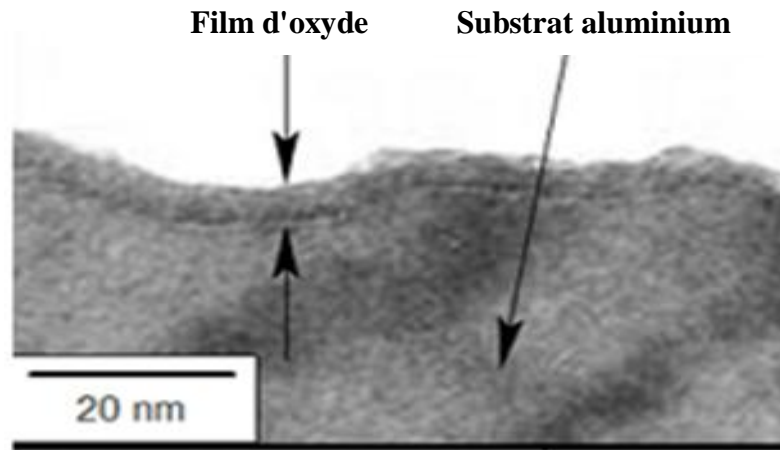


Figure I. 3. Couche d'alumine en surface d'un échantillon d'aluminium.

Lorsque deux corps sont en contact dynamique direct, les surfaces frottantes ne peuvent pas jouer des rôles symétriques. Par exemple, dans le cas d'un pion glissant sur un disque, un point de la surface de contact du pion est toujours sollicité, alors qu'un point de la piste du disque ne l'est qu'au passage du pion.

I. 3. 2. Surface de contact

Lors de l'application d'une charge normale P , les surfaces de contact réelles ne sont pas parfaitement lisses en raison de leurs irrégularités surfaciques. Donc, le contact est établi au niveau de ces irrégularités appelées aspérités. Il n'y a aucun contact physique que si ces aspérités se touchent. Se forme alors des jonctions soudées. Donc, la somme de ces jonctions contribue à la formation de la surface réelle de contact A_r [2]. Pas plus de trois points qui sont en contact direct pour des surfaces (jonctions) infiniment dures [3].

Cependant, la surface partielle pour des matériaux déformables est augmentée avec l'augmentation de la charge normale appliquée P , et par conséquent, des nouveaux points de contacts sont créés. Le rapport A_r/A est toujours changé selon la nature et les propriétés des matériaux, et demeure faible quelle que soit la charge d'appui unitaire effective appliquée [4].

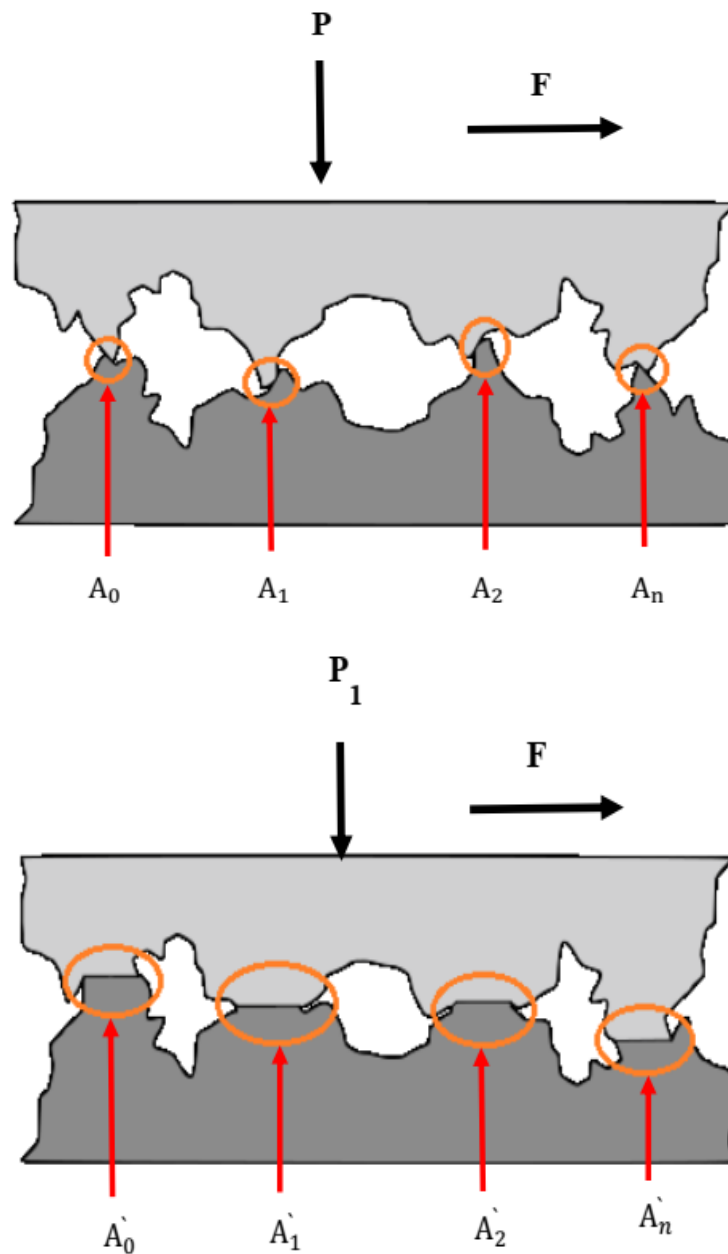


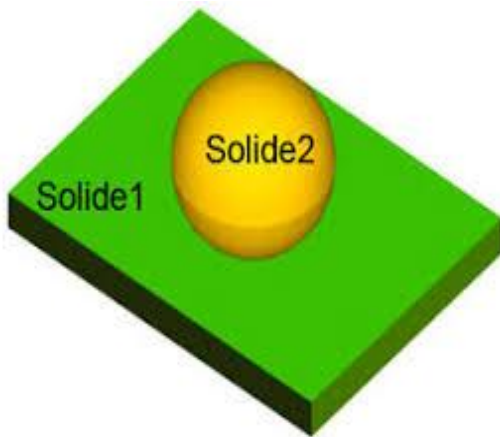
Figure I. 4. Illustration schématique d'une augmentation de la surface de contact.

Lorsqu'il s'agit d'un contact dynamique (Fig. I. 4), les jonctions sont soumises à des contraintes normales et tangentielles très élevées à cause de la force de frottement et à des variations de températures micro-localisées [5].

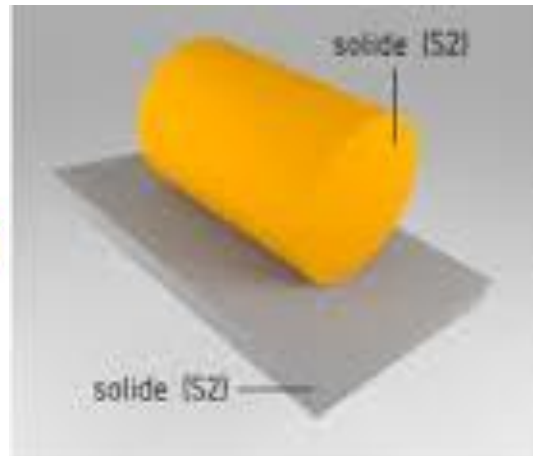
Il s'agit de définir la nature et la géométrie du contact. Ces informations participent en particulier à l'évaluation du champ de contrainte imposé au contact. Le contact entre deux solides peut être selon la géométrie des corps (Fig. I. 5) :

- contact de type ponctuel (sphère/sphère, sphère/plan) ;

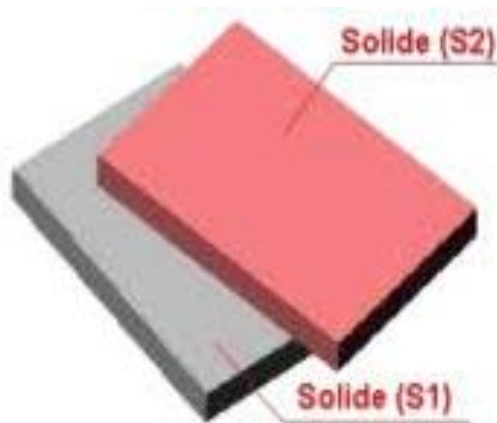
- contact de type linéaire (cylindre/plan, cylindre/cylindre.....) ;
- contact de type surfacique (plan/plan).



Contact ponctuel



Contact linéaire



Contact surfacique

Figure I. 5. Modes de contacts.

I. 3. 3. La mécanique de contact

Les sollicitations imposées aux premier corps par le mécanisme conduisent à des champs de contraintes, des déformations et des températures à la surface du deuxième corps. Pour que le problème de l'antinomie entre le haut niveau de résistance mécanique exigé par le volume des corps (1) et (2) et leur faible résistance au cisaillement dans la zone du contact, soit résolu la présence d'un troisième corps, est nécessaire pour servir le siège aux déformations imposées par les vitesses relatives des corps (1) et (2) [6].

Du point de vue mécanique, le passage du premier corps au troisième corps sera caractérisé par la continuité des déformations dans le cas de l'adhérence, et par celle des contraintes tangentielles dans le cas du frottement, l'équilibre mécanique impose à son tour la continuité des contraintes normales qui donne une dissipation d'énergie dans le troisième corps, celle-ci induit une augmentation de température dans les trois corps en contact. La répartition de la température de contact varie d'un corps à l'autre suivant les propriétés thermiques et la vitesse de glissement des surfaces en contact. Concernant les pressions exercées sur les surfaces, elles se situent dans une large fourchette allant de quelques centaines de KPa à quelques GPa, [6] et sont suffisantes pour conduire au démarrage et à la diffusion de fissures dans les corps (1) et (2), qui aboutissent à des détachements des particules alimentant le troisième corps dans certains cas de frottement sec.

I. 3. 4. Contact de Hertz

La théorie hertzienne des contacts est une théorie classique de la mécanique des contacts et constitue un outil très utile pour les ingénieurs et les chercheurs [7]. Bien que la dérivation de la théorie soit relativement difficile, la solution finale consiste en un ensemble d'équations analytiques simples reliant les propriétés du système aux contraintes développées. La théorie de Hertz a également été appliquée avec succès pour obtenir une première solution analytique de la théorie de la lubrification élastohydrodynamique (cette solution est connue sous le nom de solution de Grubin).

Lorsqu'on presse deux sphères sous l'effet d'un chargement ou un effort normal, on constate que l'aire de contact est un cercle (Fig. I. 6). On considère que le contact sphère-plan à pression normale est utilisé.

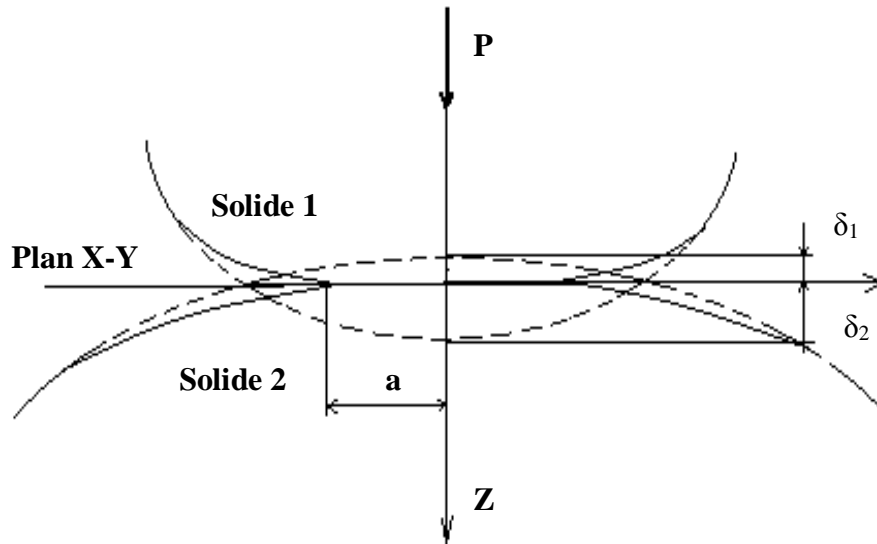


Figure I. 6. Contact d'Hertz.

Selon la loi d'Hertz [7], le rayon de contact est calculé à partir de la relation suivante :

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

Avec E^* est défini par l'expression :

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

La pression maximale est :

$$P_0 = \left(\frac{6PE^{*2}}{\pi^3 R^2} \right)^{1/3} \quad (I.3)$$

La pénétration de l'indenteur δ

$$\delta = \frac{a^2}{R} \left(\frac{9P^2}{16RE^{*2}} \right)^{1/3} \quad (I.4)$$

Il existe une interaction quand les constantes d'élasticité sont différentes. On peut négliger celui-ci pour pouvoir superposer l'effet de la pression normale et celle de la force tangentielle associée au glissement. L'influence des caractéristiques mécaniques d'un contact sphère-plan peut être estimée à l'aide de la variable γ [8] et du paramètre β mesurant la différence des propriétés mécaniques entre les deux solides [9].

$$\beta = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\frac{(1-2\nu_1)}{G_1} - \frac{(1-2\nu_2)}{G_2}}{\frac{(1-2\nu_1)}{G_1} + \frac{(1-2\nu_2)}{G_2}} \right\} \text{ avec } G = \frac{E}{(1+\nu)} \quad (I.5)$$

On a :

$$\gamma = \frac{\beta\mu}{\pi} \quad (\text{I.6})$$

Pour obtenir les équations des contraintes normales (σ_{xx} , σ_{yy} et σ_{zz}) et la contrainte tangentielle (τ_{xz}), et après des simplifications introduites précédemment, on utilise la formule donnée par Mc Ewen [10]

$$\sigma_{xx} = \frac{-2P}{\pi a^2} \left[m - 2z + 2\mu(x - n) + m \frac{z^2 - m^2}{m^2 + n^2} + \mu n \frac{x^2 - n^2}{m^2 + n^2} \right] \quad (\text{I.7})$$

$$\sigma_{yy} = \frac{-2P}{\pi a^2} [m - z + \mu(x - n)] \quad (\text{I.8})$$

$$\sigma_{zz} = \frac{-2P}{\pi a^2} \left[m - m \frac{z^2 - n^2}{m^2 + n^2} + \mu n \frac{z^2 - m^2}{m^2 + n^2} \right] \quad (\text{I.9})$$

$$\tau_{xz} = \frac{-2P}{\pi a^2} \left[2\mu(m - 2z) + n \frac{z^2 - m^2}{m^2 + n^2} + \mu m \frac{z^2 - n^2}{m^2 + n^2} \right] \quad (\text{I.10})$$

Avec :

$$m = \pm \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ (a^2 - x^2 + z^2) + \sqrt{(a^2 - x^2 + z^2)^2 + 4(xz)^2} \right\}} \quad (\text{I.11})$$

$$n = \pm \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ -(a^2 - x^2 + z^2) + \sqrt{(a^2 - x^2 + z^2)^2 + 4(xz)^2} \right\}} \quad (\text{I.12})$$

I. 3. 5. Contact plastique

La déformation plastique commence après que P_m attire la valeur $1,1 \sigma_e$, et plus la charge augmente, plus la déformation plastique s'agrandisse jusqu'à ce que la surface de contact soit assez grande pour supporter l'effort P [11]. On retient donc que si :

- $P_m \leq 1,1\sigma_e$, le contact est élastique ;

- $P_m > 1,1\sigma_e$, le contact est plastique.

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

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

L'aire de contact est presque égale à P/H et elle augmente avec l'augmentation du P.

I. 3. 5. 1. Critère de plasticité

Un critère de plasticité, ou un critère d'écoulement plastique, est un critère permettant de savoir, sous des sollicitations données, si une pièce se déforme plastiquement ou si elle reste dans le domaine élastique. De nombreux essais ont montrés que l'on pouvait utiliser deux critères principaux : le critère de Tresca-Guest ou le critère de Von Mises. En résistance des matériaux, on désire toujours rester dans le domaine élastique, on parle donc parfois de critère de résistance.

I. 3. 5. 1. 1. Critère de Tresca

Un critère de plasticité, ou un critère d'écoulement plastique, est un critère permettant de savoir, sous des sollicitations données, si une pièce se déforme plastiquement ou si elle reste dans le domaine élastique. De nombreux essais ont montrés que l'on pouvait utiliser deux critères principaux : le critère de Tresca-Guest ou le critère de Von Mises. En résistance des matériaux, on désire toujours rester dans les limites de l'élasticité, on parle donc parfois de critère de résistance.

C'est le critère de la contrainte de cisaillement maximal. Tresca considère que le matériau se plastifie uniquement par cisaillement et la détermination de cette contrainte est définie par la relation suivante :

$$\tau_{max} = \frac{|\sigma_{xx} - \sigma_{zz}|}{2} \quad (I.14)$$

Pour un essai de cisaillement pur, la contrainte du seuil de la plasticité égale la moitié de la contrainte équivalente σ_e :

$$\tau_e = \frac{1}{2} \sigma_e \quad (I.15)$$

I. 3. 5. 1. 2. Critère de Von Mises

La contrainte équivalente de plasticité est exprimée par la formule suivante :

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2}{2}} \quad (I.16)$$

I. 4. Les phénomènes de la tribologie

La tribologie est la science qui étudie les phénomènes susceptibles qui se produisent entre deux systèmes matériels en contact, immobiles ou animés d'un mouvement relatif. Ce

terme recouvre, entre autres, tous les domaines du frottement, de l'usure, de l'étude des interfaces et de la lubrification.

I. 4. 1. Le frottement

Le frottement à sec est un ensemble de phénomènes et de mécanismes qui se produisent en absence de lubrifiant au niveau de l'interface des deux corps de contact direct. La principale cause de frottement entre les matériaux semble être les forces d'attraction, appelées adhérences, entre les zones de contact des surfaces, qui sont toujours irrégulière microscopiques. Le frottement provient du cisaillement de ces jonctions soudées et de l'action des irrégularités de la surface plus dure qui laboure à travers la surface moins dure. En outre, des phénomènes thermiques et physico-chimiques tels que la fusion ou l'oxydation s'active dès la mise en contact des solides [12].

De plus, il est engendré par le déplacement relatif tangentiel de deux surfaces en contact. La résistance tangentielle à l'interface ou la force de frottement est caractérisée par F qui s'oppose au mouvement. On appelle coefficient de frottement, μ , le rapport entre la résistance de frottement F et la charge normale P appliquée entre les deux surfaces en contact.

Plusieurs recherches sont intéressées par la suite à cette théorie, il a été constaté que pour les matériaux ductiles, l'aire réelle de contact s'accroît par la déformation plastique des aspérités.

La résistance au frottement a deux origines principales [6] :

- la présence des aspérités sur les surfaces antagonistes ;
- l'adhérence entre ces surfaces.

L'énergie dissipée par frottement est transformée sous différentes formes d'énergie mises en jeu au cours du contact [13]. Elle permet de mettre en évidence la diversité des réactions ayant lieu au cours du fonctionnement. Plus de 90% de l'énergie mise en jeu est dissipée sous forme de chaleur.

En plus de la dissipation d'énergie au cours du frottement, la préoccupation des mécaniciens est la connaissance de la surface de contact S_C et des contraintes dans les solides en contact.

La première théorie a été proposée par Hertz, pour un contact statique, elle suppose une déformation élastique des solides et, connaissant la force normale au contact, elle permet de calculer la surface de contact et le champ des contraintes dans les solides. Mindlin [14] a été modifié la théorie d'Hertz afin de tenir compte de la vitesse de rotation ou de déplacement dans le cas d'un contact glissant. Johnson et al [15] ont introduit l'effet d'adhérence dans le contact, qui n'est pas négligeable dans le cas des efforts normaux très faibles.

Ces théories proposées permettent de calculer la surface de contact apparente. Cependant, du fait de la présence d'aspérités, suivant les propriétés des matériaux et des conditions de fonctionnement, la surface réelle de contact peut varier de quelques pour-cents à 100% de la surface apparente de contact, en fonction de la vitesse de déplacement relative, de la pression de contact et des propriétés mécaniques des matériaux [16].

On peut citer deux noms qui ont contribué au progrès dans la compréhension de la mécanique de contact et du frottement : Bowden et Tabor. Ils ont été les premiers qui insistent sur l'importance majeure de la rugosité de la surface des corps antagonistes. Ainsi, ils ont développé un modèle des jonctions adhésives en 1950 [17], permet de lier le frottement aux propriétés mécaniques et géométriques des surfaces en contact. Greenwood et Williams ont proposés en 1966 [18] sur la base de cette hypothèse un modèle à aspérités qui, suite aux travaux d'Archard [4], fournit une justification de la proportionnalité entre la force de frottement et la charge normale appliquée.

I. 4. 1. 1. Modèles du frottement

I. 4. 1. 1. 1. Modèle classique

Le modèle classique du frottement par glissement (dynamique) admet que la force de frottement résulte de deux sources : une force d'adhésion et une force de déformation au niveau des aspérités. La plupart des aspérités des surfaces réelles sous une charge sont déformées plastiquement jusqu'à ce que la surface de tous les contacts soit suffisante pour supporter cette charge. Avec cette hypothèse, on peut écrire l'égalité suivante [19] :

$$A \cdot P_0 = P \quad (\text{I.17})$$

La contrainte de cisaillement nécessaire pour cisailer les jonctions :

$$\tau = \frac{F_t}{A} \quad (\text{I.18})$$

On peut écrire :

$$F_t = \frac{P}{P_0} \tau \quad (\text{I.19})$$

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

$$\mu = \frac{F_t}{P} = \frac{\tau}{P_0} \quad (\text{I.20})$$

Si on remplace τ par la contrainte critique de cisaillement τ_{\max} du métal le plus tendre des métaux en contact, on obtient le coefficient de frottement adhésif μ_{ad} :

$$\mu_{\text{ad}} = \frac{\tau_{\max}}{P_0} \quad (\text{I.21})$$

Cela est plus ou moins constant pour la plupart des métaux et explique ainsi pourquoi les coefficients de frottements varient moins que les propriétés mécaniques.

I. 4. 1. 1. 2. Modèle de Bowden et Tabor

Le premier modèle qui prend en compte la plasticité des surfaces frottantes est le modèle proposé par Bowden et Tabor [17], en relation avec les jonctions créées à l'interface de contact au niveau des sommets des irrégularités. La fragmentation de l'aire apparente de contact en un grand nombre de micro-contacts, représentés par des jonctions adhésives qui se créent entre les aspérités, est causé par la rugosité surfacique (Fig. I. 7).

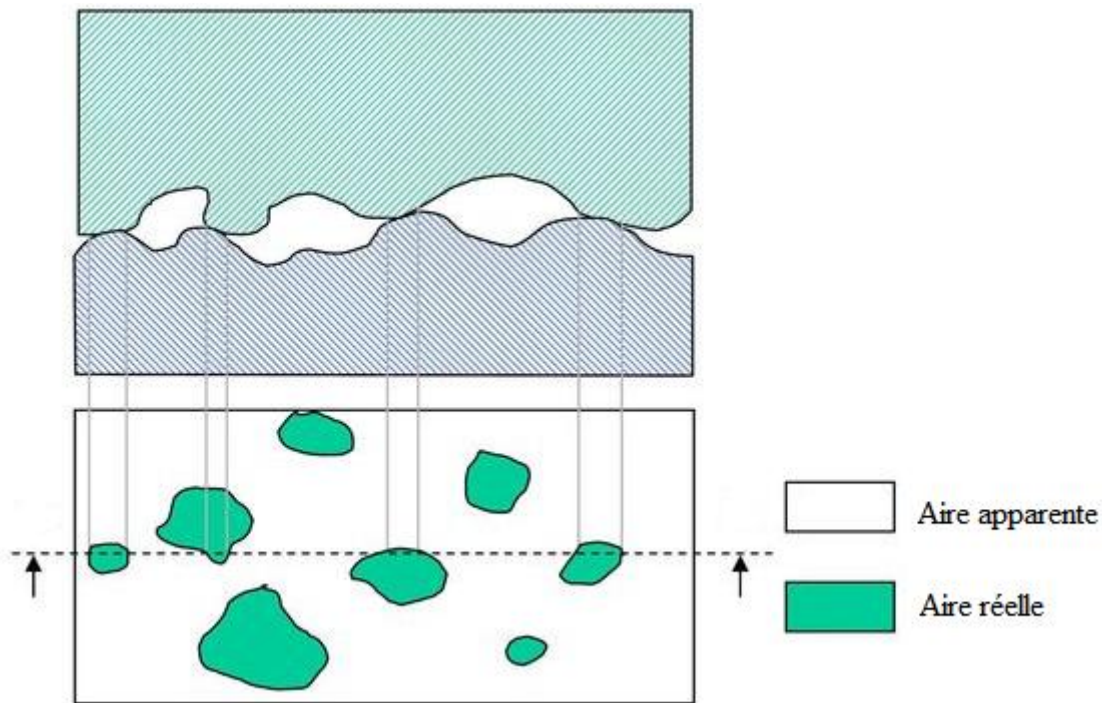


Figure I. 7. Fragmentation de l'aire apparente de contact.

La surface réelle de contact n'est pas parfaitement plane quel que soit le degré de finition des interfaces. Son état de surface se caractérise par une certaine irrégularité qui est liée aux dimensions des aspérités microscopiques de la surface.

Il est naturel de croire que la pression locale au niveau des micro-contacts dépasse la limite élastique du matériau. La pression au niveau du contact pour un matériau plastique est saturée à une valeur H , et les aspérités se déforment alors pour que :

$$\frac{A_r}{A_a} = \frac{A_r P}{A_a P} = \frac{P_n}{H} \quad (\text{I.22})$$

La charge ou la force de frottement, d'après Bowden et Tabor [17], représente la force de cisaillement nécessaire pour rompre les jonctions adhésives formées au niveau des aspérités entre les solides en contact. Si τ est la contrainte de cisaillement des jonctions, la force de frottement F devient :

$$F = \tau A_r \quad (\text{I.23})$$

Néanmoins les mécanismes physiques du phénomène de frottement peuvent être présentés par l'équation (I.23). Elle permet d'introduire les caractéristiques mécaniques des surfaces en contact, à savoir τ et H . Cela ne suffit pas car la proportionnalité qu'elle exprime est obtenue sur la base d'une relation expérimentale entre la surface réelle de contact A_r et la charge normale P .

Le frottement entre deux surfaces en contact conduit essentiellement à trois processus physiques fondamentaux [17] :

- le cisaillement des jonctions adhésives créée par le contact des interfaces,
- le labourage des surfaces à cause des irrégularités surfaciques,
- le cisaillement d'un film intercalaire entre les aspérités.

Si la pente des aspérités est suffisamment faible, le processus dominant dans ce cas est le cisaillement des micro-jonctions adhésives. Donc, le coefficient de frottement μ s'écrit comme suit :

$$\mu = \frac{F}{P} = \frac{\tau A_r}{P_r A_r} = \frac{\kappa}{H} \quad (\text{I.24})$$

κ : la contrainte de cisaillement du matériau le plus tendre.

En fait, ce n'est pas toujours le cas, car Bowden et Tabor [17] admettent que la présence d'une couche de contamination entre les aspérités des surfaces limite la contrainte de cisaillement est donc $\tau < k$.

Ainsi :

$$\tau = f \cdot k \quad (\text{I.25})$$

Donc, le coefficient de frottement μ est :

$$\mu = f \frac{\kappa}{H} \quad (\text{I.26})$$

Avec $0 < f < 1$, où f est un paramètre de contamination.

La relation (I.23) est applicable, si on souhaite d'obtenir une force de frottement minimale.

I. 4. 1. 2. Aspects thermiques des interfaces glissantes

Concernant les aspects thermiques des contacts glissants sièges d'une génération de chaleur. Beaucoup des travaux [20-25] sont d'origine mécanique (contact glissant, usinage, meulage, ...). Cependant, du fait que beaucoup d'auteurs sont des mécaniciens et que la condition de liaison proposée par Bardon [26] soit récente, peu de ces études traitent directement la part du flux qui participe à la chute de la température. L'étude bibliographique de la thermique du contact glissant fait ressortir que le modèle le plus simple représentatif des phénomènes physiques fait appel à trois paramètres :

γ : coefficient de partage local du flux généré par frottement.

R_{cg} : résistance de contact glissant.

φ_g : flux de chaleur généré par frottement.

Les équations de couplage entre les deux solides en contact glissant, font appel à ces paramètres, et s'écrivent :

$$\varphi_1 = \gamma\varphi_g + \frac{T_{cs2}-T_{cs1}}{R_{cg}} \text{ et } \varphi_2 = (1 - \gamma)\varphi_g + \frac{T_{cs2}-T_{cs1}}{R_{cg}} \quad (\text{I.27})$$

Avec :

$$\varphi_g = \varphi_1 + \varphi_2 ; \gamma = \frac{R_{c2}}{R_{cg}} ; R_{cg} = R_{c1} + R_{c2}$$

Où φ_1 est le flux entrant dans le solide 1 et φ_2 le flux entrant dans le solide 2. La figure I.4 représente le partage de chaleur à l'interface des solides en contact glissant.

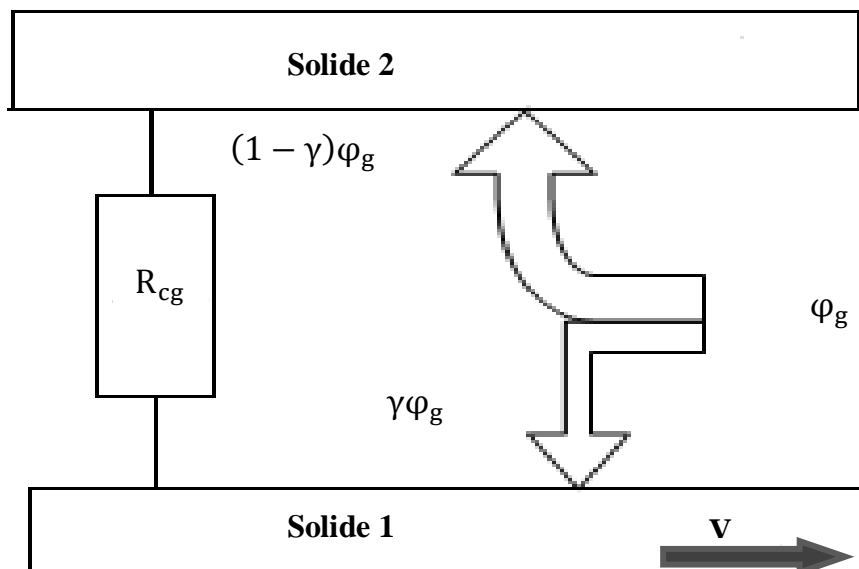


Figure I. 8. Partage de flux à l'interface glissante.

I. 4. 1. 2. 1. modèle thermique

La chaleur générée par frottement et par effet joule entre les deux surfaces du pion et le disque est la somme des deux sources de chaleur par unité de temps :

- la première est la quantité de chaleur mobile Q_d ;
- la deuxième la quantité de chaleur fixe Q_p .

La quantité de chaleur Q est distribuée entre les deux surfaces de contacts, et

l'augmentation de la température de contact ΔT_m soit la même pour les antagonistes. Le calcul du flux thermique à travers chaque composant du couple est dépend de la géométrie du contact, la charge appliquée, la vitesse de glissement, l'intensité du courant électrique, la capacité calorifique et du nombre de Peclet L [27]

$$L = \frac{v}{2\chi} a \quad \text{avec} \quad \chi = \frac{K}{\rho \cdot C_p} \quad (\text{I.28})$$

Si $L < 0,1$, nous pouvons considérer être en régime établi et la température du pion à l'interface s'écrit :

$$\Delta T_m = \frac{1}{4 \cdot a \cdot K_p} Q_p \quad (\text{I.29})$$

De même, la relation conduisant à la température à l'interface du pion-disque, mais vue du côté disque, s'exprime par :

$$\Delta T_m = \frac{1}{4 \cdot a \cdot K_d} Q_d \quad (\text{I.30})$$

Pour le domaine $0,1 < L < 5$, nous considérons la relation :

$$\Delta T_m = \frac{\xi}{4 \cdot a \cdot K_p} Q_p \quad (\text{I.31})$$

avec ξ variant de 0,85 à 0,35.

Dans le cas de vitesses telles que $L > 5$, la température à l'interface est donnée par :

$$\Delta T_m = \frac{0,31}{a \cdot K_p} \sqrt{\frac{\chi_p}{v \cdot a}} Q_p \quad (\text{I.32})$$

En présence du courant électrique, la quantité de chaleur par unité du temps du pion s'écrit :

$$Q_p = Q_m + Q_e = \mu \cdot P \cdot V + R_c \cdot I^2 \quad (\text{I.33})$$

Avec Q_m est la quantité de chaleur généré par frottement et Q_e est la quantité de chaleur généré par effet Joule.

I. 4. 1. 3. Les mécanismes de génération de chaleur au cours du frottement

Les modèles de contact lisse ou avec aspérité considèrent à un moment une température de contact égale. Dans le contact parfait, cette hypothèse est faite au niveau de l'interface de contact, tandis que, elle se situe au niveau des aspérités pour le contact imparfait. Enfin, le flux de chaleur généré par frottement est généralement considéré surfacique bien que Chantrenne [28] suppose une génération de chaleur volumique dans les deux corps en contact.

En raison des irrégularités et de l'usure des surfaces, le glissement des deux milieux provoque, par dégradation de l'énergie mécanique, une double génération de chaleur, au niveau des contacts et dans l'espace interstitiel qui les sépare [29] :

I. 4. 1. 3. 1. Génération de chaleur au niveau des contacts

On peut distinguer différents modes de génération de chaleur : les mécanismes de déformation et de rupture (plastification, fissuration des massifs et détachement de particules), les phénomènes physico-chimique (oxydation, adhésion, diffusion ou changement de phase) mais aussi acoustique (bruits, vibrations) ou lumineux (étincelles), etc [30].

I. 4. 1. 3. 2. Génération de chaleur dans le volume interstitiel

Le volume interstitiel est un milieu diphasique gaz-solide fortement cisailé. Ce cisaillement provoque une génération de chaleur volumique dans le milieu interstitiel, généralement appelé troisième corps. On peut penser que, la génération de chaleur dans le volume interstitiel est un phénomène volumique lié au concept de cisaillement. Il est par contre difficile d'évaluer cette génération de chaleur et de la comparer avec celle au niveau des contacts.

I. 4. 2. L'usure

Le contact dynamique de deux surfaces entraîne un échauffement des corps, une détérioration de l'état de surface et un enlèvement de matière d'un ou deux de ces surfaces. Cela donne la naissance d'un phénomène tribologique appelé usure. Elle est un ensemble complexe de phénomènes, amenant une émission de débris avec perte de masse et s'accompagnant des transformations physiques et chimiques des surfaces. L'usure est considérée comme un phénomène global difficile à décrire du point de vue quantitatif. Elle ne varie pas de façon progressive en fonction de la vitesse, la température ou le temps [31]. L'usure est généralement combattue en raison de ses effets négatifs, mais elle présente également des aspects favorables. La finition d'une surface par rectification, le freinage, L'affûtage d'un outil, l'écriture du crayon sur le papier sont des exemples d'usures utiles.

Pour quantifier le taux d'usure, une approche classique proposée par Archard a relié la charge appliquée au contact, la dureté du corps et la distance parcourue par le volume usé. Ce coefficient d'usure varie avec les autres paramètres tribologiques comme la charge normale, la vitesse de glissement, la température de contact, l'environnement et la nature des corps

frottant [32, 33]. Sa valeur est aussi reliée à la nature de l'usure. Lorsque la charge est très importante, l'usure devient très rapide.

I. 4. 2. 1. Phases de l'usure

L'usure est un processus qui varie au moment de fonctionnement des systèmes mécaniques avec le temps. Pour une charge et une vitesse de glissement constantes, l'évolution de la perte de matière d'un organe mécanique est représentée graphiquement par la courbe de la figure I. 9. Elle montre trois stades d'usure qui sont :

- phase I : c'est la période initiale d'usure ou la période de rodage, elle dure un peu de temps par rapport à la durée de frottement. Elle est caractérisée par un régime transitoire du système tribologique avec un taux d'usure élevé, qui, par la suite, diminue progressivement ;
- phase II : elle dure plus longtemps et correspond à l'utilisation normale de l'organe mécanique. Elle se caractérise par une stabilité de frottement et un taux d'usure faible. Elle se produit en fin de rodage ;
- phase III : traduit la mise hors service du composant due à une usure exagérée qui tend à modifier les conditions nominales de fonctionnement (jeux exagérés, lubrification inefficace, efforts élevés et endommagement des surfaces).

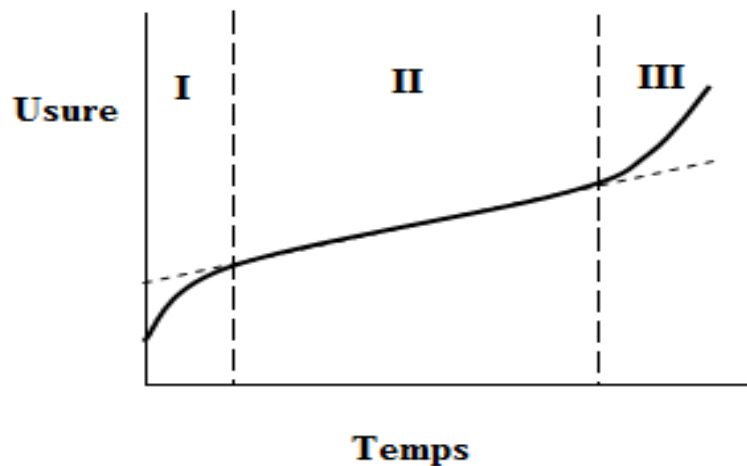


Figure I. 9. Les phases principales d'usure [28].

I. 4. 2. 2. Les principaux modes d'usure

Selon les phénomènes élémentaires qui viennent d'être évoqués, de nombreux modes d'usure ont été établis qui peuvent être étudiés de différentes manières en se basant sur la nature des phénomènes à l'origine des dégradations. On distingue l'usure due :

- à l'action d'une particule sur la surface d'un solide (usure par abrasion, érosion ou cavitation) ;
- à la force d'attraction entre les atomes de deux surfaces (usure adhésive) ;
- au passage répété d'un solide sur une surface (usure par fatigue).

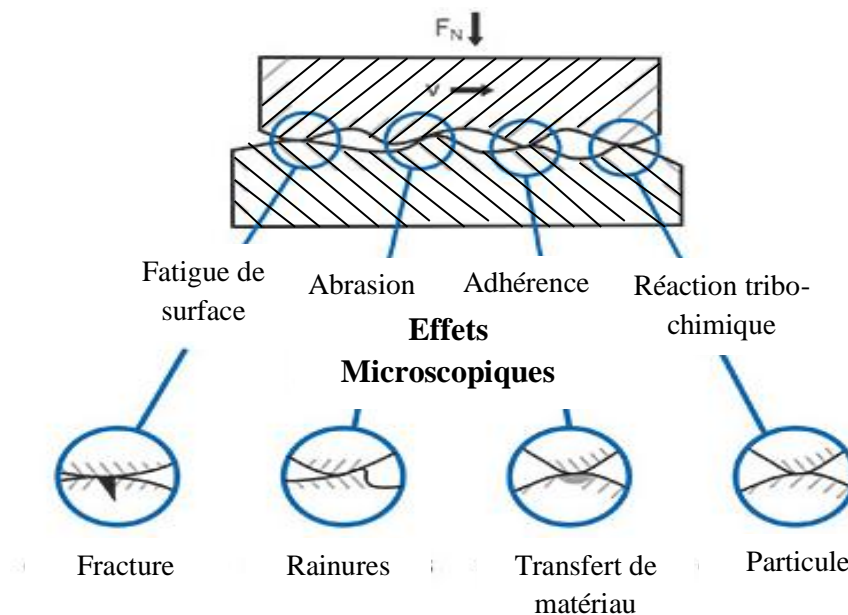


Figure I. 10. Mécanismes d'usure.

I. 4. 2. 2. 1. Abrasion

Cette usure se caractérise par la présence dans le contact direct d'un état de surface rugueux ou par pénétration dans le matériau le plus tendre de particules dures provenant des débris d'usure du contact. Ce mécanisme de dégradation qui fait intervenir dans les premiers instants uniquement les corps antagonistes, après, devient une usure à trois corps [34].

La nature de l'usure par abrasion est précisée par le mode d'acheminement de l'aspérité dans le contact, soit l'aspérité est fixée sur l'une des deux surfaces (abrasion à deux corps), soit l'aspérité est libre par rapport aux deux surfaces (abrasion à trois corps).

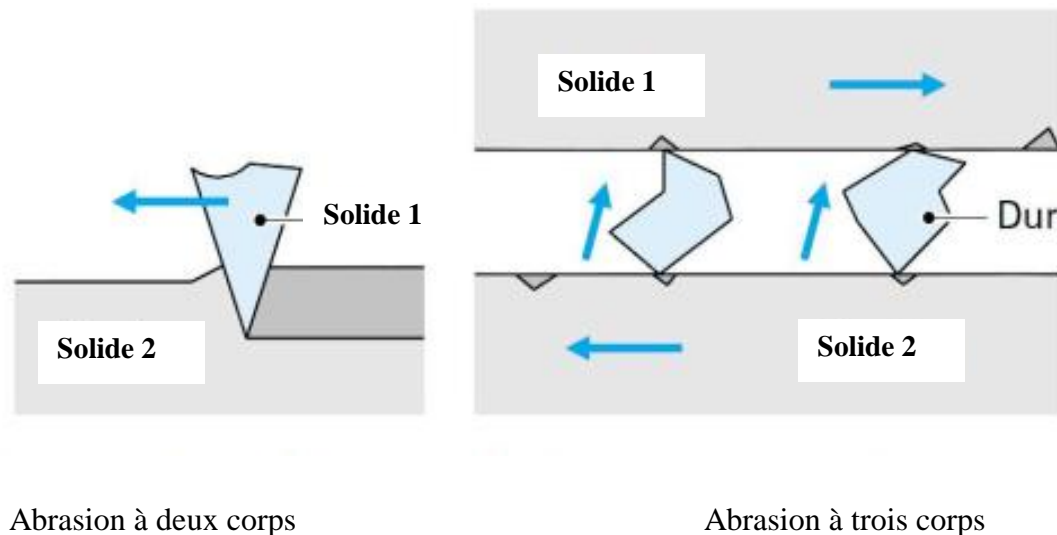


Figure I. 11. Représentation schématique de l'usure abrasive.

Le passage d'aspérité sur la surface de contact peut produire un copeau qui provoque un enlèvement de la matière (abrasion par coupe), ou un bourrelet plastique sur les bords de la rayure qui va peu à peu disparaître sous le passage répété des aspérités (abrasion par fatigue). Ce phénomène est essentiellement de nature mécanique. Pour lutter contre l'usure abrasive, il faut durcir les matériaux en contact, surtout la surface.

I. 4. 2. 2. 2. Erosion

Une usure par érosion est causée par des impacts de particules liquides ou solides contre une surface solide. Ce mécanisme dépend des propriétés des matériaux en présence de la vitesse d'impact, l'angle d'impact et la taille de la particule.

I. 4. 2. 2. 3. Adhésion

L'usure par adhésion se produit lorsque des liaisons créées par adhésion ou fusion subissent à une force de cisaillement. Elle se caractérise par un transfert de débris entraîné d'un des deux antagonistes vers l'autre soit par un mécanisme purement mécanique, soit suite à une réaction physico-chimique. Pour le transfert mécanique, plusieurs hypothèses ont été développées [35]. Les micro-aspérités présentes dans le contact peuvent conduire à la diminution des zones en contact et générer aux jonctions des énergies très élevées qui peuvent favoriser les réactions physico-chimiques (micro-soudage des aspérités). Lors du frottement, il existe entre les deux matériaux en contact une multitude des jonctions qui supportent la charge normale. Au niveau de chaque jonction, des phénomènes d'adhésion peuvent se produire créant une liaison adhésive.

La théorie de Holm [33] est l'une des plus anciennes sur ce mode d'usure. Il a considéré que le problème est à l'échelle microscopique, le contact se faisant entre les deux atomes des surfaces. L'énergie dissipée au cours du frottement provoque un écoulement plastique qui conduit à la jonction entre les atomes. Lorsque la force de cisaillement, au cours de glissement, devient supérieure à la force de cohésion inter-atomique, les particules se détachent et forment des débris d'usure.

I. 4. 2. 2. 4. Corrosion

L'usure corrosive ou tribo-chimique intervient lorsque le frottement se produit dans un environnement réactif pour les matériaux en présence. Ce type de dégradation résulte d'une ou de plusieurs réactions chimiques sous l'effet d'agent corrosif (environnement, lubrifiant) et des contraintes mécaniques pendant le frottement. Suivant l'état structural superficiel, il se crée des oxydes réactionnels dépendant de l'environnement [36].

I. 4. 2. 2. 5. Par fatigue

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

I. 4. 2. 2. 6. Par oxydation

C'est un mécanisme d'usure douce, elle découle de l'adsorption de l'oxygène sur les surfaces métallique mise à nu lors du frottement et des réactions chimiques de cet oxygène avec le métal [37]. Ensuite, le taux d'oxydation est contrôlé par la diffusion de l'oxygène dans les couches superficielles. Ainsi, les films d'oxyde se développent sur le plateau de contact à la température θ_0 , l'usure se produit par écaillage de l'oxyde et émission de débris, soit lors du contact des aspérités, soit la couche d'oxyde atteint une épaisseur critique (1 à 3 μm) [37]. Une étude très remarquable de Quinn sur la théorie de l'usure par oxydation a été énoncée dans les années 1970 [38]. De plus, il a été développé un modèle analytique de prédiction du taux d'usure.

I. 4. 2. 3. Modélisation de l'usure

I. 4. 2. 3. 1. Usure abrasive

L'un des plus simples et plus anciens modèles d'usure par abrasion considéré est le cas d'une surface labourée. Nous pouvons analyser un modèle simple d'usure par abrasion [39], on considère un processus de microcoupure réalisé par une aspérité conique d'une surface dure dans la surface la plus faible (Fig. I. 12). Toute la matière déplacée par effet du déplacement du cône est arrachée sous forme de débris d'usure. Le sommet de la rugosité de la surface du corps (1) du couple de frottement pénètre dans la surface du corps (2) de ce couple de dureté HB.

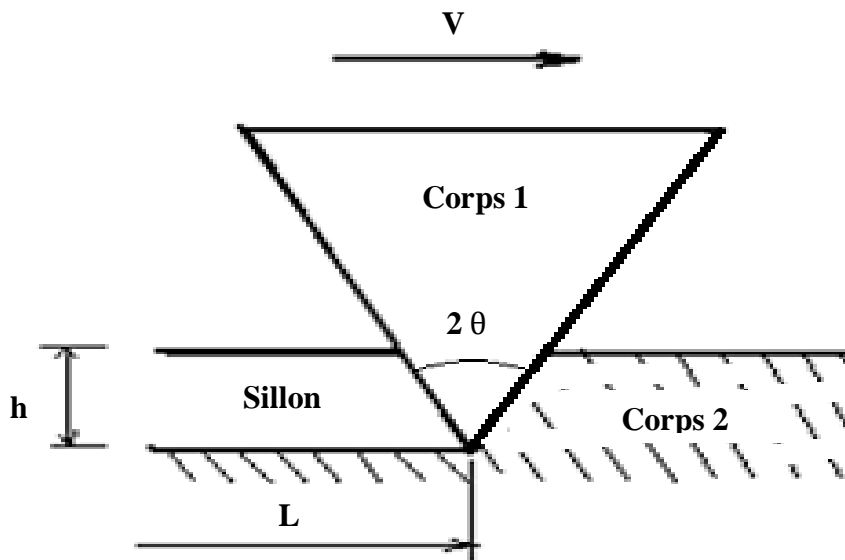


Figure I. 12. Modèle d'usure abrasive pour le couple cône (dur) surface (plus tendre).

On déduit que :

$$h = \frac{r}{\operatorname{tg}\theta} [\text{mm}] \quad (\text{I.34})$$

h est la profondeur de pénétration de la pointe conique des aspérités dans la surface plus faible et θ le demi-angle de la pointe du cône.

Le volume de matériel enlevé par abrasion est :

$$\Delta U = r \cdot h \cdot d = \frac{r^2}{\operatorname{tg}\theta} d [\text{mm}^3] \quad (\text{I.35})$$

On suppose que les aspérités du corps (2) sont identiques, le volume de matériel arraché par abrasion est :

$$U = \frac{r^2}{\text{tg}\theta} d \text{ [mm}^3\text{]} \quad (\text{I.36})$$

En considérant que la rugosité provoque une déformation plastique de la surface du corps (2) (la pression de contact = la dureté HB). On déduit :

$$P = \frac{\pi r^2}{2} \text{HB [N]} \quad (\text{I.37})$$

En combinant les relations (I.36) et (I.37), on obtient :

$$U = \frac{2}{\pi \cdot \text{tg}\theta} \frac{Pd}{\text{HB}} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (\text{I.38})$$

Si on considère qu'une partie des aspérités du corps le plus dur, représentée par une fraction k de la surface, réalise la micro-coupure de la surface du corps le plus tendre, il en résulte :

$$U = \frac{2}{\pi \text{tg}\theta} k \frac{Pd}{\text{HB}} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (\text{I.39})$$

On note que : $\frac{2}{\pi \text{tg}\theta} k = k^*$

Donc, Le volume de matériel enlevé par abrasion est écrit comme suit :

$$U = k^* \frac{P d}{\text{HB}} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (\text{I.40})$$

Il existe deux conditions pour produire l'usure d'abrasion avec deux corps [39] :

- l'une des deux antagonistes doit être plus dure que l'autre,
- la $\text{tg}\theta$ des aspérités de la surface la plus dure doit prendre des valeurs réduites.

I. 4. 2. 3. 2. Usure adhésive

Modèle d'Archard

L'usure des surfaces en contact dynamique est le résultat du frottement entre deux corps. Le modèle qui permet de calculer l'évolution de l'usure dans le temps et aussi modifier le déplacement des surfaces de contacts en fonction de cette usure est la loi d'Archard [39].

En effet, Archard [39] a proposé une modélisation empirique de la phase linéaire de l'usure. Cette modélisation s'appuie d'une part sur le fait que le contact des surfaces ne se fait que par un nombre réduit d'aspérités réparties aléatoirement sur la surface et d'autre part que ces aspérités doivent supporter la charge et maintenir les déformations dans le domaine d'élasticité. Ils supposent donc que le volume usé est proportionnel à la charge appliquée à la distance parcourue et inversement proportionnel à la résistance mécanique des matériaux exprimée par la limite de fluage en compression assimilée à la dureté. Le volume d'usure U dans ce modèle s'écrit sous la forme

$$U = \frac{kP d}{H} [\text{mm}^3] \quad (\text{I.42})$$

K : coefficient d'usure sans dimension lié à la probabilité qu'une aspérité en contact dynamique produise une particule d'usure.

Une seconde forme fait intervenir la nature du matériau le plus mou par l'intermédiaire de sa contrainte d'écoulement σ_y et la surface réelle A_r du contact :

$$U = \frac{k'A_r}{\sigma_y} [\text{mm}^3] \quad (\text{I.43})$$

Une forme dérivée de la première loi fait intervenir l'énergie dissipée dans le contact grâce au produit $P.v$, proportionnel à la vitesse d'usure dh/dt .

$$U = k''Pv [\text{mm}^3] \quad (\text{I.44})$$

k' et k'' : sont des coefficients de calage.

I. 4. 2. 4. L'usure d'un point de vue énergétique

On peut aborder les phénomènes tribologiques sous un aspect énergétique en considérant que le frottement est un processus dissipatif. Cette énergie dissipée en frottement est utilisée par différents processus qui peuvent conduire à l'usure. La figure I. 13 illustre ces différents processus.

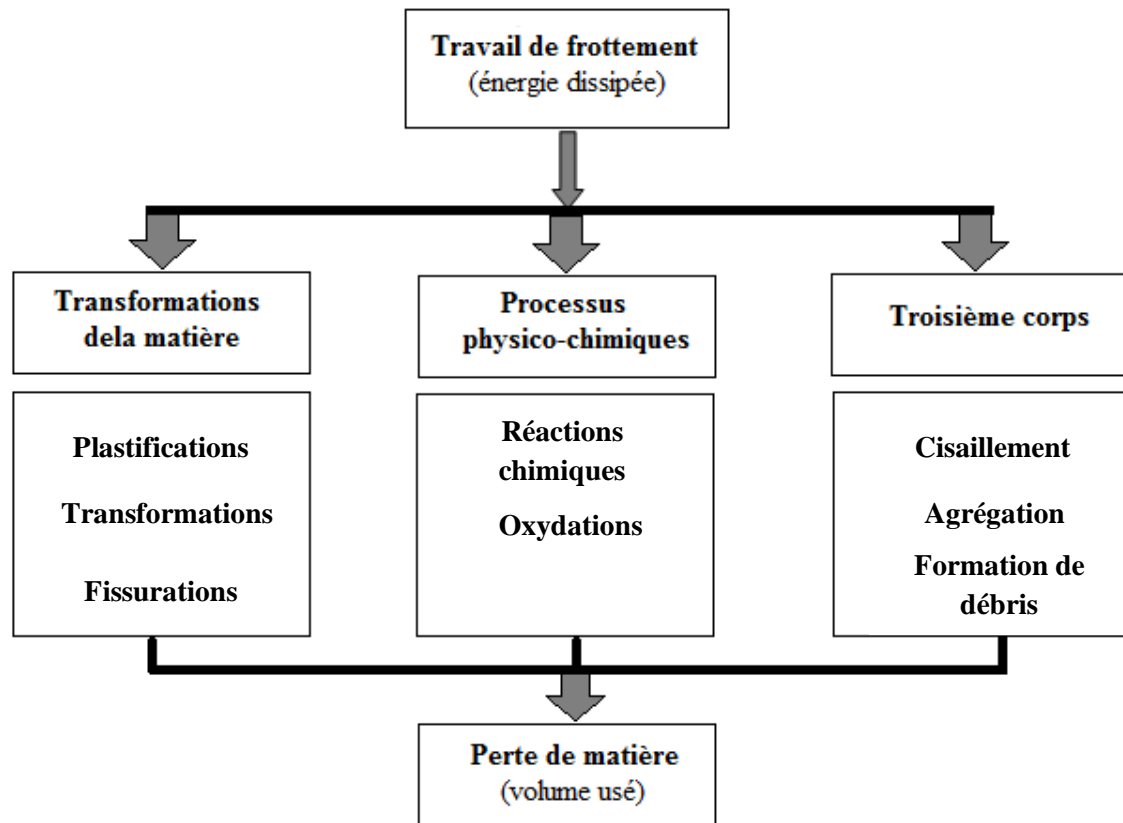


Figure I. 13. Dissipation d'énergie en frottement.

On observe toujours dans la pratique des transformations superficielles de structure sous l'effet du frottement. Les phases obtenues ont été étudiées dans de multiples situations et sur divers matériaux [38]. Des travaux [32, 40] ont montré que la transformation de phase est associée à une certaine quantité d'énergie qui pouvant, par exemple, correspondre à l'activation de l'oxydation des surfaces.

I. 5. Contact électrique des surfaces solides

I. 5. 1. Contact stationnaire

On considère un contact statique entre deux solides sous l'influence d'une charge normale P dont l'interface est traversée par un courant électrique I transmis par les points en contact constituant la surface réel de contact. Les pressions et les températures élevées s'exerçant sur ces micro-contacts sont essentiellement dues à la dissipation d'énergie mécanique et à l'effet joule [41]. L'augmentation de l'intensité du courant provoque une élévation de la température qui adoucit (perte de dureté) le matériau métallique le plus tendre et augmente ainsi l'adhésion par accroissement des points de contact. Dans le cas des métaux, cette élévation de température conduit à des fusions locales du matériau [42, 43].

I. 5. 2. Contact dynamique

La conduction électrique à travers le contact métallique reste la même quand le couple en contact est soumis à une force de frottement qui s'oppose au glissement.

Dans une configuration pion-disque, les points de contact changent continuellement. A l'interface du contact se génère deux sources de chaleur :

- échauffement thermique par frottement
- échauffement électrique par effet Joule.

S'il y a une superposition de l'effet joule et de la dissipation de l'énergie mécanique, cette dernière devient prédominante dans le cas des grandes charges et grandes vitesses.

I. 5. 3. Résistance électrique de contact

Selon que le film d'oxyde est continu ou discontinu, la surface mécanique de contact peut transmettre le courant électrique. A l'air libre, les surfaces sont généralement contaminées par des couches isolantes ; la conduction du courant s'effectue ainsi à travers les zones localisées où les films sont rompus par action mécaniques et/ou électrique.

La mesure de la résistance de contact R_c permet d'estimer la surface réelle de contact A_r , nous faisons passer un courant continu d'intensité constante I à travers l'interface de contact (Fig. I. 14). La mesure de la différence de potentiel V_c permet d'accéder immédiatement à la résistance ohmique en utilisant la loi d'Ohm :

$$R_c = \frac{V_c}{I} \quad (\text{I.45})$$

En utilisant la formule donnée par Holm [44], pour deux matériaux identiques en contact ayants une résistivité électrique σ [Ωm] :

$$R_c = \frac{\sigma}{2a} \quad (\text{I.46})$$

A : étant le rayon réel de contact supposé circulaire [m].

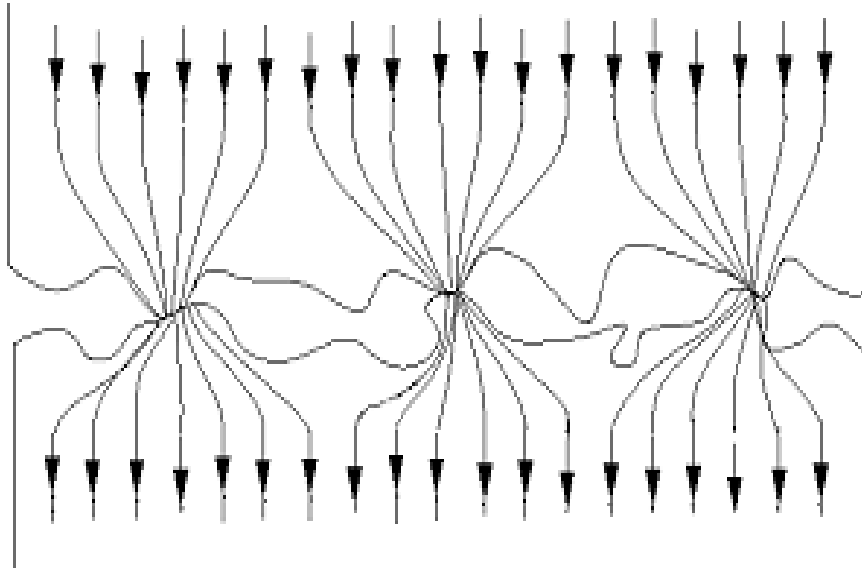


Figure I. 14. Représentation des lignes de courant à l'interface de contact.

Dans le cas d'un contact élastique sphère-plan soumis à une charge normale P , où R_s est le rayon de la sphère, R_c est donnée par :

$$R_c = \frac{\sigma}{2} (R_s)^{-1/3} P^{-1/3} \quad (\text{I.47})$$

Quand le contact devient plastique :

$$R_c = \frac{\sigma}{2} (\pi H)^{1/2} P^{-1/2} \quad (\text{I.48})$$

En présence d'un film d'oxyde dont l'épaisseur supposée constante caractérisée par une résistivité surfacique σ_s , la résistance électrique globale du contact est la somme de deux termes : l'un est lié au contact effectif $\sigma/2a$ et l'autre représente la contribution de la couche d'oxyde formée à l'interface de contact $\sigma_s/2a^2$.

En présence d'une interphase (film) d'une épaisseur supposé constante caractérisée par une résistivité surfacique σ_s exprimée en $\Omega \cdot \text{m}^2$, la résistance électrique globale du contact est la somme de deux termes : l'un est lié au contact effectif $\sigma/2a^2$ et l'autre représente la contribution de la couche d'oxyde formée à l'interface de contact $\sigma_s/2a^2$ [45, 46].

$$R_c = \frac{\sigma}{2a} + \frac{\sigma_s}{2a^2} \quad (\text{I.49})$$

Quand les matériaux antagonistes sont différents, La résistivité effective à l'interface de contact sera déterminée par la relation suivante (I.51), en supposant que les deux corps ont des résistivités σ_1 et σ_2 :

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (\text{I.50})$$

La présence d'un film d'oxyde à l'interface augmente la résistance thermique ainsi que la température au niveau des aspérités de contact.

La résistivité du graphite varie avec la température et n'évolue pas avec le temps, elle est de l'ordre de $10^5 \Omega\text{m}$. La résistivité des carbone-carbone à 2000°C est environ 2,5 fois plus faible qu'à 20°C .

I. 5. 4. Effet du courant électrique dans un contact dynamique

Le passage du courant électrique à travers la surface de contact lorsque le système est en mouvement favorise l'échauffement des corps par dissipation d'énergie. La quantité de cette énergie générée dépend de la charge appliquée, la vitesse de glissement, les caractéristiques des matériaux en frottement et de l'intensité du courant traversant l'aire de contact.

I. 5. 4. 1. Le frottement et l'usure

Le comportement en frottement et en usure dépend non seulement des matériaux en contact, mais aussi des films présents à l'interface. Ces phénomènes dépendent des conditions externes et varient largement d'un matériau à un autre. Des études [47] ont montré que le courant électrique n'influe pas directement sur l'usure, mais il peut être la cause d'une haute élévation de température, ce qui provoque un adoucissement du métal le plus doux et une oxydation accrue à l'interface. Des travaux expérimentaux [48] ont confirmé qu'il y a une diminution du coefficient de frottement et le taux d'usure avec passage du courant électrique à travers un contact dynamique carboné (Fig. I. 15), ainsi que l'oxydation joue un rôle important.

Pour un couple Cuivre-Acier [48], par exemple, le passage du courant électrique engendre l'apparition des fluctuations dans le régime de stabilité. L'amplitude de ces fluctuations augmente avec le courant. La figure I. 16 montre l'influence du passage de courant électrique sur l'évolution du coefficient de frottement en fonction du temps.

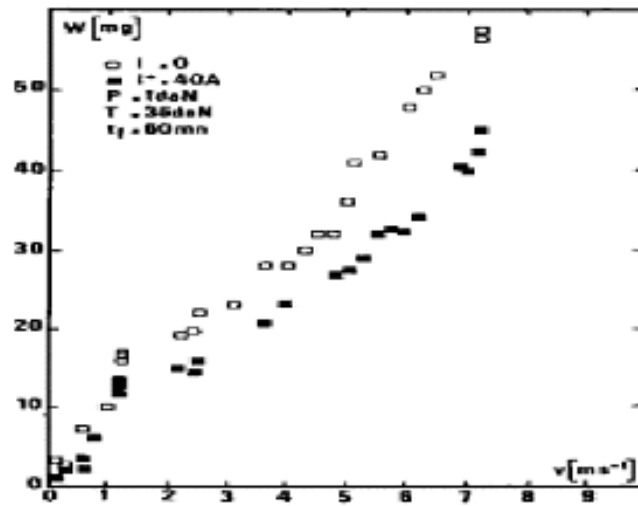


Figure I. 15. Usure de cuivre en fonction de la vitesse avec et sans passage de courant électrique [48].

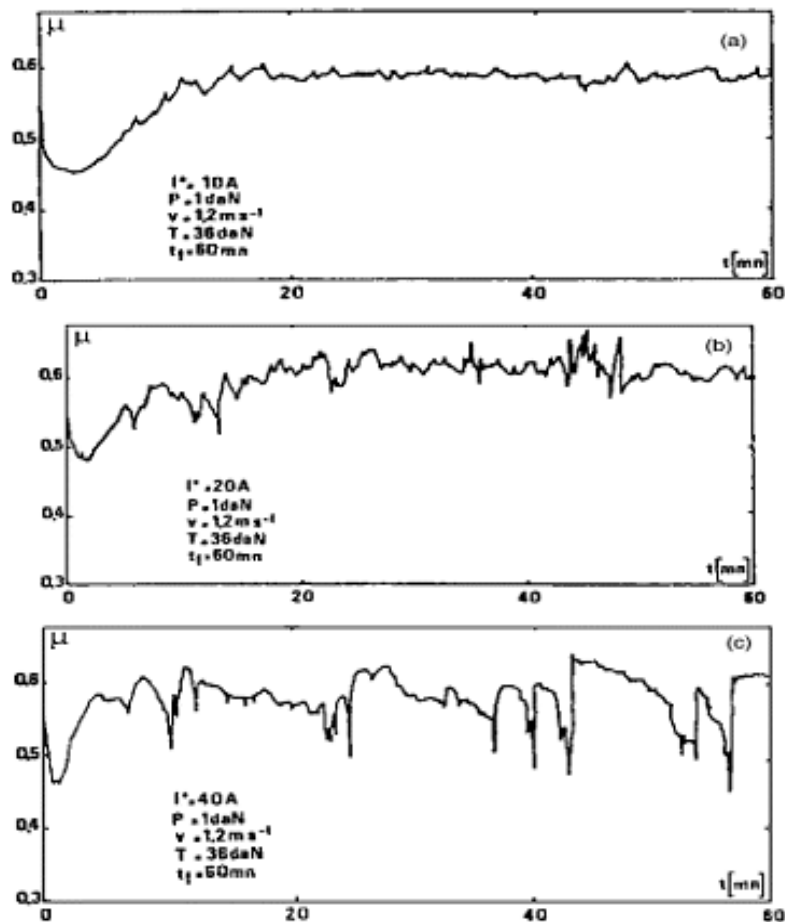


Figure I. 16. Influence de l'intensité du courant sur l'évolution du frottement en fonction du temps pour $V = 1.2 \text{ m/s}$. (a) $I = 10 \text{ A}$, (b) $I = 20 \text{ A}$ et (c) $I = 40 \text{ A}$ [48].

I. 5. 4. 2. Evolution de la température

L'interface d'un contact sous l'action d'une force tangentielle et une vitesse de glissement dissipe une énergie mécanique due au frottement et devient une source de chaleur. Lorsque un contact dynamique, par glissement sous l'action d'une force tangentielle, l'interface dissipe l'énergie mécanique due au frottement et devient source de chaleur. Si on fait passer un courant électrique d'intensité I à travers le contact, dans ce cas, s'ajoute la dissipation par effet joule. Les températures à l'interface augmentent dans le cas de forte charge et/ou de grandes vitesses et/ou en présence de courant électrique [47, 48].

I. 6. Processus d'oxydation des métaux

La grande majorité des métaux (surfaces) réagissent avec l'oxygène de l'atmosphère à laquelle elles sont exposées pour former des oxydes qui ont leurs propriétés caractéristiques [49].

Si un métal forme plusieurs oxydes, les composés sont arrangés de telle sorte que le plus riche en oxygène soit à l'interface solide-gaz, tandis que le plus pauvre se situe à l'interface métal-oxyde [50], c'est par exemple le cas du fer illustré par la figure I. 17.

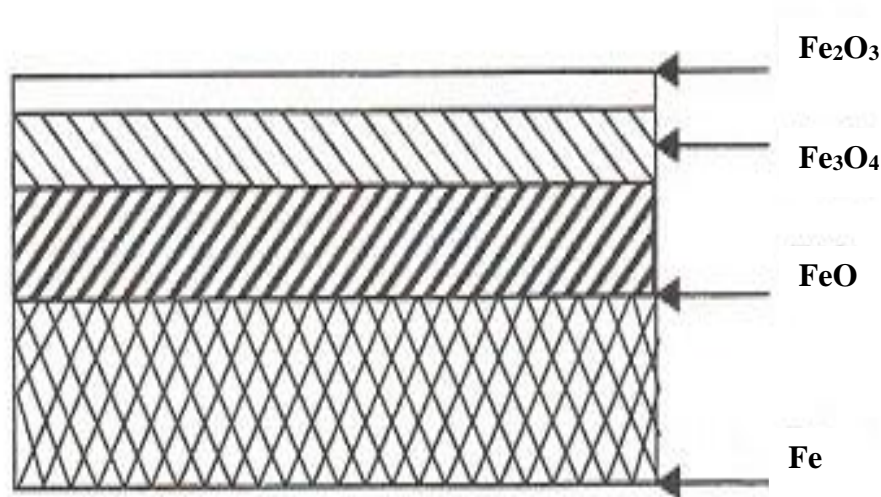


Figure I. 17. Formation des oxydes superposés sur la surface du fer à 625 °C après 24h [50].

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

La puissance mécanique dissipée par l'effet de frottement à l'interface entraîne un favorable échauffement à l'oxydation. Le passage du courant électrique entre les corps en contact peut modifier le processus de formation des oxydes. Ce film d'oxyde modifie l'état initial des surfaces [11].

I. 6. 1. Graphite

Le graphite et le diamant sont les deux minéraux naturels composés uniquement de carbone (C). Même si les deux ont la même composition chimique, la disposition de leurs atomes de carbone est différente. Le graphite est constitué d'anneaux hexagonaux formant de fines couches étroitement superposées et faiblement liées entre elles créant une structure peu résistante.

Le graphite est un minéral naturel très bon conducteur aussi bien d'électricité que de la chaleur. Il possède une conductivité électrique et thermique élevée, une texture graisseuse et une solidité structurale élevée sur l'axe horizontal et faible sur l'axe vertical. Il est utilisé principalement en métallurgie et dans la fabrication des creusets, moules et la fonderie en raison de son point de fusion élevé égale à 3 927 °C. Ainsi, il est ajouté à l'acier en fusion pour augmenter sa teneur en carbone et répondre aux normes de qualité sur la dureté.

Parce qu'il est un très bon conducteur d'électricité, le graphite est plus utilisé dans plusieurs domaines industriels tel que [51] : la fabrication de balais des moteurs électriques, de piles, de différents composants informatiques, des électrodes et, plus récemment, la fabrication des batteries au lithium-ion pour les véhicules électriques.

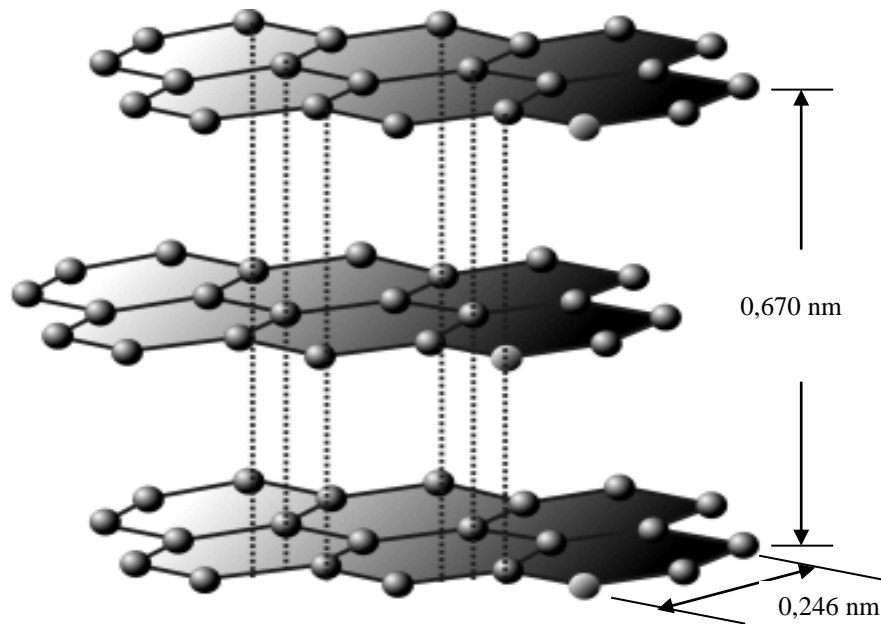


Figure I. 18. Structure du graphite.

Concernant l'oxydation du graphite, l'oxyde de graphite est un composé contenant une couleur noire mate oxygène, carbone et, dans une moindre mesure, hydrogène, dans lequel le carbone est présente de manière prédominante dans la structure stratifiée multicouche typique de graphite [51]. L'oxygène est présent en quantités variables et liée à la structure carbonée donnant lieu à différents des groupes fonctionnels, l'hydrogène sature les valences Carbone le long du périmètre de lamelle graphitique ou devient une partie des groupes fonctionnels. Dans la nature, l'oxygène est présent dans le graphite impureté [52] ainsi que de nombreuses autres espèces chimiques, en particulier dans le graphite formé combustion.

L'oxydation du graphite débute à 450 °C à une ambiance atmosphérique et varie selon sa densité et pureté [53]. Jusqu'aux 500 à 600°C, une réaction chimique entre le graphite et l'oxygène a pour un but d'oxydation du graphite contrôlée. L'oxydation un peu lente depuis la phase précédente jusqu'aux 1000 °C. Au-delà de cette température, l'oxydation du graphite est plus rapide que les autres phases.

I. 6. 2. Cuivre

Le cuivre est un métal rouge très pur et très résistant à la corrosion, meilleur conducteur de l'électricité après l'argent et difficile à remplacer dans les applications qui conjuguent le glissement et la conductivité électrique et/ou thermique.

Dans les conditions ordinaires, l'oxydation du cuivre pure dépend essentiellement de la température où il se trouve porté [54]. En effet pour des températures inférieures à 400°C, l'oxyde cuivreux Cu_2O prédomine (Fig. I. 19), il est de couleur rose et bien accroché au

substrat. Son point de fusion est d'environ 1235°C. Plusieurs étapes peuvent être discernées pour cette oxydation [55] :

- première étape : formation d'un film d'oxyde de quelques nanomètres d'épaisseur ;
- deuxième étape : la formation d'un film mince d'une épaisseur pouvant atteindre quelques centaines de nanomètres, la couche d'oxyde Cu_2O créée est suffisante pour former un barrage entre le gaz et le cuivre métallique ;
- troisième étape : la croissance d'un film épais.

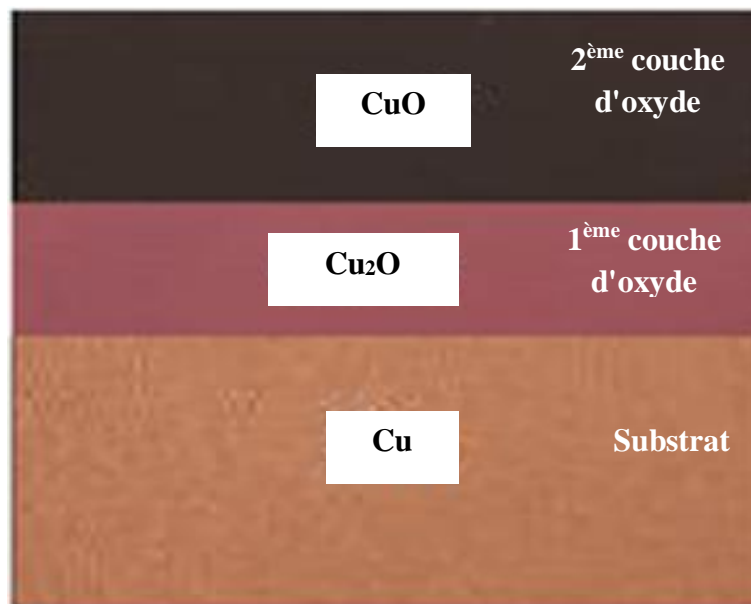
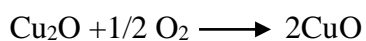
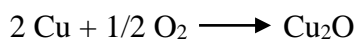


Figure I. 19. Superposition des couches d'oxyde sur le substrat.

Lorsque les températures sont plus de 400°C, l'oxyde généré est l'oxyde de cuivre CuO situé à la surface externe en couche noire relativement mince [56]. Lorsqu'on chauffe le cuivre à des températures élevées jusqu'à 1800 °C, l'oxyde de cuivre devient instable et seul l'oxyde cuivreux subsiste [54].

On peut former de l'oxyde cuivrique en chauffant du cuivre à l'atmosphère, mais il se forme alors également de l'oxyde cuivreux Cu_2O . D'après Dubois-Salomon [55], on a :



A partir de ces deux réactions, il ressort que le CuO se forme toujours par oxydation de Cu₂O et jamais par oxydation du cuivre métallique [57].

La structure cristalline du Cu₂O est cubique de type Pn³m (Fig. I. 20). Sa couleur est rouge et de 6.10³ kg.m⁻³ de densité. Le Cu₂O est connue comme un semi-conducteur dont les défauts majoritaires sont des lacunes de cuivre neutres [58-61].

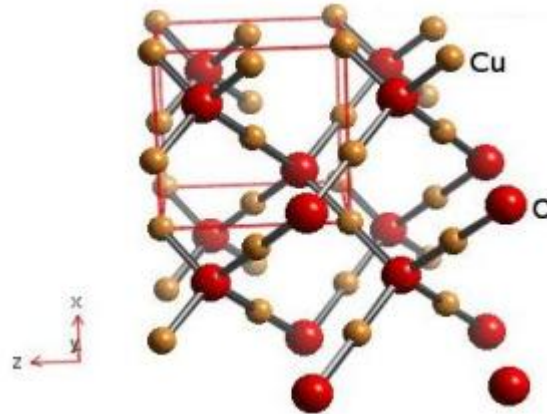


Figure I. 20. Structure cristallographique du Cu₂O.

Le CuO est de structure monoclinique. Il prend une couleur noire avec une densité de 6,31.10³ kg.m⁻³. Le rapport O/Cu est inférieur à 1 ce qui suppose une structure riche en cuivre (Fig. I. 21). Des lacunes du cuivre interstitiel neutre ont été avancées par les chercheurs comme un défaut possible. L'absence de lacunes chargées n'a pas été justifiée [62].

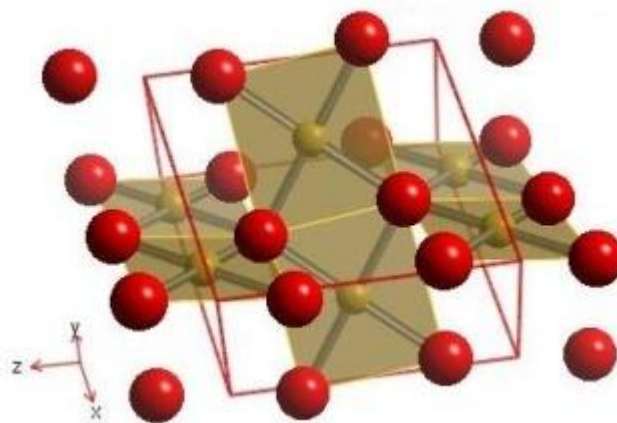


Figure I. 21. Structure cristallographique du CuO.

I. 7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a présenté un aperçu sur les phénomènes de la tribologie tel que le frottement et l'usure qui s'articule sur les paramètres mécaniques et thermique des contacts

dynamiques.

La modélisation a un rôle important pour confronter les résultats obtenus par des méthodes analytiques à ceux obtenus expérimentalement.

Beaucoup des travaux théoriques ont été confronté avec des résultats expérimentaux. Beaucoup d'entre eux ont montré une bonne concordance [4, 63].

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Barrau Olivier, (2004), « Etude de frottement et de l'usure d'acier à outil de travail à chaud », Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique Toulouse, France.
- [2] E. Lewin, O. Wilhelmsson, U. Jansson, « Nano-composite nc-TiC/a-C thin films for electrical contact applications », *Journal of Applied Physics*, 100, (2006), 054303.
- [3] Adji Cathy Ba, (2016), « Etude du comportement tribologique d'un couple de matériaux ferromagnétique acier XC48 en contact mécanique et magnétique à sec », Thèse de Doctorat, Université Poitiers, France.
- [4] Boubechou Choubeila, (2015), « Contribution à l'étude du comportement tribologique des couples glissant Acier-Acier et Acier-Bronze », Thèse de Doctorat en science, Université Frères Mentouri Constantine 1, Algérie.
- [5] U. Beste, S. Jacobson, « A new view of the deterioration and wear of cemented carbide rock drill buttons », *Wear*, 264, (2008), 1129-1141.
- [6] R. Courtel, « Vue passées et présentes sur les mécanismes du frottement », page : 23 *RMF*, N°66, (1978).
- [7] G. Bellanger, « Le frottement et l'usure à sec en relation avec les propriétés physique et chimiques des couches superficielles sous-jacentes », *Rev. Int. Français. Du pétrole* chapitre I, (1978).
- [8] H. Bufler, « Zur theorie der rollenden reibung », *Ingenieur-Archiv*, 27, (1959), 137-152.
- [9] J. Dundurs, « Properties of elastic bodies in contact. In *Mechanics of Contact between Deformable Bodies* », cd. de Pater & Kalker, University Press, Delf, (1975).
- [10] S. Hannel, S. Fouvry, P. Kapsa, L. Vincent, « The fretting sliding transition as a criterion for elastical contact performance », *Wear*, 249, (2001), 761-770.
- [11] H. Zahouani, S. Mezghani and al, « Effect of roughness scale on contact stiffness between solids », *Wear*, 266, (2009), 589-591.
- [12] J.R. Barber, « Bounds on the electrical resistance between contacting elastic rough bodies », *Proc. R. Soc. Lond*, 459, (2003), 53-66.
- [13] Uetz et al, « Wear as an energy transformation process », *Wear*, 49, (1978), 253-264.

- [14] R.D. Mindlin, « Compliance of elastic bodies in contact », transactions of the ASME, Series E, 16, (1949), 259-268.
- [15] Johnson et al, « Surface energy and the contact of elastic solids », proceeding of the Royal Society, London, A324, (1971), 301-313.
- [16] F.E. Kennedy, « Thermal and thermo-mechanical effect in dry sliding », Wear, 100, (1984), 453-476.
- [17] E. P. Bowden and D. Tabor, « The friction and lubrication of solids I », Clarendon Press, Oxford. (1950).
- [18] J.A. Greenwood, J.P.B. Williamson, « Contact of nominally flat surfaces », proceedings of the Royal Society, London, A295, (1966), 300-319.
- [19] M. Godet, D. Ploy, « Introduction to Tribology », Colloques internationaux du CNRS, N° 233, Polymers et lubrification, (1974), 361-367.
- [20] J. F. Archard, « The temperature of rubbing surfaces », Wear, 2, (1958-1959), 438-455.
- [21] N. R. Des Ruisseaux and R.D. Zerkle, « Temperature in semi-infinite and cylindrical bodies subjected to moving heat sources and surface cooling », ASME J. Heat Transfer, (1970), 456-464.
- [22] H. Blok, « Les Températures de Surface dans des Conditions de Graissage Sous Extrême Pression », Proc. Sd. World Petrol. Cong, 3, (1937), 1471-1486.
- [23] A. Cameron, A. N. Gordon and G. T. Symm, « Contact temperature in rolling sliding surfaces ». Proc. Royal Soc. Of London. Series A, Math. Physical Sciences, 286, (1964), 45–61.
- [24] D. Rosenthal and M. Cambridge, « The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments », Transactions of the A. S. M. E, (1946), 849-866.
- [25] P. S. Kounas, A. D. Diamaragonas and G. N. Sandor, « The distribution of frictional heat between a stationary pin and rotating cylinder », Wear, 19, (1972), 415-424.
- [26] J. P. Bardon, « Bases physiques des conditions de contact thermique imparfait entre milieux en glissement relatif », Revue Générale de Thermique, Fr.386, (1994), 86-91.
- [27] J.F. Archard, « The temperature of rubbing surfaces », Wear, 2, (1958), 438-455.

- [28] P. Chantrenne, (1995), « Détermination des paramètres d'un modèle thermique du contact sec-glissant, Application aux roulements en ambiance cryogénique », Thèse INSA de Lyon N°95 ISAL 0110.
- [29] J.P. Bardon, « Bases physiques des conditions de contact thermique imparfait entre milieux en glissement relatif », *Rev. Gén. Therm. Fr*, 386, (1994), 85-91.
- [30] C. Larzabal et F. Danes, « Etude de l'effet des groupements des spots de contact sur la résistance thermique des contacts statiques », *Congrès Français de Thermique STF99*, (1999), 51-56.
- [31] B. Bhushan, B.K. gupta, McGraw-Hill, « *Handbook of Tribology* », INC. (1991).
- [32] M. Braunovic, V. V. Konchits and N. K. Myshkin, « *Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology* », New York CRC press, (2006).
- [33] R. Holm, « *Electric Contacts: Theory and Application* », Springer, (1967).
- [34] M. Dubourg, Y. Berthier and L. Vincent, « Cracking under fretting fatigue: damage prediction under multi-axial fatigue », *Journal of Strain Analysis*, 37, (2002), 519-533.
- [35] C. Colombie, Y. Berthier. A. Floquet, L. Vincent et M. Godet, « Portance des particules d'usure, Analogie avec les lubrifiants solides », *Matériaux Mécanique Electricité*, 411, (1985), 29-36.
- [36] Aderghal Nadia, (2012), « Répartition des flux de chaleur générés par frottement mécanique et modélisation des températures à l'interface des contacts dynamiques Cuivre-Acier et Cuivre-Graphite », Thèse de Doctorat en science, Université Frères Mentouri Constantine 1, Algérie.
- [37] S. Fayeulle, D. Treheux, N. Moncoffre, « Microstructure et frottement d'un acier à roulement implanté d'ions d'azote », *Journal de chimie physique*, 84, (1987), 335-340.
- [38] T.F.J. Quinn et al, « More developments in the oxidational theory of the midl wear of metals », *wear of materials, Dearborn Mich*, (1979), 1-11.
- [39] J. F. Archard, « Contact and rubbing of flat surfaces », *Appl. Phys.*, 34, (1953), 981-988.
- [40] H. A. Abdel-Aal, M. Nouari and M. El Mansori, « Influence of thermal conductivity on wear when machining titanium alloys », *Tribology International*, 42, (2009), 359–372.

- [41] J. M. Casstevens, H. G. Rylander et Z. eliezer, « Friction and wear properties of two types of cooper-graphite brushes under severe sliding conditions », *wear*, (1978), 333-348.
- [42] P. Cerri, « comparaison de l'usure de différents matériaux frottant d'un mouvement continu sur un support en cuivre, avec et sans passage du courant électrique entre les parties en contact », CETIM, I.S.M.C.M., (1958-1959).
- [43] K. Itoyama, G. Matsumoto, « formation process of crater structure of Ni and Cu contacts at breaking arcs », *I.E.E.E. transactions on components, hybrids, et manufacturing technology*, 4, (1981), 52-56.
- [44] R. Holm, « electric contacts », *springer-Verlag*, 4ème edition, (1967).
- [45] F. P. Bowden et D. Tabor, « friction and lubrication », tome II, *oxford*, (1964).
- [46] P. Senholzi, « tribological technology », series E, *Applied Science*, n° 56, Vol. 1, (1981).
- [47] W. Wayne Chen, Q. Jane Wang and W. Kim, « Transient thermo mechanical analysis of sliding electrical contacts of elastoplastic bodies, thermal softening, and melting inception », *ASME Journal of tribology*, 131, (2009), 1-10.
- [48] A. Bouchoucha, S. Chekroud and D. Paulmier, « Influence of the electrical sliding speed on friction and wear processes in an electrical contact copper–stainless steel », *Applied Surface Science*, 223, Issue 4, 29, (2004), 330-342.
- [49] ISO/TS CD 25178-2, « Geometrical Product Specification (GPS) – Surface Texture: Areal – Part 2. Terms, Definitions and Surface Texture Parameters », (2006).
- [50] E. Sura, M. El Mansori, T. Dal Negro, « Local-pressure control in belt finishing process: feasibility study and experimental validation », *Proceedings of the Second International Meeting of Abrasion*, ENSAM, Câlons en champagne, France, (2006).
- [51] A. Legendre, « Le materiau carbone », *edition Eyrolles*, 1992.
- [52] B. C. Brodie, « Sur le poids atomique du graphite », *Philosophical Transactions de la Royal Society*, Londres, 149, (1859), 249-259.
- [53] Y. Zhan, G. Zhang, « Friction and wear behavior of copper matrix composites reinforced with SiC and graphite particles », *Tribology Letters*, 17, (2004), 91-98.

- [54] Dieterich, J.H., Kilgore, B.D., «Direct observation of frictional contacts: new insights for state-dependent properties », *Pure and Applied Geophysics*, 143, (1994), 283-302.
- [55] A. Dubois-Salomon, « Chimie de l'état solide. Paris. Ed. Masson », p.250, (1978).
- [56] A. Bouchoucha, (1988), « Contribution à l'étude du comportement en frottement et usure du cuivre dans un contact dynamique cuivre-acier traversé par un courant électrique », Thèse de doctorat, INPL, Nancy, France.
- [57] J. Rochi, (2005), « Couplage entre modélisations et expérimentations pour étudier le rôle de l'oxydation et des sollicitations mécaniques sur la rhéologie et les débits de troisième corps solide cas de l'usure de contacts de géométrie conforme », Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon, France.
- [58] C. Wagner, H. Hammen, *Z. Phys. Chem*, vol. B40, p. 197, (1938).
- [59] P. Ochin, C. Petot, et G. Petot-Ervas, « Thermodynamic study of point defects in $\text{Cu}_2\text{-}\delta\text{O}$. Electrical conductivity measurements at low oxygen partial pressures », *Solid State Ionics*, 12, (1984), 135-143.
- [60] M. Yoshimura, A. Revcolevschi, J. Castaing, « Thermogravimetric Study of the Nonstoichiometry of Cuprite Cu_2O », *Journal of Materials Science*, 11, (1976), 384-386.
- [61] R. Haugrud, P. Kofstad, « On the oxygen pressure dependence of high temperature oxidation of copper », *Materials Science Forum*, 251, (1997), 65-72.
- [62] Y. D. Tretyakov, V. F. Komarov, N. A. Prosvirina, et I. B. Kutsenok, « Nonstoichiometry and defect structures in copper oxides and ferrites », *Journal of Solid State Chemistry*, 5, (1972), 157-167.
- [63] Y. Mouadji, (2013), « Effets du courant électrique sur le mécanisme de croissance de la couche d'oxyde à l'interface des contacts électrodynamiques cuivre-graphite et graphite-graphite », Thèse de Doctorat en science, Université Frères Mentouri Constantine 1, Algérie.

CHAPITRE II :
DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET
TECHNIQUE DE
CARACTERISATION

II. 1. Introduction

Un système tribologique se définit comme un système mécanique, formé de deux corps de matériaux en contact, animés de mouvement relatifs. Ces deux antagonistes évoluent dans une ambiance atmosphérique et peuvent être séparés par un film interfacial appelé troisième corps.

Bien que les efforts des tribologues pour modéliser de façon réaliste les phénomènes liés au frottement de deux corps en contact, la réalisation d'essais au laboratoire permet ; en effet de mettre en évidence l'influence des différents facteurs intervenant lors du frottement : le type de contact, la charge appliquée, la vitesse de glissement, l'atmosphère, l'état de surface, la nature du matériau...

La stratégie ou le choix d'une méthode d'essais tribologiques représentatifs du système réel devient une étape importante et inévitable pour la réussite de nos projets [1,2]. De ce fait, il s'agit de la méthode d'étude tribologique la plus courante. C'est le tribomètre de type pion-disque. Généralement, il est utilisé pour évaluer les performances tribologiques dans l'échelle du laboratoire [3].

Dans ce chapitre on expose le dispositif expérimental, les techniques de mesure, les matériaux utilisés, les techniques de caractérisation des pistes de frottement après expérience et le déroulement des essais.

II. 2. Dispositif expérimental**II. 2. 1. Tribomètre**

Les tests tribologiques sont conduits à l'aide de tribomètres qui peuvent travailler à l'air ambiant ou sous atmosphère contrôlée, avec ou sans lubrifiant. La figure II. 1 illustre un exemple de tribomètre de laboratoire de type pion-plan à mouvement linéaire alternatif. Les paramètres imposés sont généralement la pression ou la charge appliquée, la vitesse de glissement, type de matériaux, géométrie, humidité, etc. Les grandeurs mesurées sont généralement la force de frottement, la température des surfaces et l'usure [4].

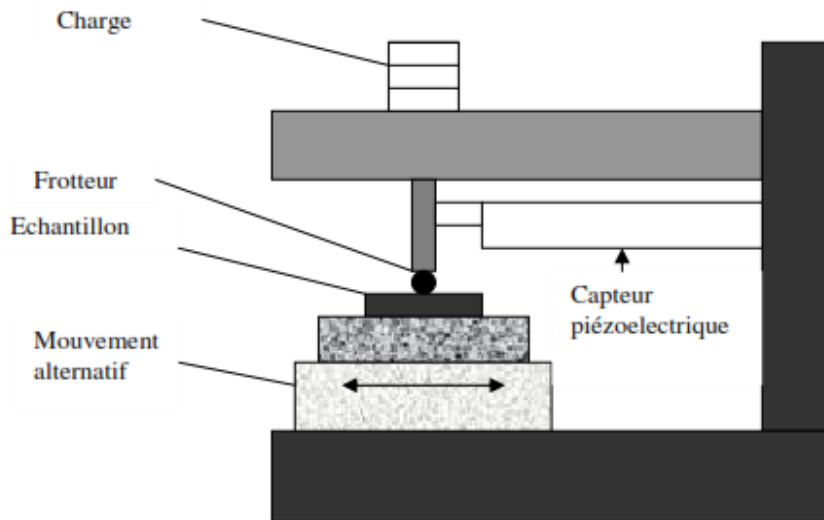


Figure II.1. Principe du tribomètre de laboratoire [5].

Le tribomètre pion-disque utilisé dans notre laboratoire se basé sur le même principe. Ce dernier effectue des tests mono-échantillons. On peut aussi utiliser pour des essais tribologiques avec des métaux ferreux, non ferreux, plastiques, céramique et composites. D'autre part, le tribomètre peut aussi accueillir un porte-échantillon au niveau du bras de charge en aluminium. Donc, il peut contenir pratiquement plusieurs formes d'échantillon.

Le pion, que l'on a utilisé, est de forme cylindrique fixé sur le bras de chargement à l'aide d'une vis de serrage. Il est facilement enlevé pour mesurer la perte de masse lors de l'essai de frottement, et permuter par un autre échantillon. Le pion a une longueur de 20 mm et 8 mm de diamètre.

Le disque est fixé sur un support qui fait tourner l'échantillon à des vitesses de rotations varie de 10 à 240 tours /minute. Cette rotation se fait à l'aide d'un moteur électrique. La variation de la vitesse de rotation est effectuée par un variateur de fréquence. Le disque a un 50 mm de diamètre et 5 mm d'épaisseur.

Le rayon de la piste de friction étant 20 mm. Donc, la vitesse linéaire V varie de 0,1 à 0,5 m/s. La charge normale P est transmise au support d'échantillon à l'aide des masses reposant sur l'extrémité du bras de charge. Le capteur de force enregistre la force de frottement produite par le contact dynamique entre les deux antagonistes.

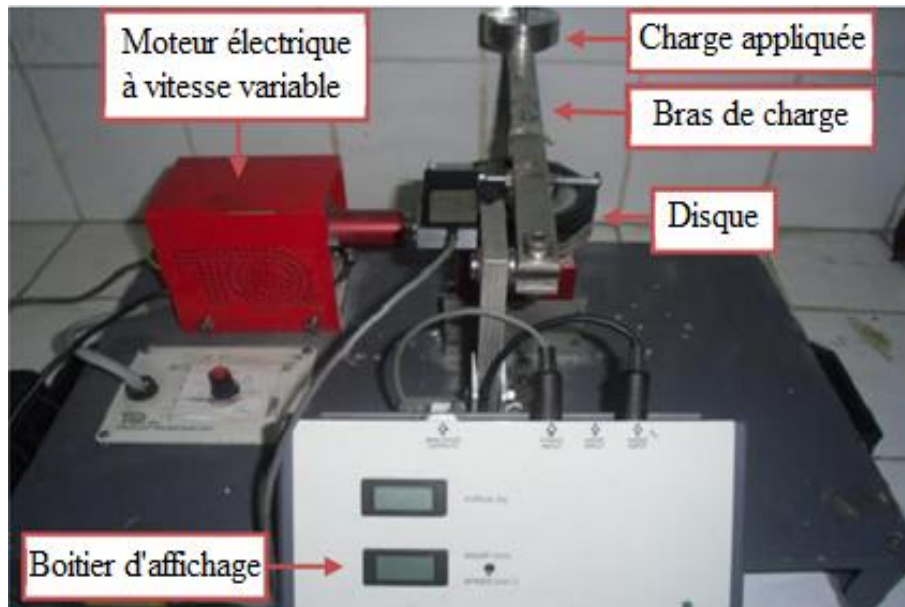


Figure II. 2. Dispositif expérimental.

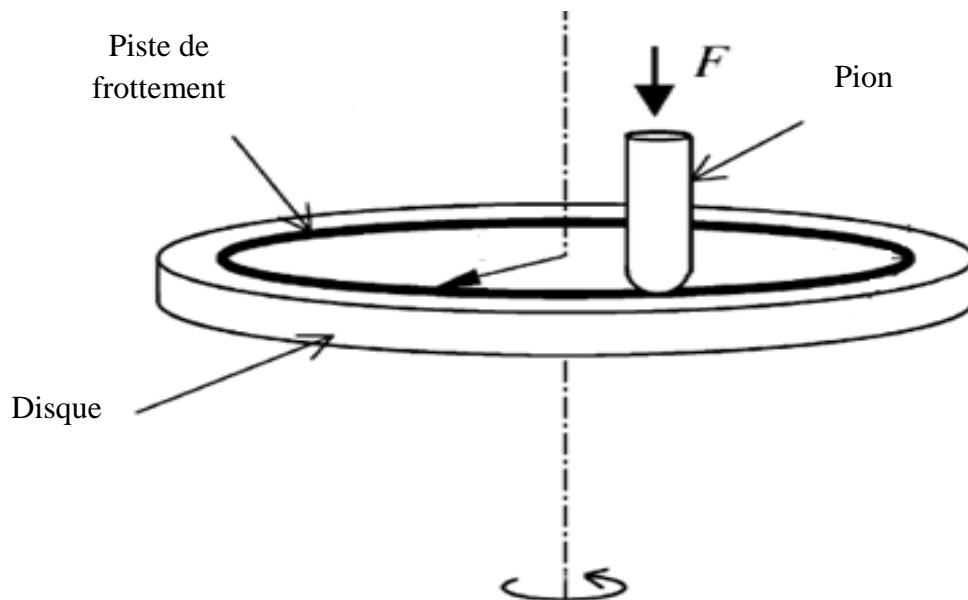


Figure II. 3. Contact pion-disque.

II. 2. 1. 1. Erreur du tribomètre

Pour calculer l'erreur du tribomètre, on doit utiliser la relation suivante :

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta P}{P} \quad (\text{II.1})$$

$\Delta F = 0,01$ [N] est l'erreur du capteur de force donné par le constructeur ;

$\Delta P = 10^{-5}$ [gr] est l'erreur de la balance.

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{0,01}{0,075} + \frac{10^{-5}}{15} = 0,13 \quad (\text{II.2})$$

Donc, l'erreur calculer du tribomètre à une valeur de 13%.

II. 2. 2. Passage du courant électrique

Pour étudier l'effet du courant électrique qui traverse l'interface des deux corps lors d'un contact dynamique, le tribomètre est adapté par isolation, pion et disque au reste du mécanisme, de sorte que l'échange électrique et thermique entre le pion et le disque seulement (Fig. II. 4).

Une alimentation électrique entraîne une circulation d'un courant continu à l'aide d'un générateur de courant. On utilisant un rhéostat pour permettre de donner une intensité du courant électrique constante traversant l'interface de contact. En mesurant l'intensité et la tension du courant traversant le pion à l'aide d'un ampèremètre et voltmètre respectivement pour calculer directement la résistance électrique de contact.

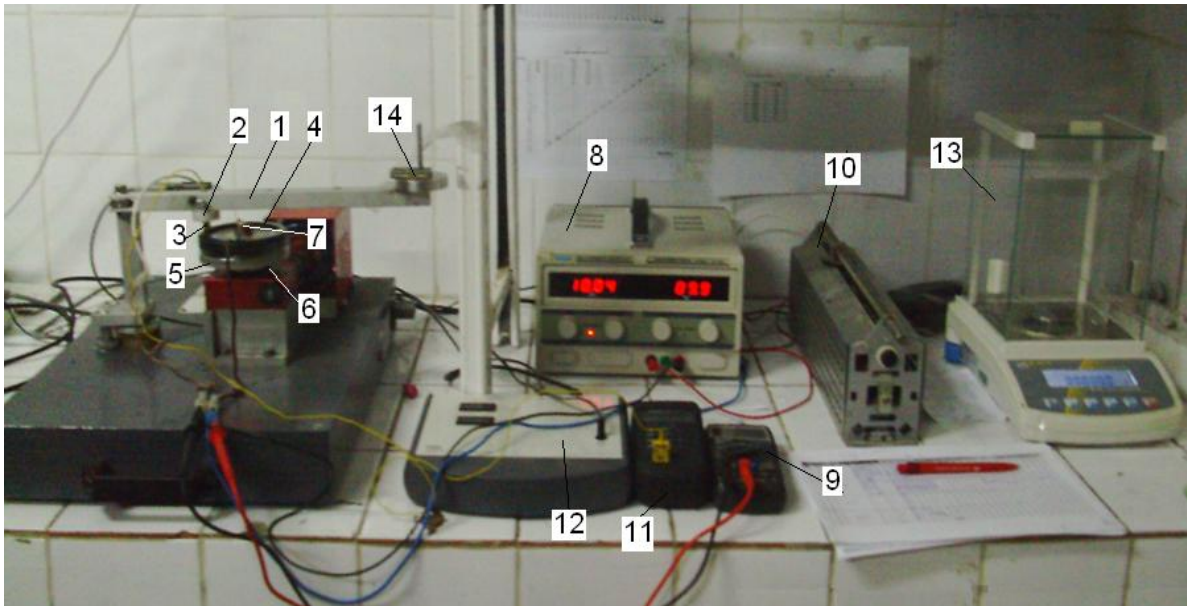


Figure II. 4. Vue générale du dispositif expérimental et de la chaîne de mesure [6],

1 bras, **2** isolant porte-pion en téflon, **3** pion, **4** disque, **5** isolant disque en téflon, **6** arbre du réducteur, **7** contact tournant à Hg, **8** alimentation en courant continu, **9** voltmètre, **10** rhéostat, **11** thermocouple, **12** capteur piézo-électrique, **13** balance de précision, **14** charge normale appliquée.

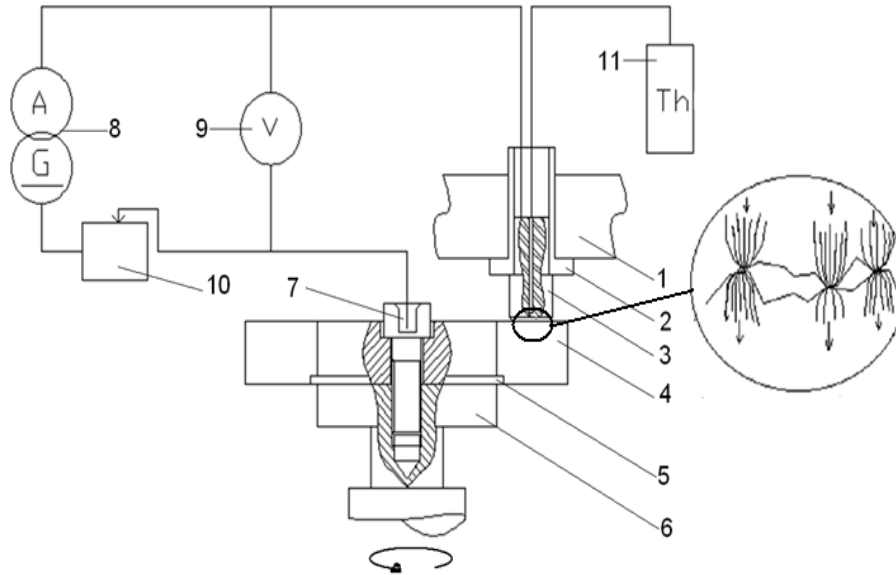


Figure II. 5. Chaîne cinématique du tribomètre et de la chaîne de mesure [6] :

1 bras, 2 isolant porte-pion en téflon, 3 pion, 4 disque, 5 isolant disque en téflon, 6 arbre du réducteur, 7 contact tournant à Hg, 8 alimentation en courant continu, 9 voltmètre, 10 rhéostat, 11 thermocouple.

II. 3. Techniques de mesure

II. 3. 1. Charge normale

D'après la disposition géométrique de la barre, la relation entre l'effort normal P et la charge normale p appliquée à l'extrémité du bras de charge est donnée par la relation suivante :

$$P = 2,3 p \tag{II.3}$$



Figure. II.6. Charges appliquées

II. 3. 2 Vitesse de glissement

Le moteur à courant continu du tribomètre muni d'un variateur de fréquence est assure la stabilité de la vitesse de rotation du disque. Pour une piste de rayon r choisi sur le disque et une gamme de vitesse de rotation ω allant de 10 à 240 tr/mn, la vitesse linéaire V est donnée par :

$$V = \omega \cdot r = 2\pi \cdot r \cdot N = \frac{\pi}{30} r \cdot N \quad (\text{II.4})$$

II. 3. 3. Coefficient de frottement

Le coefficient de frottement est le rapport entre l'effort tangentiel F et l'effort normal P . F est obtenu directement par un système d'acquisition (Fig. II. 4). On obtient l'évolution de la force de frottement en fonction du temps.

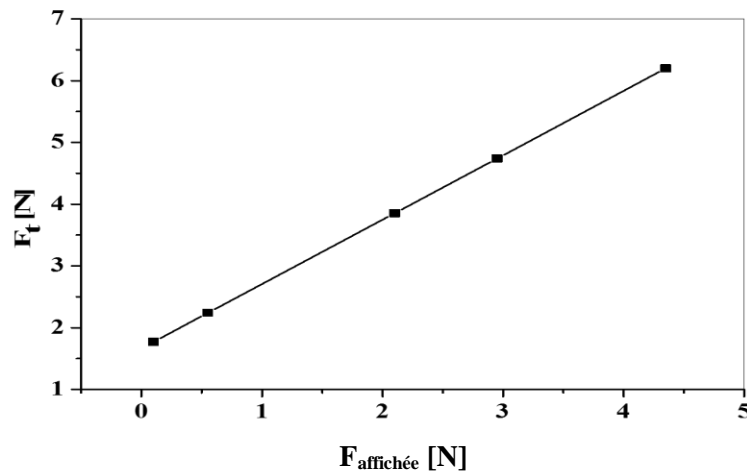


Figure II. 7. Courbe d'étalonnage de la force de frottement.

La force tangentielle F peut être calculée par la relation :

$$F = 1,041667(F_{\text{affichée}} - 0,8) + 2,5 \quad (\text{II.5})$$

Le coefficient de frottement est défini par :

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

II. 3. 4. Usure du pion

Un système tribologiques est constitué de deux corps en contact dans une configuration donnée et du troisième corps produit à l'interface du contact par usure. Ce

troisième corps est généralement constitué des débris d'usure qui nous aident à interpréter le comportement du contact.

En utilisant dans cette étude la méthode de pesage pour évaluer l'usure ou la quantité de masse perdue des pions. L'échantillon ou le pion est bien nettoyé puis pesé à l'aide d'une balance sensible de précision 10^{-5} g avant et après chaque essai (Fig. II. 8). La différence entre les deux pesées donne directement l'usure qu'on a exprimée dans notre texte en gramme :

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



Figure II. 8. Microbalance précise à 10^{-5} g.

II. 3. 5. Température de contact

Pour mesurer la température générée par frottement au cours de l'essai, on a utilisé un couple thermoélectrique, d'une façon, à introduire un thermocouple dans un trou de type K situé sous la surface du pion (à 2 mm derrière la surface de frottement (Fig. II. 9)). La température relevée n'est pas exactement celle de la surface de contact, mais c'est un bon indicateur.

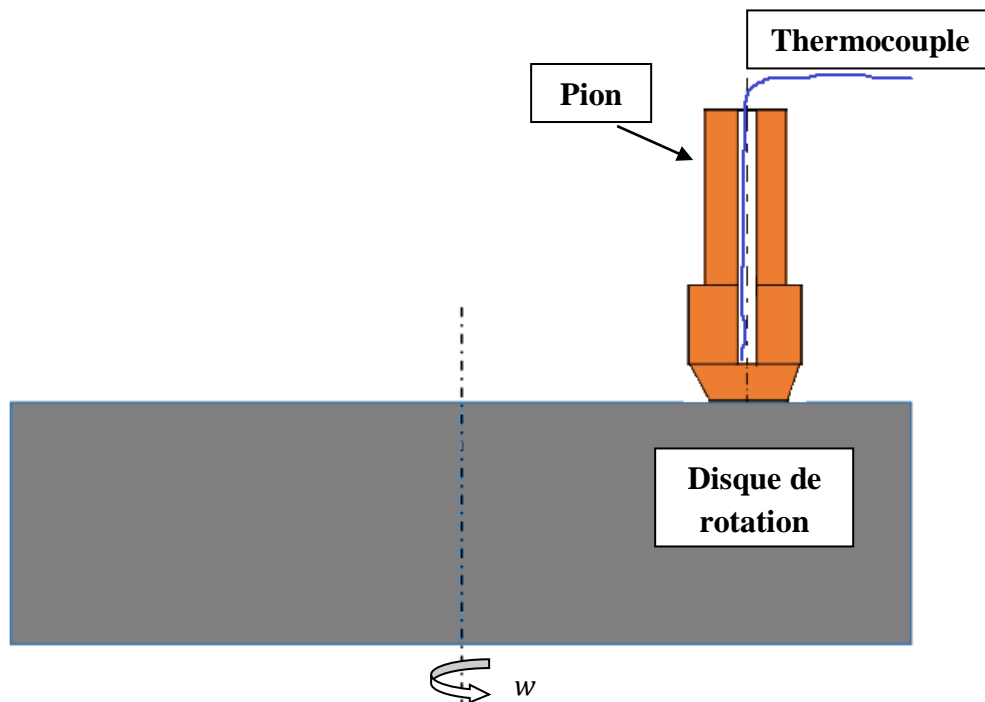


Figure II. 9. Méthode expérimentale de mesure de la température.

II. 4. Matériaux utilisés

II. 4. 1. Disque

Le disque est en graphite (brush of carbon DE9000). Ce type de graphite est utilisé dans les moteurs électriques.

II. 4. 2. Pion

Il est en cuivre pur à 99,9%, bon conducteur de la chaleur et d'électricité. Sa structure CFC le laisse élastique et ductile, facilement déformable à froid, sa recristallisation commence vers 220°C.

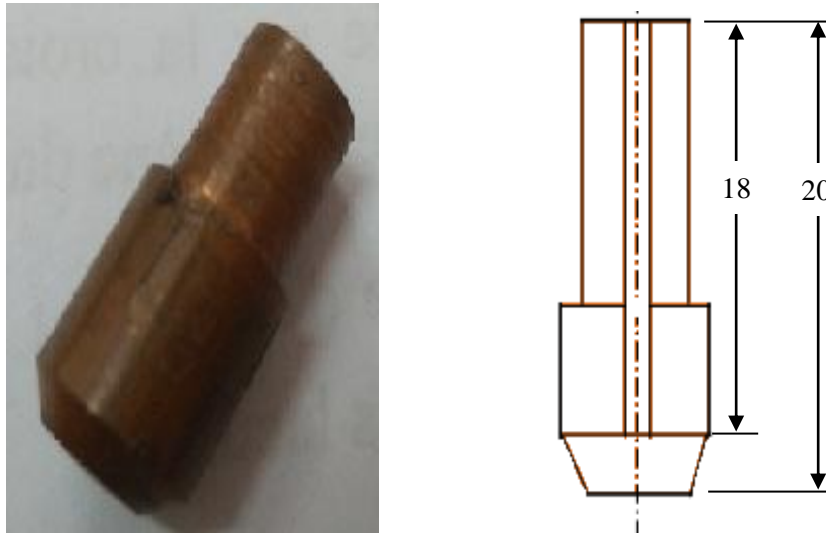


Figure II. 10. Echantillon du pion.

D'autre part, et à l'aide d'une polisseuse équipée par un système arrosage d'eau, on doit polir le disque et le pion après chaque essai de frottement par un papier abrasif de grade 1500 pour rendre les surfaces uniformes. Le tableau II.1 récapitule les caractéristiques mécaniques et thermiques de ces deux matériaux.

	Cuivre	Graphite
Masse volumique [kg/m^3]	8900	1680
Conductivité thermique [$\text{w}/(\text{m.K})$]	385,8	114
Chaleur spécifique [$\text{J}/(\text{kg.K})$]	384	754
Dureté	56 HV	72 Shore
Résistivité électrique [$\Omega.\text{m}$]	$1,72.10^{-8}$	$5,1.10^{-5}$
Limite élastique [MPa]	69	76
Module de Young [N/m^2]	124.10^9	$27,6.10^9$
Coefficient de Poisson	0,33	0,23

Tableau II. 1. Caractéristiques des matériaux utilisés.

II. 5. Techniques de caractérisation

Pour suivre l'évolution de l'état de surface des couples tribologiques, et après chaque essai, on a utilisé plusieurs techniques pour faire des observations des échantillons.

II. 5. 1. Microscope optique

Le microscope optique G-120A est un instrument essentiel de caractérisation qui permet de donner et d'analyser l'état de surface avant et après l'essai. Adopter des systèmes d'éclairage verticaux coaxiaux, pour éliminer la lumière parasite, améliorant ainsi grandement le contraste de l'image (contraste) et la netteté.

Cette technique permet d'avoir une première idée sur les différences évidentes des pistes de contacts apparaissent en fonction des conditions de frottement.



Figure II. 11. Microscope optique G-120A.

II. 5. 2. Microscope Electronique à Balayage (MEB + EDS)

Les observations ont été réalisées sur un MEB de type ZEISS EVO-MA25 (Figure II. 12) et analyser la composition des films de surface par EDS de type X-MAN^N 80. Le microscope électronique à balayage fournit des informations sous forme d'images lumineuses résultant de l'interaction d'un faisceau d'électrons avec un volume microscopique de l'échantillon étudié. Il est constitué d'une enceinte sous vide secondaire où un faisceau électronique est mis en forme par des lentilles électromagnétiques pour exciter l'objet à étudier. Le faisceau d'électrons est focalisé sur la surface de l'échantillon sous forme d'une tache, se déplaçant ligne par ligne de façon à balayer une surface rectangulaire.



Figure II. 12. Microscope Electronique à Balayage (ZEISS EVO/MA 25).

II. 6. Conditions d'essais

Sur un tribomètre pion-disque, on a effectué des essais de frottement afin de comprendre les mécanismes et les phénomènes intervenant dans contact entre les couples tribologique cuivre-graphite et graphite-graphite. Dans le tableau suivant, on a récapitulé les différents conditions d'essai effectuées.

Contact	Plan : surface de base du pion / disque plan.
Mouvement	Sollicitation continue du pion ; Circulaire en rotation du disque.
ambiance	Température ambiante de laboratoire varie entre 20° et 25°C.
Charge normale	De : 5 N; 10 N; 15 N; 20 N et 30 N.
Vitesse de glissement	De : 0,1 à 0,5 m/s par pas de 0,1 m/s.
Intensité du courant électrique	De : 3 A; 6 A; 8 A et 10 A.
Durée d'essai	30 minutes

Tableau II. 2. Conditions de l'expérience.

II. 7. CONCLUSION

Pour obtenir des résultats fiables, on était obligé d'isoler l'instrument de mesure et le couple de matériau thermiquement et électriquement. De plus, on a présenté les caractéristiques des matériaux utilisés, les techniques de caractérisations et les conditions de déroulement des essais.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] J.Paulo Davim, R. Cordoso, « Effect of the reinforcement (carbon or glass fibers) on friction and wear behavior of PEEK against steel surface at long dry sliding », *Wear*, 266, (2009), 795-799.
- [2] Chunxia Li, Fengyan Yan, « A comparative investigation of the wear behavior of PTFE and PI under dry sliding and simulated sand dust conditions », *Wear*, 266, (2009), 632-638.
- [3]: E.M. Bortoleto and Al, « Experimental and numerical analysis of dry contact in the pin on disc test », *Wear*, 301, (2013), 19-26.
- [4] P. Pollet, « Usinabilité en fraisage d'un acier 42CrMo4 traité calcium », mémoire de PFE, (2000), ENSAM de Metz.
- [5] A. Sebhi, (2013), « Etude tribologique des outils de coupe et aciers », Thèse de doctorat en science, Université Ferhat Abbès, Sétif, Algérie.
- [6] Y. Mouadji, (2013), « Effets du courant électrique sur le mécanisme de croissance de la couche d'oxyde à l'interface des contacts électrodynamiques cuivre-graphite et graphite-graphite », Thèse de Doctorat en science, Université Frères Mentouri Constantine 1, Algérie.

CHAPITRE III :
ETUDE THERMOMECHANIQUE
DES COUPLES TRIBOLOGIQUES
SANS PASSAGE DU COURANT
ELECTRIQUE

III. 1. Introduction

Les matériaux en frottement sec à une ambiance atmosphérique est l'un des problèmes les plus anciens rencontrés par l'homme. Il est un processus très complexe lié à des facteurs mécaniques, thermiques, physico-chimiques, métallurgiques ... etc.

Le comportement tribologique et thermique des couples de matériaux glissants cuivre-graphite et graphite-graphite sont étudiés en fonction des paramètres mécaniques (charge normale, vitesse de glissement et temps d'essai). Les essais ont été réalisés, dans une ambiance atmosphérique, en utilisant un tribomètre de type pion-disque. Cinq efforts normaux et cinq vitesses de glissement ont été appliqués pour cette étude.

L'objectif de ce chapitre est de mettre en évidence, l'effet des paramètres mécaniques sur le comportement tribologique et thermique des couples mentionnés précédemment.

De nombreuses études [1] et les résultats expérimentaux montrent que le coefficient de frottement, la température de contact et l'usure dépendent largement de la charge normale, la vitesse de glissement, le type des matériaux...etc. La discussion des résultats repose sur des observations au microscope optique et microscope électronique à balayage et des phénomènes interfaciaux résultant du frottement.

III. 2. Résultats expérimentaux

On a effectué plusieurs essais de frottement sec sur le tribomètre pour les deux couples de matériaux cuivre-graphite et graphite-graphite sans passage du courant électrique, en faisant varier les paramètres mécaniques (charge appliquée et vitesse de glissement). On a obtenu les résultats expérimentaux suivants :

III. 2. 1. Evolution du coefficient de frottement

III. 2. 1. 1. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps d'essai

L'examen de la figure III. 1 montre l'existence de deux régimes de frottement des couples cuivre-graphite et graphite-graphite en fonction du temps d'essai, pour une charge appliquée de $P = 20 \text{ N}$ et une vitesse de glissement fixée à $0,5 \text{ m/s}$:

- régime 1 : caractérisé par une augmentation brusque du coefficient de frottement (période de rodage) qui dure de 1 à 3 minutes ;

- régime 2 : plus ou moins stable à cause de la stabilité des conditions de fonctionnement à l'interface (nombre de particules d'usure arrachées devient constant) [2].

Le couple cuivre-graphite, montre que la courbe de frottement enregistrée est caractérisée par une étape transitoire reliée par un régime stable qui tend à se stabiliser à une valeur du coefficient de frottement de 0,24. Pour le couple graphite-graphite, le coefficient de frottement se stabilise autour d'une valeur inférieure à 0,18.

Toutes les charges appliquées sont supportées par les irrégularités de surface qui constituent la surface réelle de contact. L'augmentation brusque du coefficient de frottement (période de rodage) est due à l'enchevêtrement des aspérités à cause de la surface rugueuse du matériau, et conduit à un mécanisme de frottement plus adhésif. Ce qui peut conduire à un coefficient de frottement plus élevé [3].

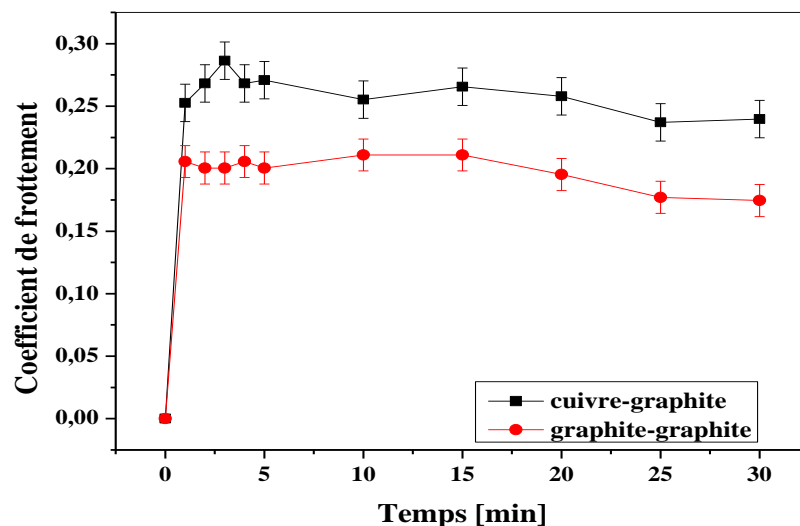


Figure III.1. Variation du coefficient de frottement en fonction du temps pour les deux couples pour $P = 20 \text{ N}$ et $V = 0,5 \text{ m/s}$.

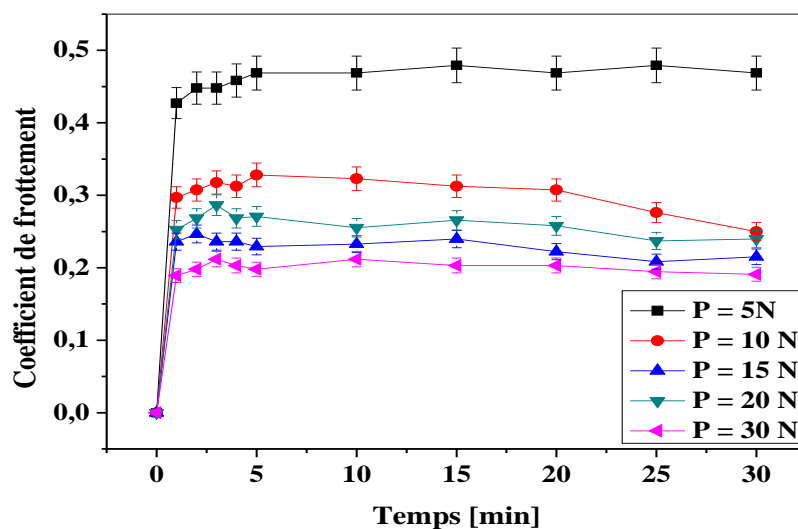
III. 2. 1. 2. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps pour différentes charges normales

La figure III. 2 présente la variation du coefficient de frottement en fonction de la durée du frottement, avec une vitesse de glissement de 0,5 m/s sous différentes charges normales pour le couple cuivre-graphite et le couple graphite-graphite. Pour une charge normale de 5 N, on observe que pendant la phase initiale de frottement, la valeur du

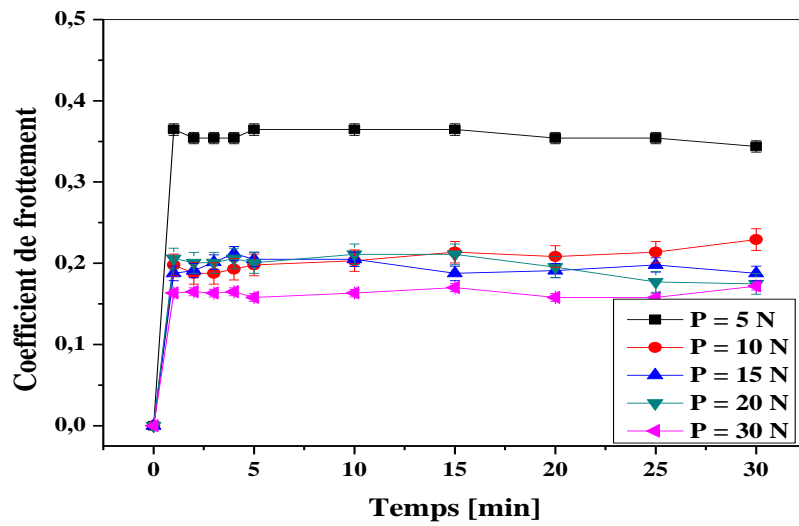
coefficient de frottement est 0.427 puis augmente très progressivement jusqu'à 0.47 pour une durée de 20 minutes de frottement et après cela, il reste constant pour le reste du temps expérimental.

La figure III. 3 illustre une comparaison de la variation du coefficient de frottement pour les deux couples des matériaux en fonction de la charge normale avec une vitesse de glissement de 0,5 m/s. On constate que le coefficient de frottement varie de 0,473 à 0,192 et de 0,348 à 0,164 avec la variation de la charge normale de 5 à 30 N pour le couple cuivre-graphite et le couple graphite-graphite respectivement. Ces résultats montrent que, lorsque la valeur de la charge appliquée est 5 N, le coefficient de frottement est au maximum pour les deux couples de matériau. Après cette valeur, le coefficient de frottement diminue rapidement de 5 à 15 N puis plus légèrement jusqu'à 30 N [4]. L'adaptation mutuelle des deux surfaces en contact et la quantité de débris d'usure enlevé sont responsables de la diminution de la friction [5, 6] avec l'augmentation de la charge normale.

A partir de cette figure, on constate également que dans des conditions identiques, les valeurs de coefficient de frottement du couple cuivre-graphite sont supérieures à celles du couple graphite-graphite.



(a)



(b)

Figure III. 2. Variation du coefficient de frottement en fonction du temps pour les couples (a) cuivre-graphite (b) graphite-graphite avec : $V = 0,5$ m/s.

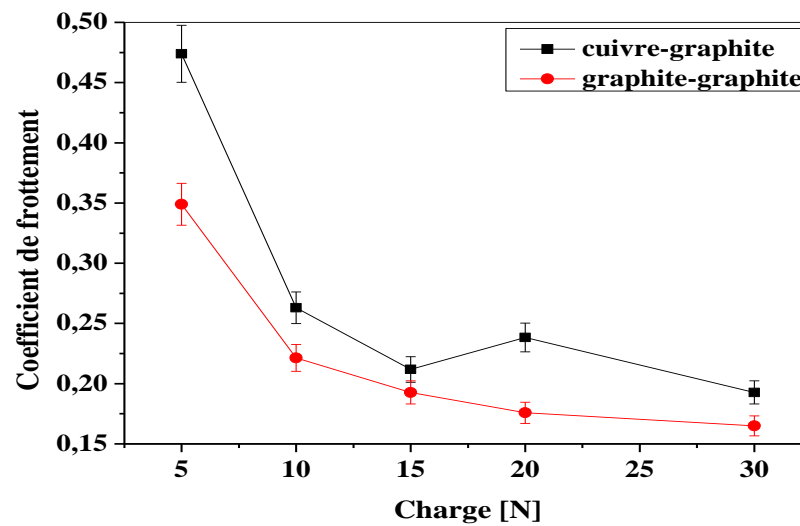
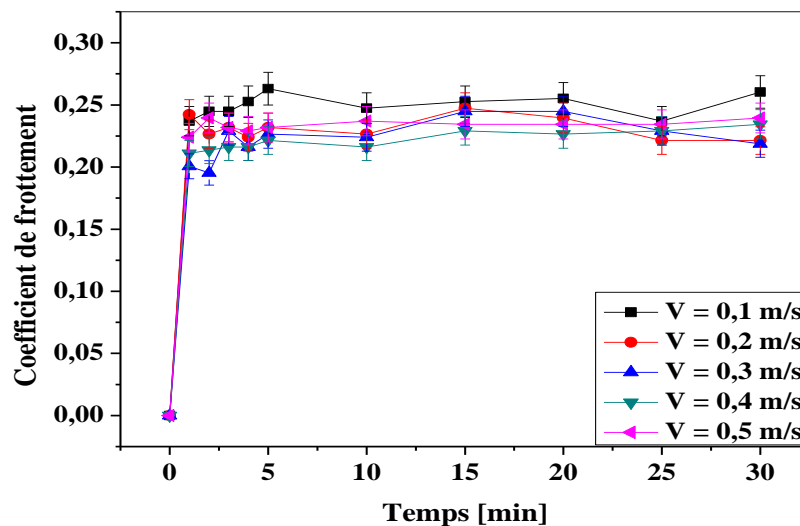


Figure III. 3. Variation du coefficient de frottement en fonction de la charge appliquée pour les deux couples avec : $V = 0,5$ m/s.

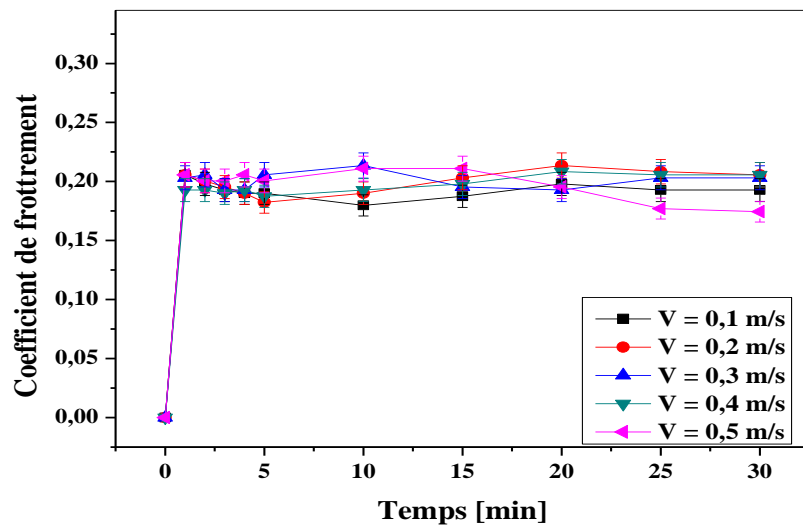
III. 2. 1. 3. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps pour différentes vitesses de glissement

La figure III. 4 présente la variation du coefficient de frottement en fonction du temps d'essai sous différentes vitesses de glissement pour les couples des matériaux cuivre-graphite et graphite-graphite à une charge normale constante de 20 N. Il est constaté que, le coefficient de frottement n'est pas tellement influencé par la vitesse de glissement. Ceci confirme que le coefficient de frottement est indépendant de la vitesse de glissement dans le cas des bas régimes ($V \leq 0,5$ m/s). Le coefficient de frottement à $V = 0,1$ m/s se stabilise autour de 0,25 pour le couple cuivre-graphite et 0,19 pour le couple graphite-graphite.

La figure III. 5 illustre la variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement sans passage du courant électrique. On constate qu'il y a une légère variation du coefficient de frottement pour les deux couples de matériaux. Pour le couple cuivre-graphite, le coefficient de frottement diminue légèrement de 0,24 à 0,22, et reste presque inchangé de 0,192 à 0,197 pour le couple graphite-graphite.



(a)



(b)

Figure III. 4. Variation du coefficient de frottement en fonction du temps pour les couples (a) cuivre-graphite (b) graphite-graphite avec : $P = 20$ N.

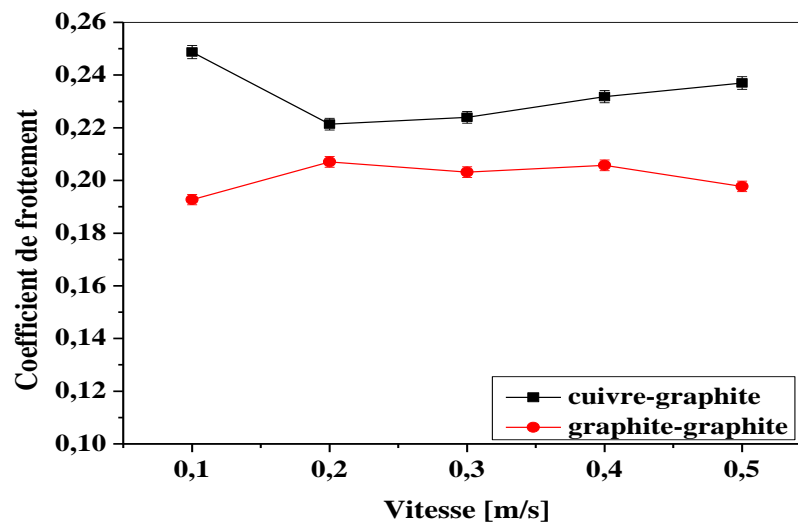


Figure III. 5. Variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement pour les deux couples avec : $P = 20$ N.

III. 2. 1. 4. Modélisation du coefficient de frottement

On va calculer le coefficient de frottement d'après le modèle proposé par Bowden et Tabor qui est prend en compte la plasticité des surfaces en frottement mécanique. Le coefficient de frottement théorique est calculé par l'équation :

$$\mu_{th} = \frac{1.5 \tau_{max} A_r}{P} \tag{III.1}$$

avec τ_{max} est la contrainte maximale de cisaillement.

$$A_r = \pi a^2 = \left(\frac{3PR}{4E^*}\right)^{1/3} \tag{III.2}$$

$$\text{Avec } \frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \tag{III.3}$$

En utilisant les résultats du τ_{max} [7], on trouve :

- Le couple cuivre-graphite

P [N]	a [mm]	A_r [mm²]	τ_{max} [MPa]	μ_{exp}	μ_{th}	Δμ/μ
5	0,0937	0,027	35,42	0,474	0,286	0,39
10	0,118	0,044	35,02	0,263	0,231	0,12
15	0,134	0,056	46,63	0,212	0,261	0,18
20	0,146	0,067	54,58	0,238	0,274	0,13
30	0,170	0,091	78,49	0,193	0,357	0,45

Tableau III. 1. Présentation du coefficient de frottement, expérimental et théorique, en fonction de la charge appliquée du couple cuivre-graphite.

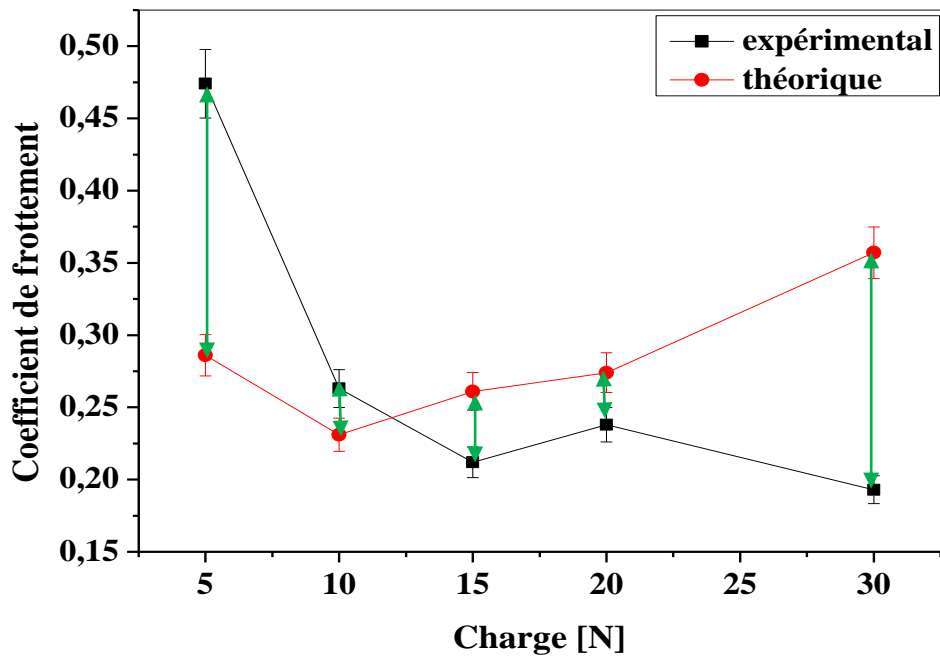


Figure III. 6. Confrontation du modèle expérimental et théorique en fonction de la charge appliquée du couple cuivre-graphite.

- Le couple graphite-graphite

P [N]	a [mm]	A_r [mm ²]	τ_{max} [MPa]	μ_{exp}	μ_{th}	$\Delta\mu/\mu$
5	0,094	0,028	30,23	0,349	0,253	0,27
10	0,119	0,045	38,69	0,221	0,261	0,15
15	0,135	0,058	46,01	0,193	0,266	0,27
20	0,151	0,072	55,10	0,176	0,297	0,40
30	0,173	0,094	66,05	0,165	0,310	0,46

Tableau III. 2. Présentation du coefficient de frottement, expérimental et théorique, en fonction de la charge appliquée du couple graphite-graphite.

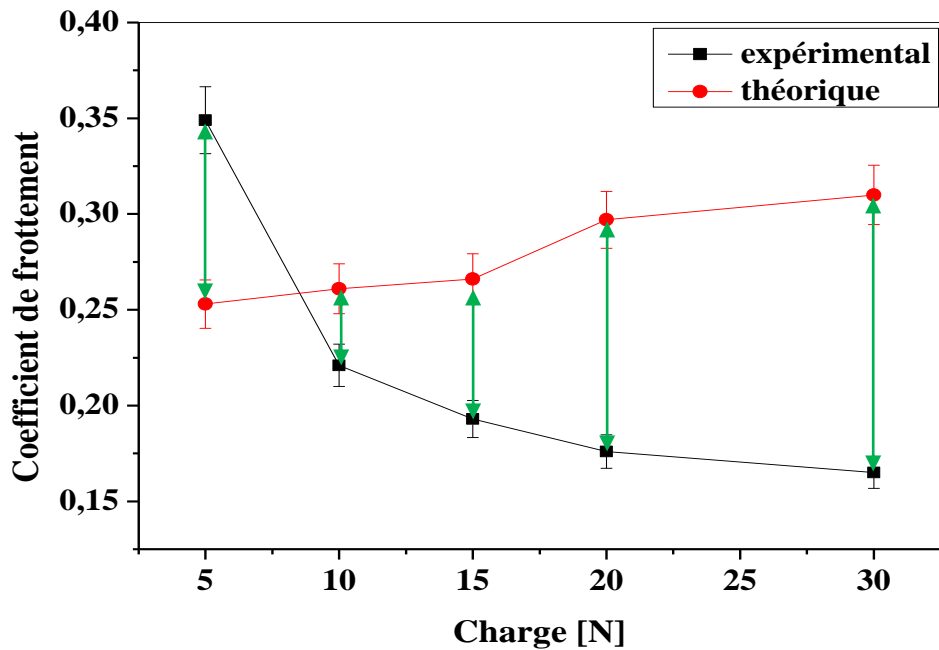


Figure III. 7. Confrontation du modèle expérimental et théorique en fonction de la charge appliquée du couple graphite-graphite.

Les deux courbes, expérimentale et théorique du couple cuivre-graphite, illustrés par la figure III. 6 se croisent à une valeur de $P = 12$ N. Et l'erreur relative se situe entre 12 % et 45 % pour une valeur de $P \geq 10$ N. La figure III. 7 du couple graphite-graphite illustre, pour une charge varie entre 10 N et 30 N, une erreur relative comprise entre 27 % et 46 %. On observe aussi qu'il y a un croisement à la valeur $P = 8$ N.

III. 2. 2. Evolution du taux d'usure

III. 2. 2. 1. Evolution du taux d'usure en fonction de la charge appliquée

Les différents mécanismes d'usure développés dépendent de la charge normale et la vitesse de glissement [4]. Des rayures de surface et des particules d'adhésion sont observées sur les surfaces usées par un microscope optique (Fig. III. 9). Les débris d'usure sont sous forme de poudre noire ou des particules métalliques avec différentes morphologies, variant des particules irrégulières aux formes plus ou moins régulières comme l'illustre la figure III. 9.

Les variations du taux d'usure avec charge normale sont présentées par la figure III. 8. Les résultats montrent que le taux d'usure du couple cuivre-graphite varie de $0,2 \cdot 10^{-3}$ à $0,39 \cdot 10^{-3}$ mg/m et de $0,3 \cdot 10^{-3}$ à $0,57 \cdot 10^{-3}$ mg/m pour le couple graphite-graphite avec variation de la charge normale de 5 à 30 N respectivement. L'usure augmente linéairement en fonction de la charge normale et le volume usé est sensiblement proportionnel à la charge où l'usure croit considérablement pour les deux couples en contact [8].

A partir de la figure III. 8, on constate également que dans des conditions identiques, les valeurs du taux d'usure du couple cuivre-graphite sont inférieures à celles du couple graphite-graphite. Cela est dû au fait que les surfaces rugueuses s'usent généralement plus rapidement.

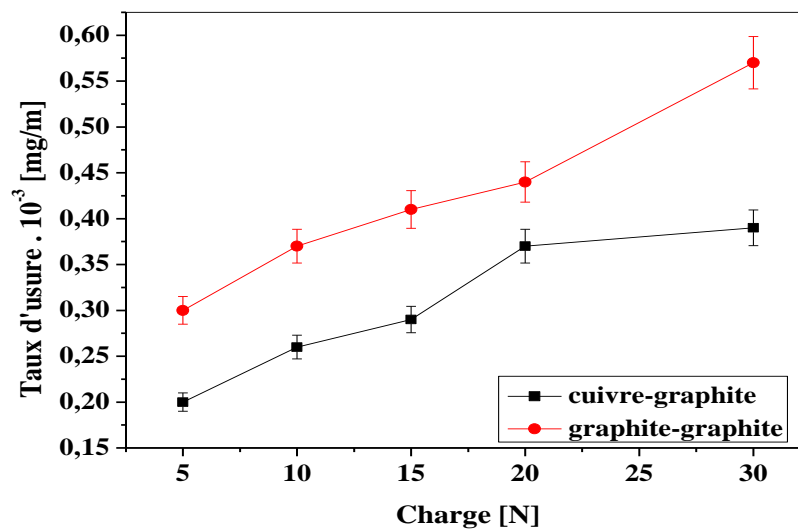


Figure III. 8. Variation de l'usure en fonction de la charge appliquée pour les deux couples avec : $V = 0,5$ m/s.

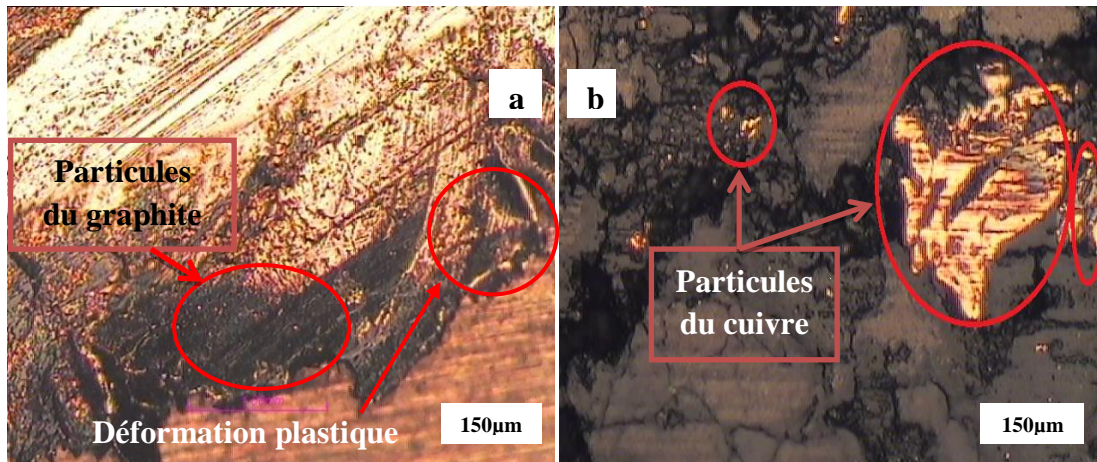


Figure III. 9. Image obtenue au microscope optique ($40\times$) de la surface usée pour $P = 20\text{ N}$ et $V = 0,5\text{ m/s}$: (a) pion en cuivre, (b) disque en graphite.

III. 2. 2. 2. Evolution du taux d'usure en fonction de la vitesse de glissement

Les variations du taux d'usure en fonction de la vitesse de glissement avec une charge normale appliquée de 20 N pour les deux couples cuivre-graphite et graphite-graphite sont également observées dans cette étude et les résultats sont présentés sur la figure III. 10. Ces résultats indiquent que le taux d'usure varie de $0,6.10^{-3}$ à $0,43.10^{-3}\text{ mg/m}$ et de $0,71.10^{-3}$ à $0,44.10^{-3}\text{ mg/m}$ avec la variation de la vitesse de glissement de 0,1 à 0,5 m/s pour les couples cuivre-graphite et graphite-graphite respectivement. On observe que le taux d'usure diminue avec l'augmentation de la vitesse de glissement pour ces deux paires de matériaux. De cette figure, il est également révélé que dans des conditions identiques, les valeurs du taux d'usure du couple cuivre-graphite sont inférieures à celles du couple graphite-graphite.

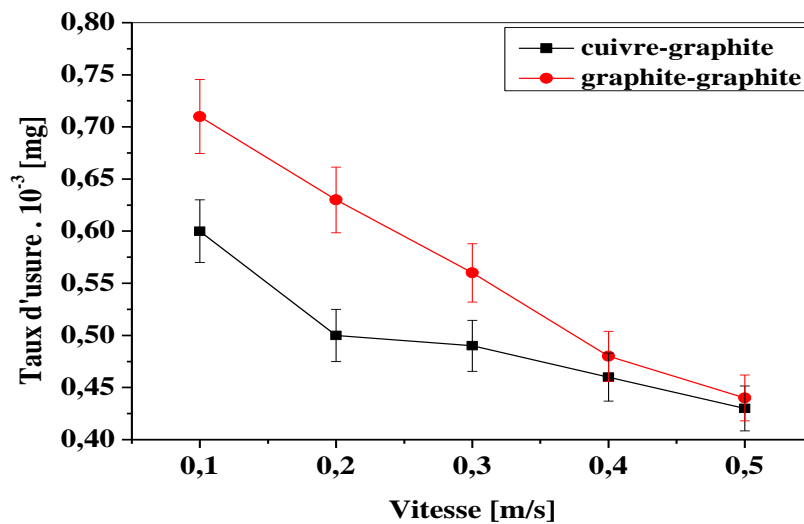


Figure III. 10. Variation de l'usure en fonction de la vitesse de glissement des deux couples pour $P = 20$ N.

III. 2. 3. Evolution de la température de contact à l'interface

III. 2. 3. 1. Evolution de la température de contact en fonction du temps d'essai

Le comportement en frottement et l'évolution de la température de contact en fonction du temps d'essai pour plusieurs charges normales et vitesse de glissement sont enregistrés.

Les températures de contact mesurées sont obtenues par un thermocouple de type K placé à 2 mm derrière la surface de frottement coté pion. Ces mesures sont des températures au voisinage de la surface de contact, car il est impossible de s'approcher suffisamment de l'interface de contact mais on peut considérer que la température de contact mesurée est une température moyenne de la surface apparente du pion.

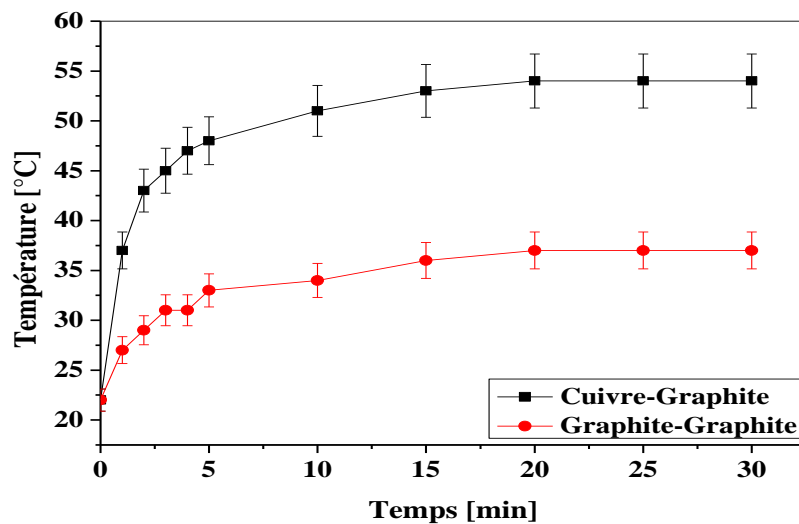
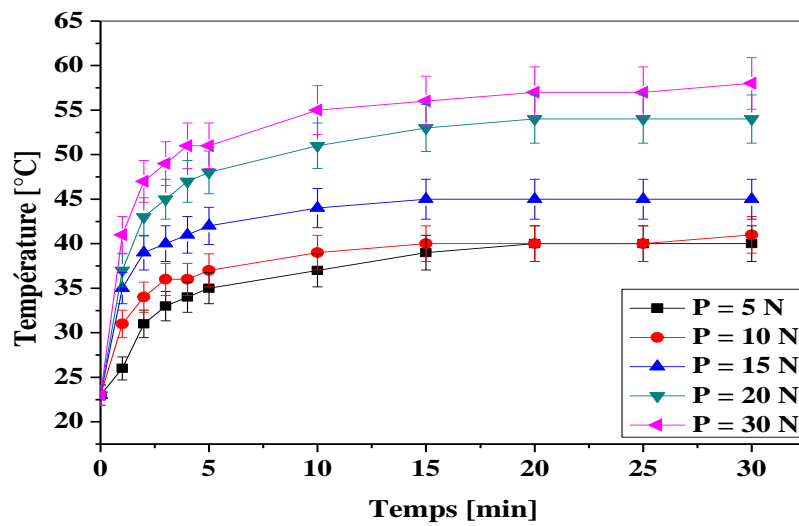


Figure III. 11. Variation de la température de contact à 2 mm de l'interface en fonction du temps pour les deux couples avec $P = 20$ N et $V = 0,5$ m/s.

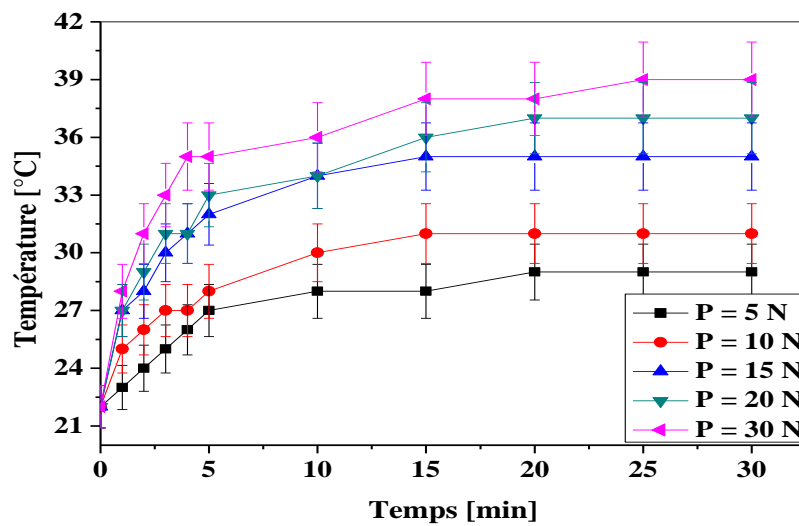
III. 2. 3. 2. Evolution de la température de contact en fonction du temps pour différentes charges appliquées et vitesse de glissement

Les figures III.12 et III.13 représentent la variation de la température de contact en fonction du temps pour différentes charges normales, vitesses de glissement et la nature des matériaux en contact sec dans une ambiance atmosphérique. La variation de la température de frottement évolue durant les premières minutes, pour se stabiliser ensuite à des valeurs selon la charge normale appliquée et la vitesse de glissement.

Les valeurs moyennes mesurées de la température au voisinage de la surface de contact se stabilisent après un régime transitoire. Cette stabilisation est liée à la stabilisation du coefficient de frottement. De plus, la figure présente une allure moins de fluctuations.

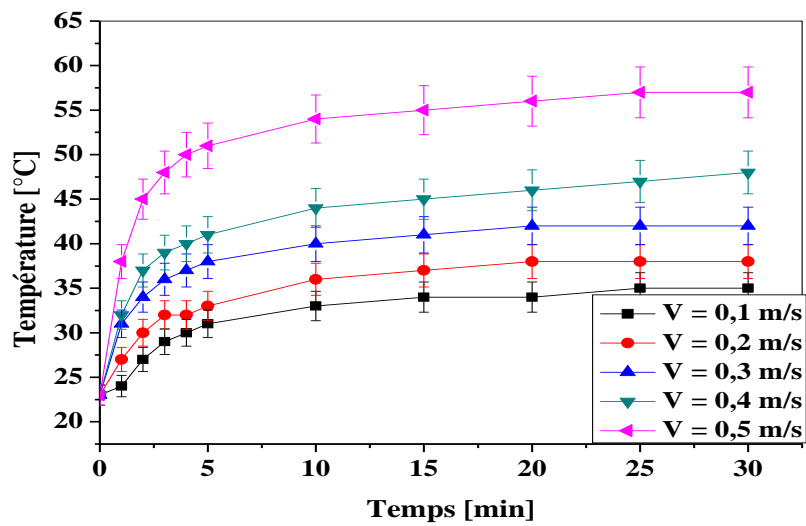


(a)

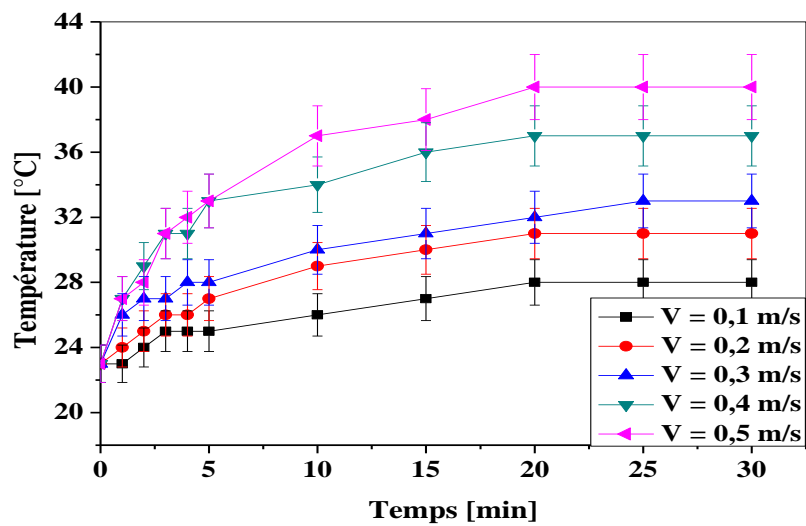


(b)

Figure III. 12. Variation de la température de contact à 2 mm de l'interface en fonction du temps pour les couples (a) cuivre-graphite (b) graphite-graphite avec : $V = 0,5$ m/s.



(a)



(b)

Figure III. 13. Variation de la température de contact à 2 mm de l'interface en fonction du temps pour les couples (a) cuivre-graphite (b) graphite-graphite avec : $P = 20$ N.

III. 2. 3. 3. Evolution de la température de contact en fonction de la charge appliquée et la vitesse de glissement

Les résultats expérimentaux obtenus sont illustrés dans les figures III. 14 et III. 15 montre que la température de contact augmente avec l'augmentation de la charge normale

appliquée et atteint une valeur maximale de 58 °C pour le couple de matériaux cuivre-graphite et 39 °C pour le couple graphite-graphite.

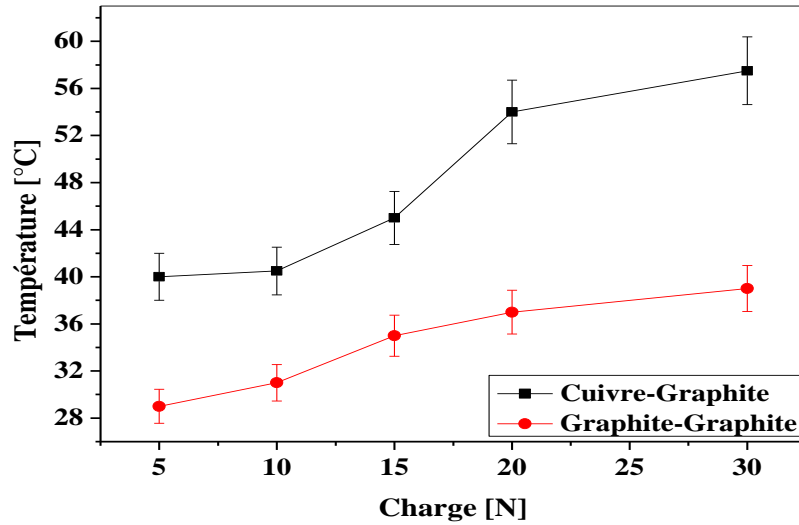


Figure III. 14. Variation de la température de contact à 2 mm de l'interface en fonction de la charge appliquée pour les deux couples avec : $V = 0,5$ m/s.

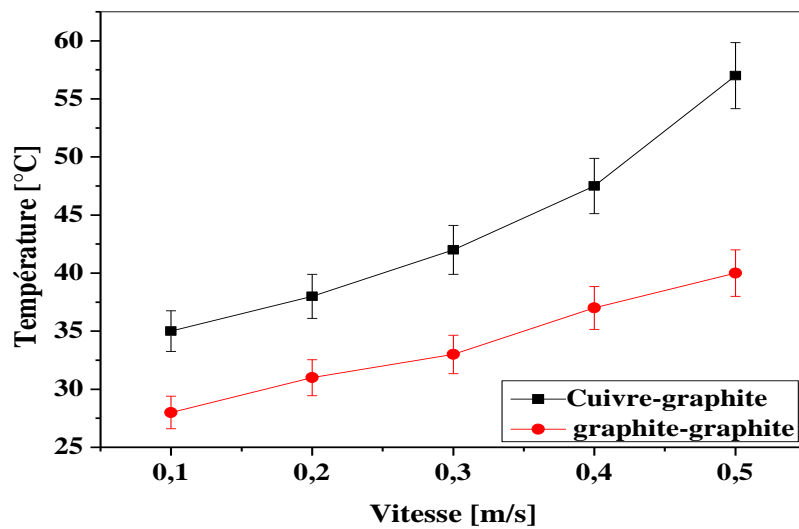


Figure III. 15. Variation de la température de contact à 2 mm de l'interface en fonction de la vitesse de glissement pour les deux couples avec : $P = 20$ N.

III. 2. 4. Evolution de l'énergie dissipée au niveau du contact

III. 2. 4. 1. Evolution de l'énergie dissipée en fonction de la charge appliquée

La figure III. 16 illustre l'évolution de l'énergie dissipée par frottement mécanique au niveau du contact en fonction de la charge appliquée. On trouve que, l'énergie dissipée augmente avec l'augmentation de la charge pour les deux couples cuivre-graphite et graphite-graphite.

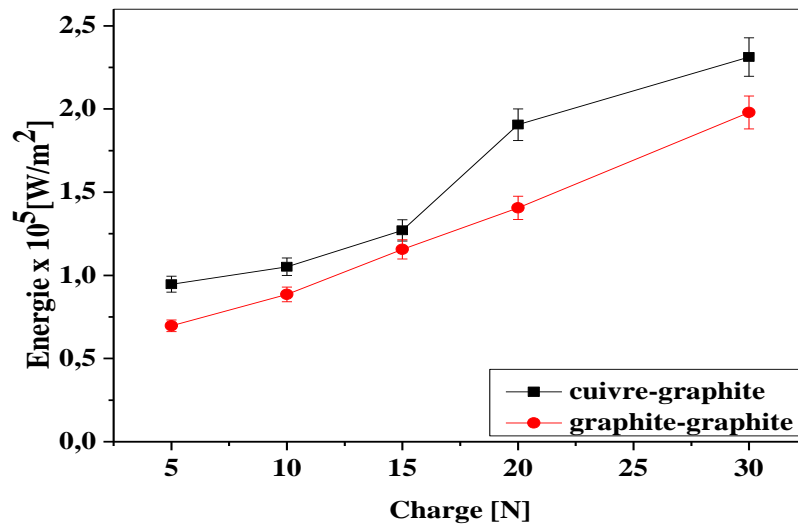


Figure III. 16. Variation de l'énergie dissipée par frottement à l'interface de contact en fonction de la charge appliquée pour les deux couples avec : $V = 0,5 \text{ m/s}$.

III. 2. 4. 2. Evolution de l'énergie dissipée en fonction de la vitesse de glissement

La variation de l'énergie dissipée par frottement mécanique au niveau du contact en fonction de la vitesse de glissement est illustrée par la figure III. 17. On trouve que, l'énergie dissipée augmente linéairement avec l'augmentation de la vitesse de glissement pour les deux couples.

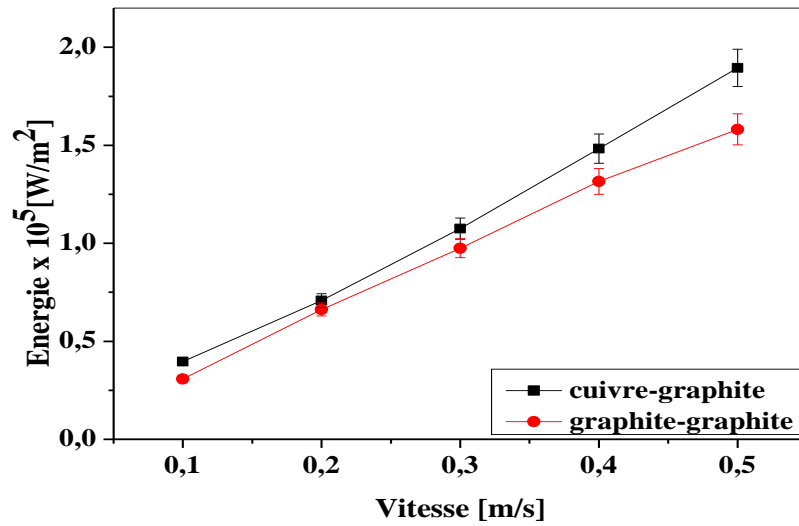


Figure III. 17. Variation de l'énergie dissipée par frottement à l'interface de contact en fonction de la vitesse de glissement pour les deux couples avec : $P = 20 \text{ N}$.

III. 3. Calcul théorique de la température de contact d'après la théorie d'archard

III. 3. 1. Pour le couple cuivre-graphite en fonction de la charge appliquée

Charge [N]	a [mm]	L	γ	Q [W]	ΔT_m [°C]
5	0,04	0,08	0,85	0,47	43,03
10	0,05	0,12	0,85	0,94	45,62
15	0,06	0,14	0,85	1,40	49,07
20	0,07	0,17	0,84	1,87	54,95
30	0,09	0,20	0,84	2,81	59,78

Tableau III. 3. Température de contact du couple cuivre-graphite en fonction de la charge appliquée.

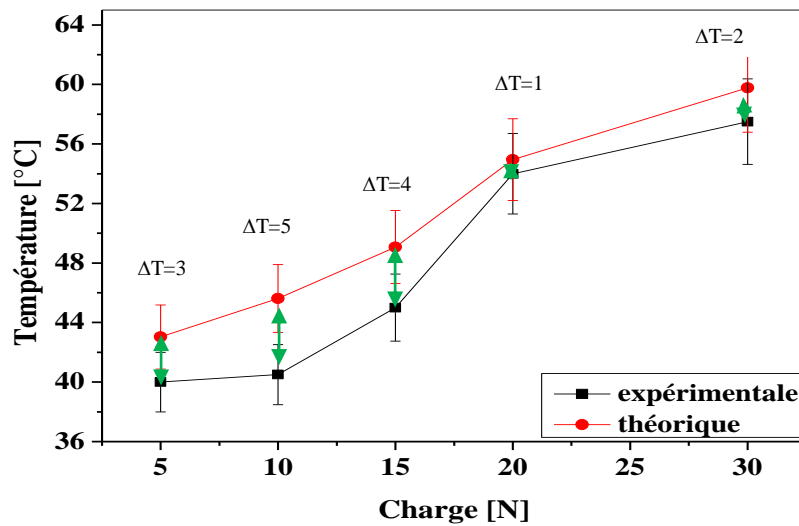


Figure III. 18. Confrontation des résultats théorique et expérimentaux en fonction de la charge appliquée du couple cuivre-graphite.

III. 3. 2. Pour le couple graphite-graphite en fonction de la charge appliquée

Charge [N]	a [mm]	L	γ	Q [W]	ΔT_m [°C]
5	0,05	0,08	0,85	0,31	41,53
10	0,07	0,12	0,84	0,63	46,19
15	0,09	0,14	0,83	0,94	49,72
20	0,1	0,17	0,82	1,26	52,66
30	0,1	0,20	0,82	1,89	57,54

Tableau III. 4. Température de contact du couple graphite-graphite en fonction de la charge appliquée.

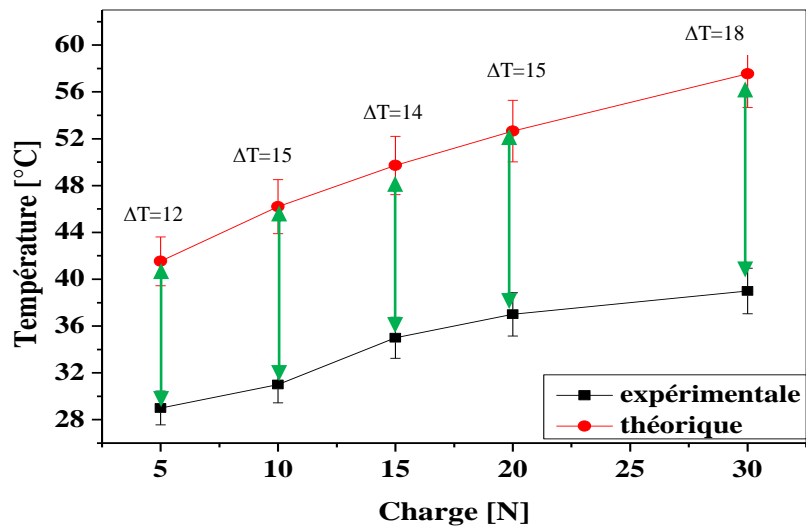


Figure III. 19. Confrontation des résultats théorique et expérimentaux en fonction de la charge appliquée du couple graphite-graphite.

III. 3. 3. Pour le couple cuivre-graphite en fonction de la vitesse de glissement

Vitesse [m/s]	a [mm]	L	γ	Q [W]	ΔT_m [°C]
0,1	0,07	0,03	0,86	0,35	33,03
0,2	0,07	0,07	0,85	0,62	35,39
0,3	0,07	0,09	0,85	0,95	38,75
0,4	0,07	0,12	0,85	1,31	40,23
0,5	0,07	0,25	0,84	1,67	43,02

Tableau III. 5. Température de contact du couple cuivre-graphite en fonction de la vitesse de glissement.

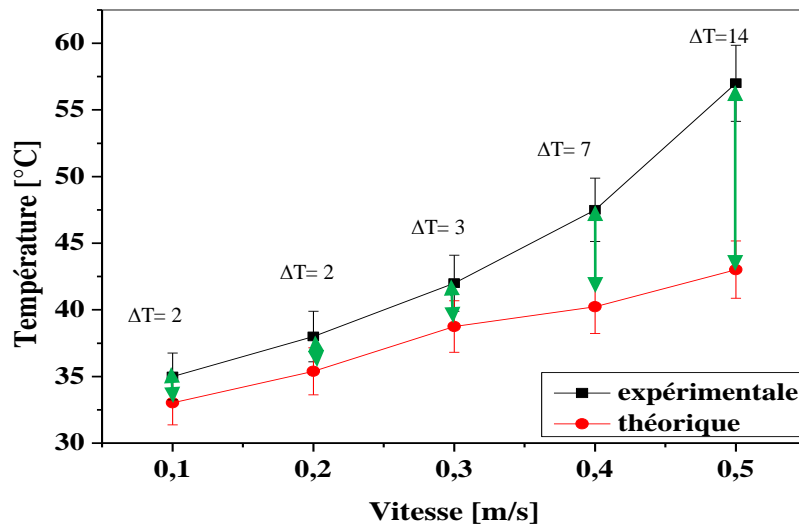


Figure III. 20. Confrontation des résultats théorique et expérimentaux en fonction de la vitesse de glissement du couple cuivre-graphite.

III. 3. 4. Pour le couple graphite-graphite en fonction de la vitesse de glissement

Vitesse [m/s]	a [mm]	L	γ	Q [W]	ΔT_m [°C]
0,1	0,1	0,04	0,86	0,19	32,91
0,2	0,1	0,09	0,85	0,41	36,24
0,3	0,1	0,13	0,85	0,61	37,77
0,4	0,1	0,18	0,84	0,82	40,46
0,5	0,1	0,22	0,84	0,88	41,11

Tableau III. 6. Température de contact du couple graphite-graphite en fonction de la vitesse de glissement.

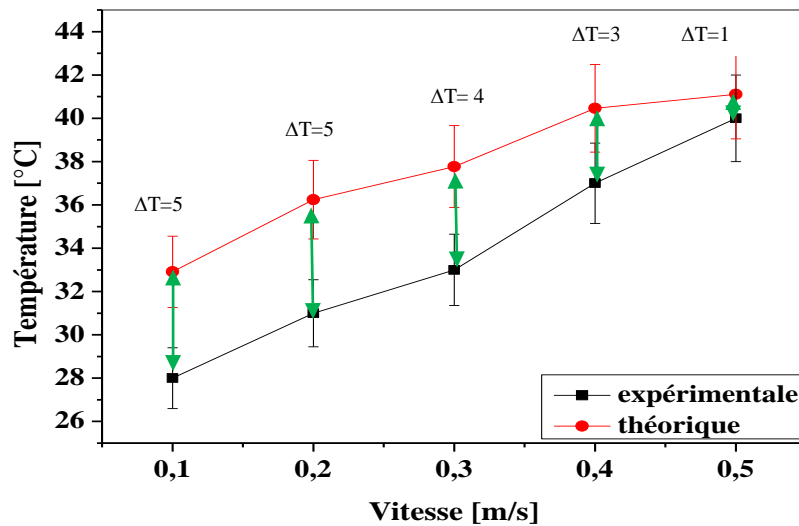


Figure III. 21. Confrontation des résultats théoriques et expérimentaux en fonction de la vitesse de glissement du couple graphite-graphite.

III. 4. Modélisation numérique de la température de contact

La résolution numérique d'un contact sec frottant par la méthode des éléments finis est faite avec l'utilisation d'un code de calcul qui a permis de déterminer la température de contact entre les solides antagonistes ou la distribution de chaleur mobile.

On comparant les résultats numériques obtenus après l'exécution du code de calcul avec les résultats expérimentaux pour valider la solution numérique.

III. 4. 1. Maillage

Il est important de faire un maillage suffisamment fin pour obtenir des résultats ayant une bonne concordance avec ce qui trouvé expérimentalement. Le maillage doit être raffiné davantage dans la zone de contact pour donner plus de précision, car le transfert de chaleur dans cette direction est le plus important. Lors du déplacement de la source de chaleur à cause du contact dynamique, nous avons utilisés un maillage progressif suivant la profondeur pour que le nombre des éléments dans ce sens soient limités.

Pour des matériaux supposées constantes (homogène et isotrope) et respecter la configuration semi-infinie qui sont isolés à l'extérieur de la zone de contact, la comparaison entre les résultats obtenus expérimentalement et numériquement a été faite dans des

conditions adiabatiques. Le nombre des éléments choisis est de 28343 et le nombre des nœuds est de 6106. La figure III. 22. représente la géométrie maillée obtenue avec le code de calcul par éléments finis COMSOL Multiphysics.

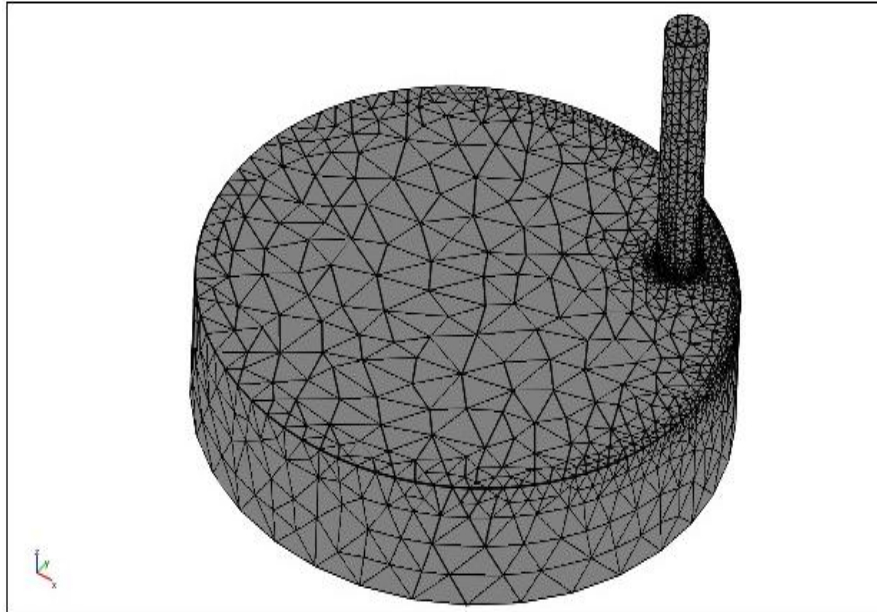


Figure III. 22. Maillage de la géométrie par élément fini.

III. 4. 2. Influence des paramètres mécaniques sur la température de contact (numérique)

III. 4. 2. 1. Cartographie surfacique pour différentes charge normale

Le champ de température créé par frottement dans le cas dynamique sans passage du courant électrique est illustré dans les figures III. 23 et III. 24 pour cinq charges normales appliquées avec une vitesse de glissement constante $V = 0,5$ m/s, et les figures III. 25 et III. 26 pour cinq vitesses de glissement avec une charge normale constante $P = 20$ N. La température au point de contact des antagonistes est maximale. Si on s'éloigne latéralement, la température va être diminuée et atteint son valeur minimal sur les frontières extérieures. On trouve que la température de contact des couples tribologiques cuivre-graphite et graphite-graphite augmente avec l'augmentation de la charge normale et la vitesse de glissement.

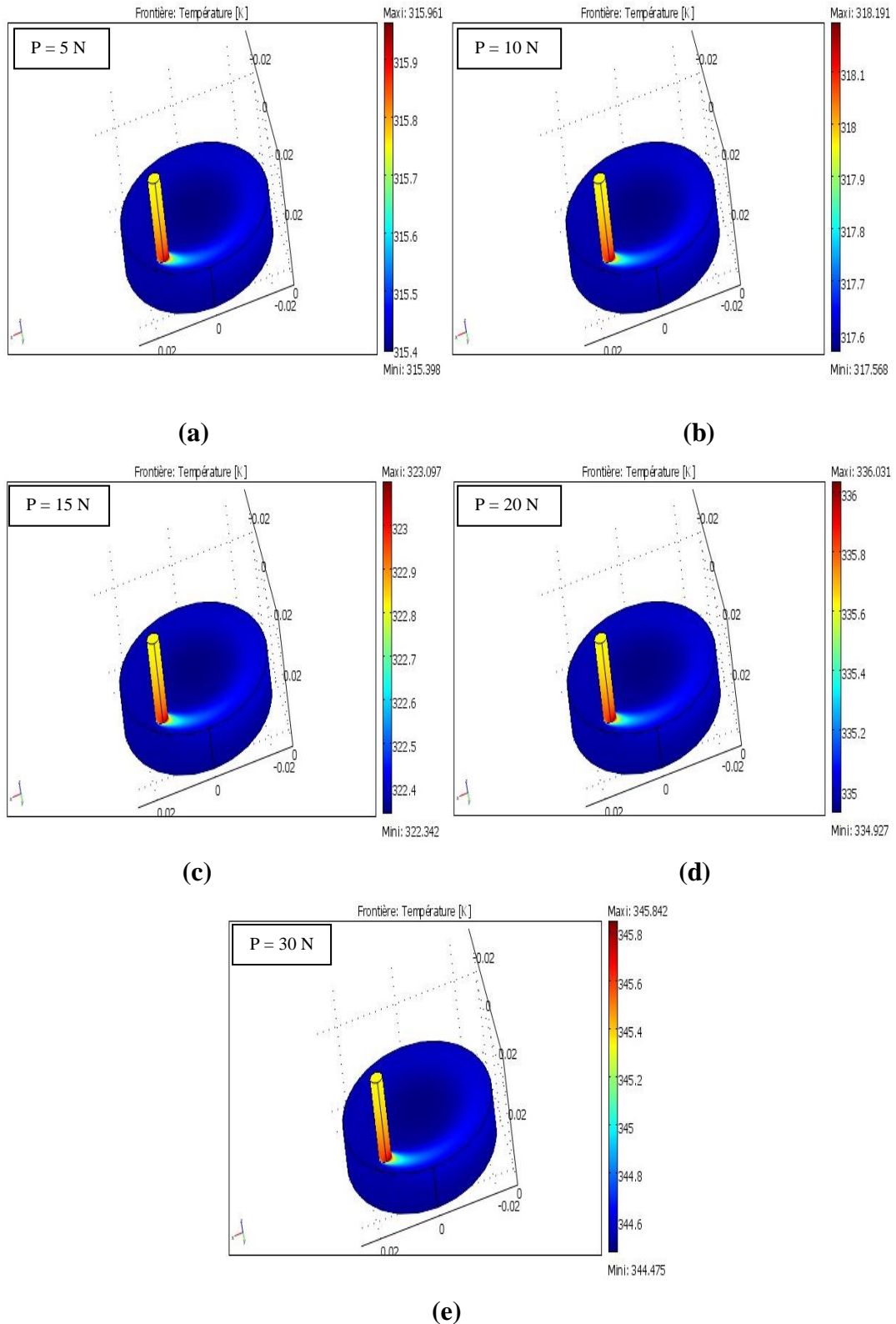


Figure III. 23. Cartographie de la température de contact en fonction de la charge normale du couple cuivre-graphite avec $V = 0,5\text{ m/s}$.

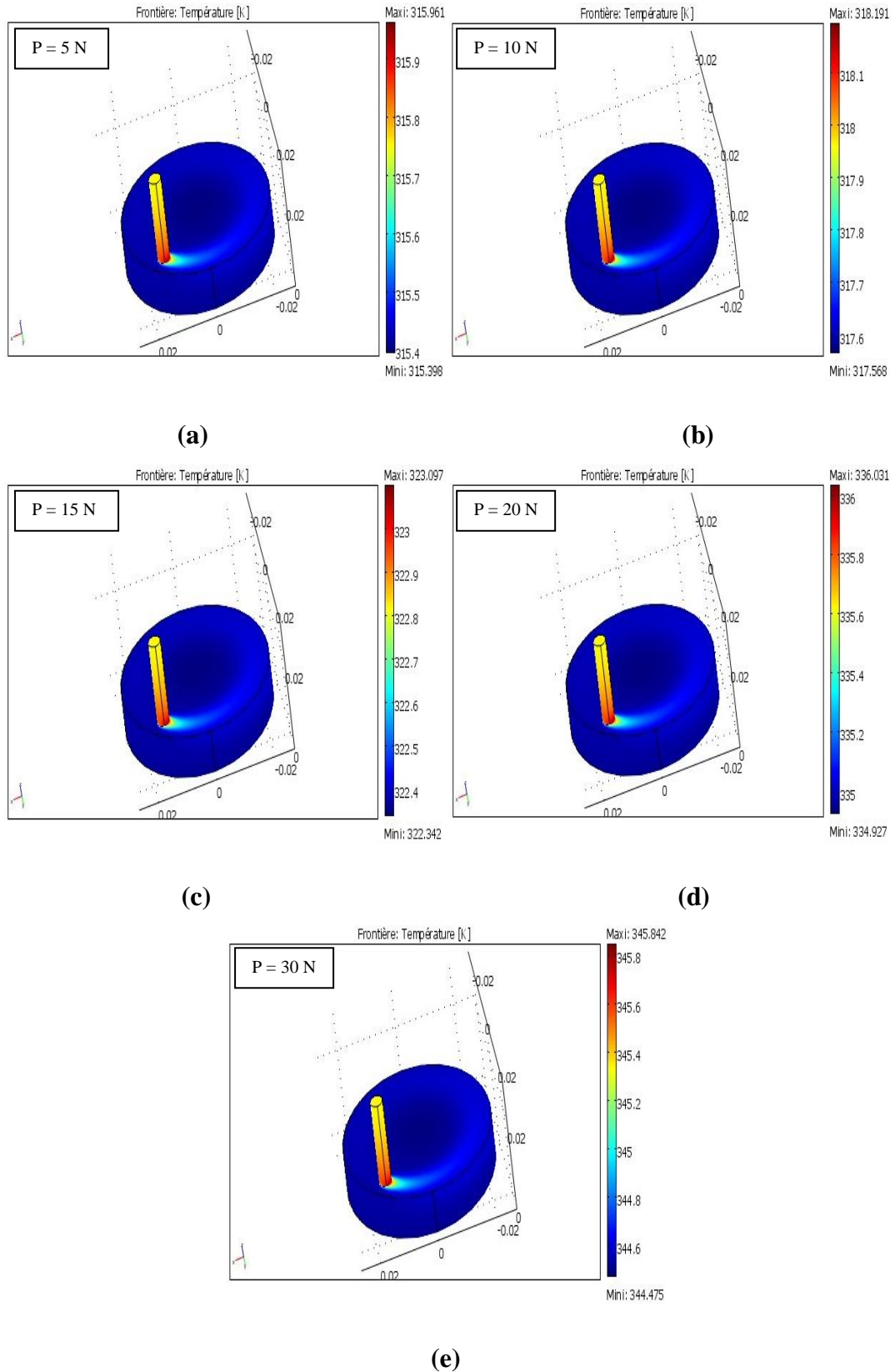


Figure III. 24. Cartographie de la température de contact en fonction de la charge normale du couple graphite-graphite avec $V = 0,5$ m/s.

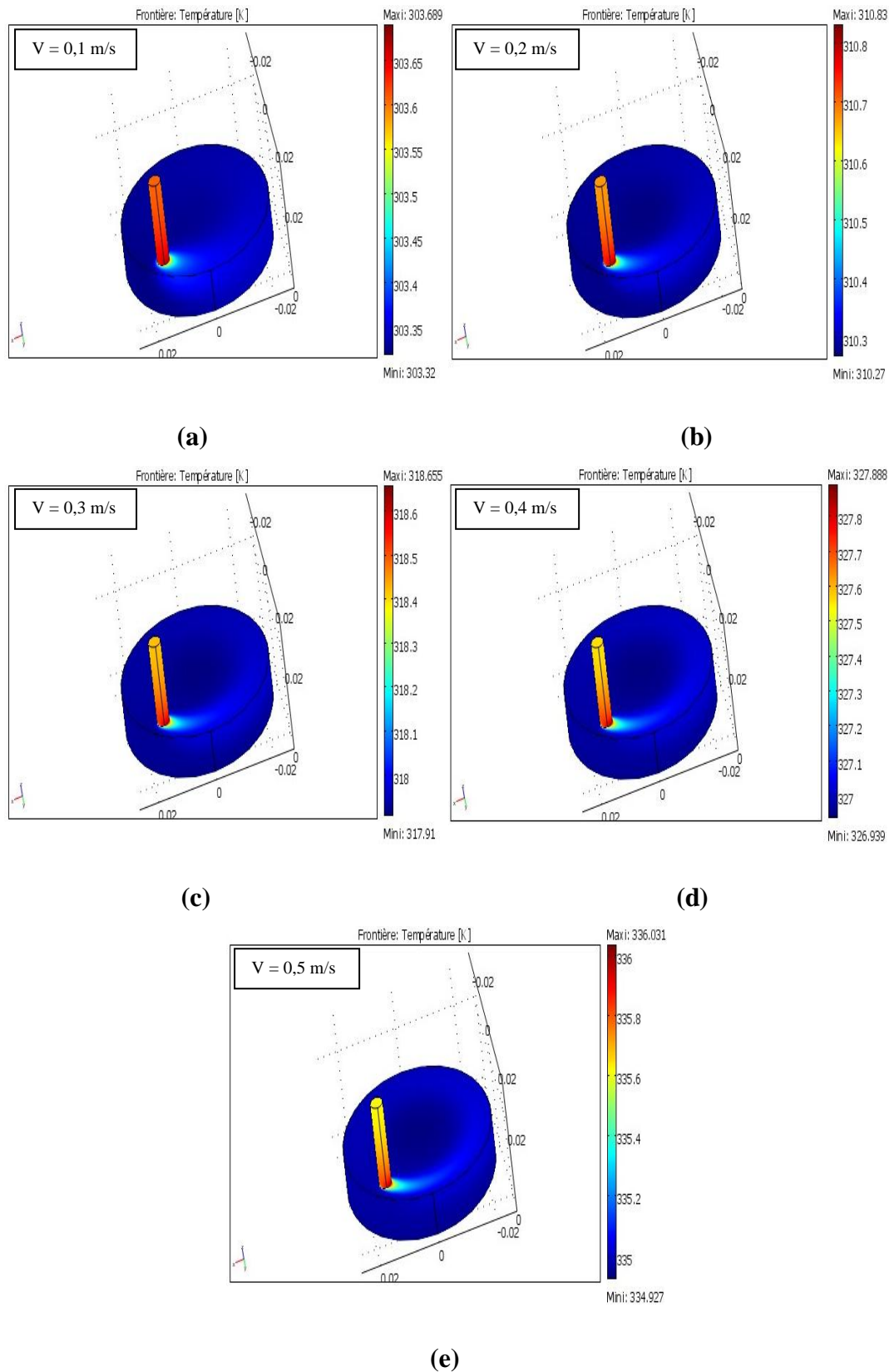


Figure III. 25. Cartographie de la température de contact en fonction de la vitesse de glissement du couple cuivre-graphite avec $P = 20\text{N}$.

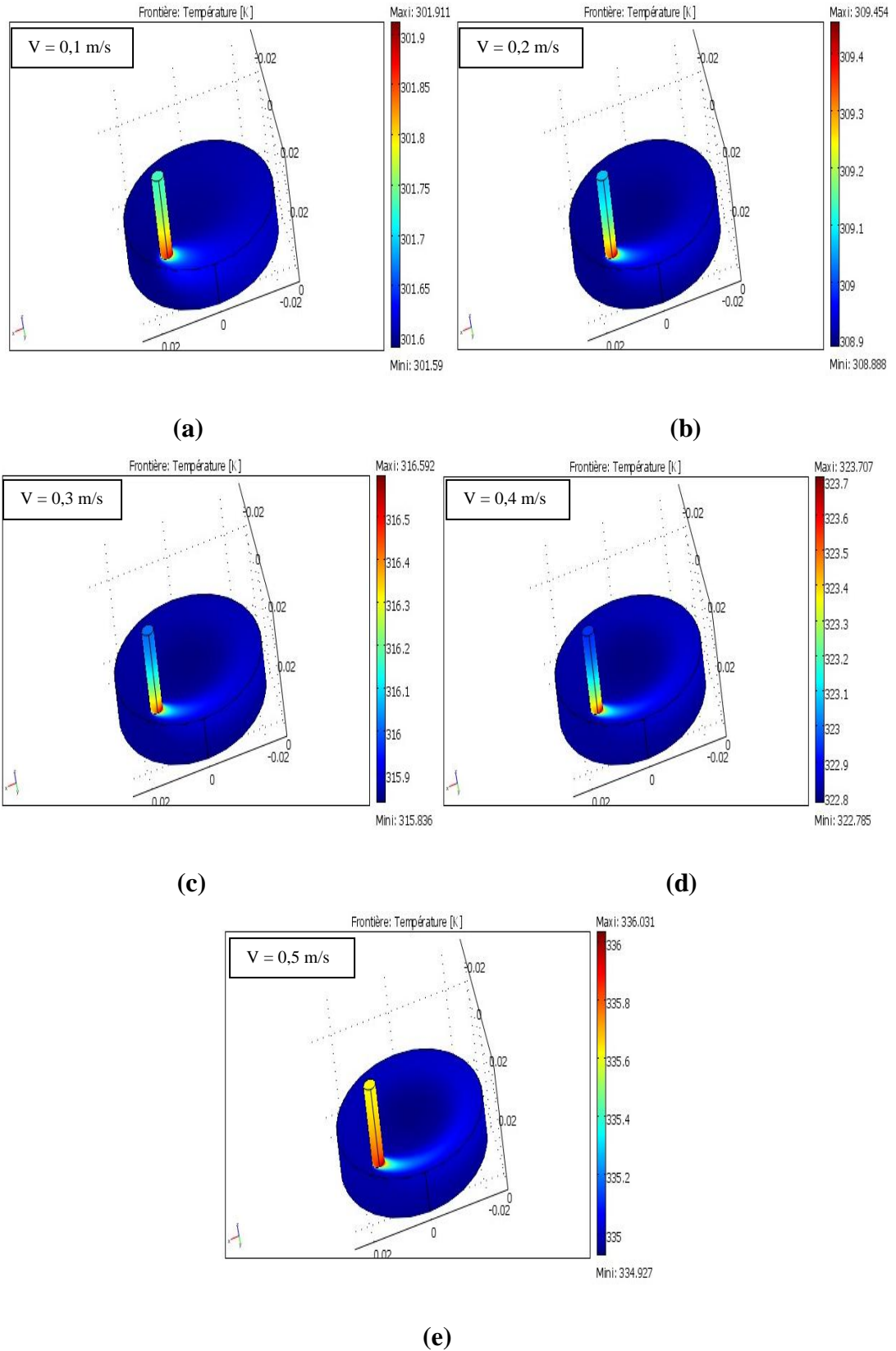
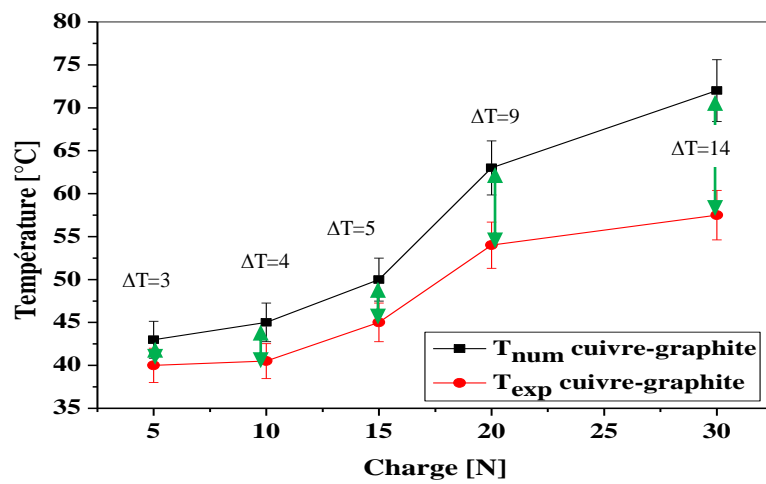


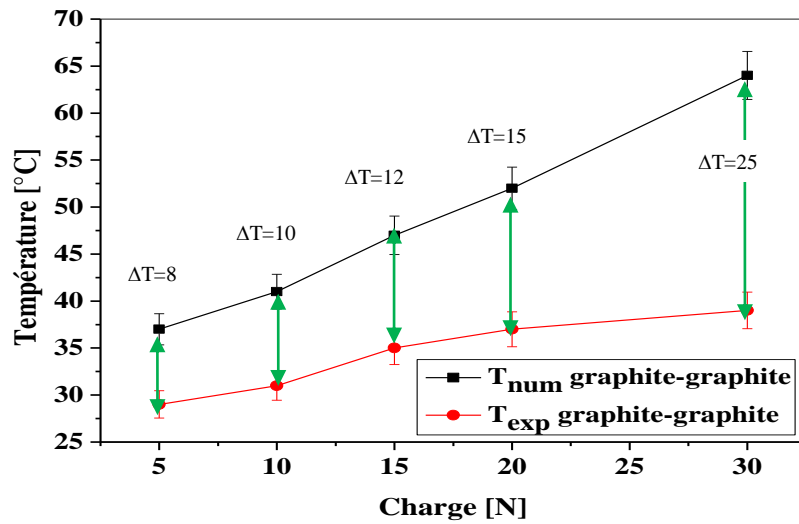
Figure III. 26. Cartographie de la température de contact en fonction de la vitesse de glissement du couple graphite-graphite avec $P = 20\text{N}$.

III. 4. 2. 2. Comparaison entre les températures de contact numérique et expérimentale

Les figures III. 27 et III.28 représentent la confrontation des deux méthodes que l'on a utilisées pour mesurer la température de surface générée par frottement en fonction de la charge normale et la vitesse de glissement respectivement. On remarque que les deux méthodes donnent une même allure avec un ΔT presque constant. L'écart de la température varie d'un couple de matériau à un autre. On conclut que les résultats numériques concordent avec les résultats expérimentaux.

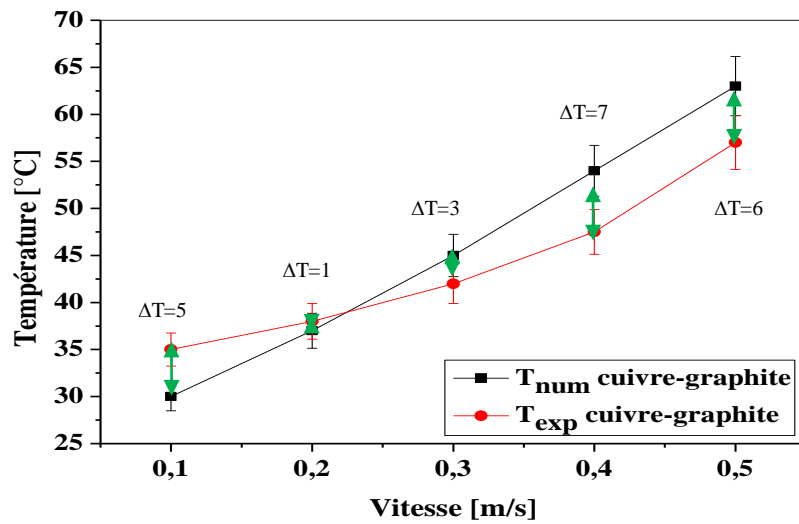


(a)

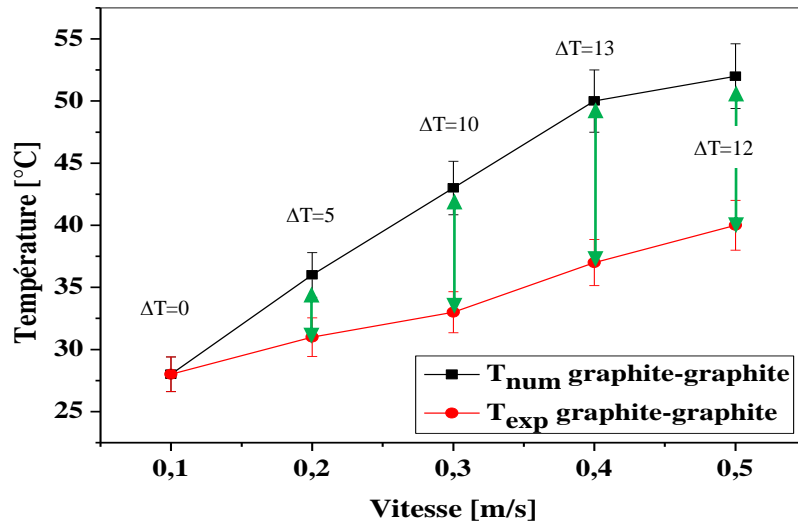


(b)

Figure III. 27. Confrontation des résultats numériques et expérimentaux en fonction de la charge appliquée des couples cuivre-graphite et graphite-graphite.



(a)



(b)

Figure III. 28. Confrontation des résultats numériques et expérimentaux en fonction de la vitesse de glissement des couples cuivre-graphite et graphite-graphite.

III. 5. DISCUSSION

III. 5. 1. Effet de la charge appliquée sur le frottement et l'usure

A l'état initial du contact et à une faible charge normale appliquée (5 N), le frottement est faible et les facteurs responsables de cette valeur sont dus à la présence d'une couche de matière étrangère à l'interface. L'oxydation des métaux est un facteur très important que l'on n'ait pas négligé, car elle a une influence primordiale sur les conditions de fonctionnement [9]. Un mélange de débris d'usure et d'oxyde sont présentent à l'interface du contact dynamique, de sorte qu'il recouverte la surface frottante. Le cuivre s'oxyde facilement à l'air ambiant, il sépare ces deux surfaces au cas du frottement initial pour qu'il ait ou pas de véritable contact métallique et le film d'oxyde présente également une faible résistance au cisaillement [10]. La croissance de l'épaisseur de la couche d'oxyde est due à l'effet des paramètres mécaniques et la température générée par frottement (Fig. III. 31), ce film se rompt lorsqu'il atteint son épaisseur critique par abrasion mécanique ($H_{oxyde\ de\ cuivre} = 1,3 \cdot 10^9\ N/m^2 > H_{cuivre} = 1,1 \cdot 10^9\ N/m^2$).

Les deux surfaces entrent en contact direct par les pics des aspérités les plus élevées (Fig. I. 4). Un enlèvement important du matériau caractérisé par des arêtes de labour dans

la direction de glissement en raison de la surface rugueuse (Fig. III. 9). Ces labours sont le résultat de l'action adhésive par une multitude des jonctions (micro-soudage) au niveau des aspérités (Fig. I. 4). Dans ce cas, l'enchevêtrement des aspérités augmentent l'adhérence entre les antagonistes et provoquent une élévation de la force de frottement, les points de contacts deviennent plus chauds et leurs géométries peuvent changer [10, 11].

Dans les mêmes conditions, en raison des déformations plastiques qui sont dues à l'effet de labourage des aspérités par pénétration dans la surface du matériau le plus tendre (cuivre), l'inclusion de particules d'usure et la rugosité de la surface du disque [12], la force de frottement augmente avec le temps d'essai pour les deux couples des matériaux cuivre-graphite et graphite-graphite (Fig. III. 1). Ce mécanisme de dégradation de surface est impliqué uniquement dans les premiers instants des corps frottant (usure abrasive à deux corps) [13]. Après une courte durée de fonctionnement, les valeurs du coefficient de frottement peuvent atteindre une certaine valeur d'état stable à cause de la stabilité des particules d'usure arrachées [14], et par conséquent, ces valeurs restent constantes pour le reste du temps (Fig. III. 1). En revanche, des sillons sur la surface du pion illustrés par des observations microscopiques (Figs. III. 9 et III. 30 (a)) sont dus à l'effet des débris d'usure qui sont formés de matière écrouie et trempée automatiquement (très dur). Donc, l'usure devient abrasive à trois corps (Fig. I. 11). Les grosses particules sont rapidement écoulées vers les côtés sous forme des bourrelets plastiques (Fig. III. 30 (a)), qui va peu à peu disparaître sous le passage répété des aspérités (abrasion par fatigue), et des petites particules restent toujours présentes à l'interface de contact, elles jouent un double rôle :

- accroître le taux d'usure pendant le fonctionnement ;
- diminuer l'effet de la couche d'oxyde à l'interface.

L'augmentation de la charge normale appliquée engendre un accroissement et un élargissement de la surface réelle de contact par fluage (Fig. III. 29) dans le sens de mouvement, qui prend une forme elliptique, à cause de la rupture des jonctions métalliques (Fig. I. 4), et une élévation de la température de contact interfaciale des antagonistes par frottement (Fig. III. 12). Ce qui facilite le processus de la formation et de la rupture d'oxyde [15]. De plus, elle diminue la résistance de cisaillement interfaciale (augmentation de l'aire réelle de contact), ce qui conduit généralement à réduire le coefficient de frottement des deux couples de matériau (Fig. III. 3) [16]. Pour les autres charges normales

(10, 15, 20 et 30 N), la figure III. 2 illustre des tendances similaires à celles de la courbe qui représente la charge normale $P = 5$ N.

Les particules d'usure à l'interface sont des mélanges d'oxyde dû à la croissance de leurs épaisseur à l'air ambiant et des débris d'usure du cuivre, ce qui signifie que le film d'oxyde de cuivre est immédiatement extrait sous l'action d'usure mécanique parce qu'il a une faible résistance au cisaillement. Des sillons apparaissent sur la surface de contact (Fig. III. 30 (a)) accélèrent le développement des débris d'usure sur la surface de contact, un transfert de graphite sous forme de poudre noire sur la surface du pion en cuivre illustré par la figure. III. 9 et justifié par un pourcentage de 27,43 % de carbone (Fig. III. 30(b)), et une absence total d'oxygène, car il a été rompu par abrasion. Donc, l'usure abrasive, l'usure adhésive et le transfert de matière sont les mécanismes les plus dominants.

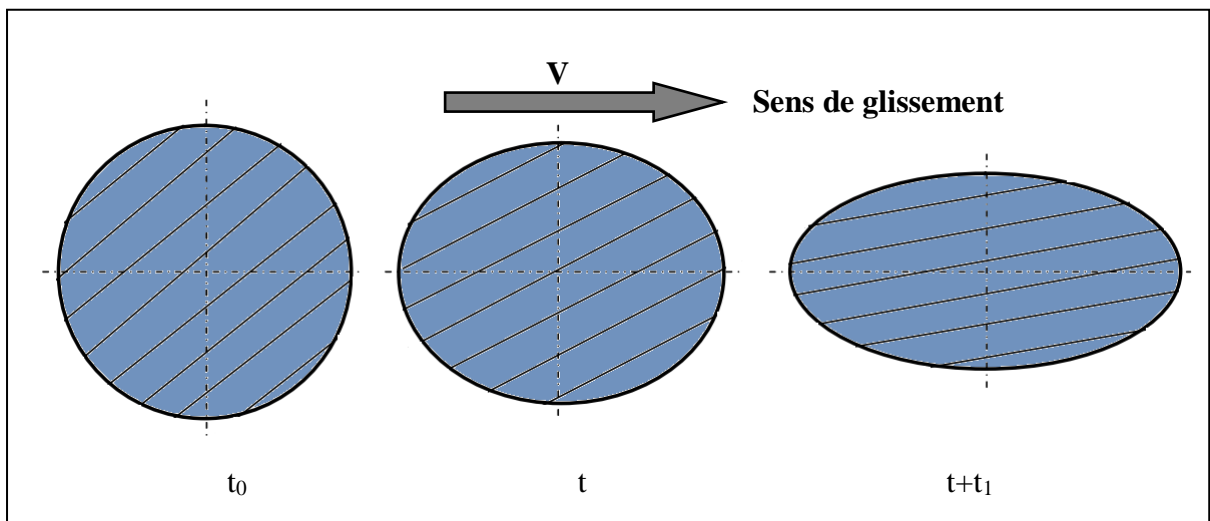
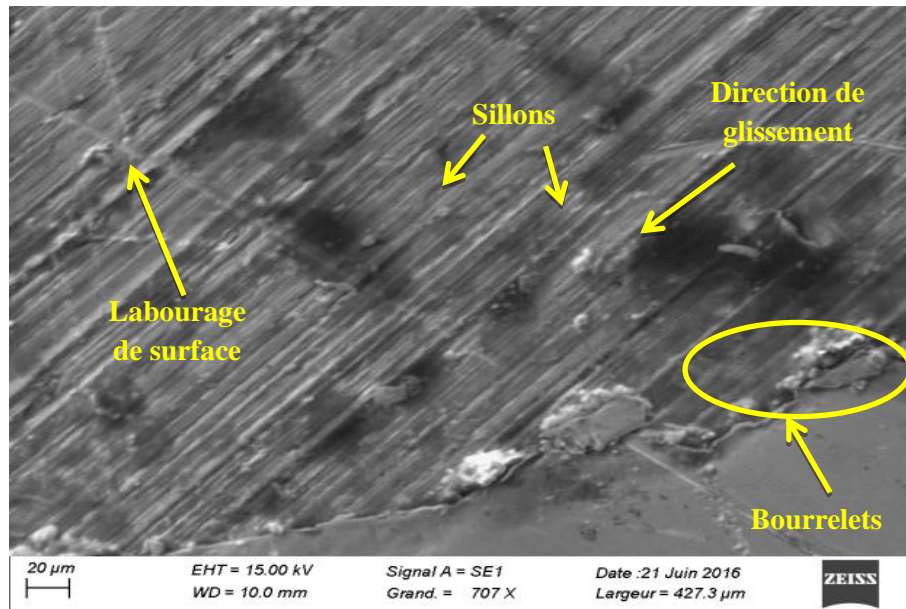
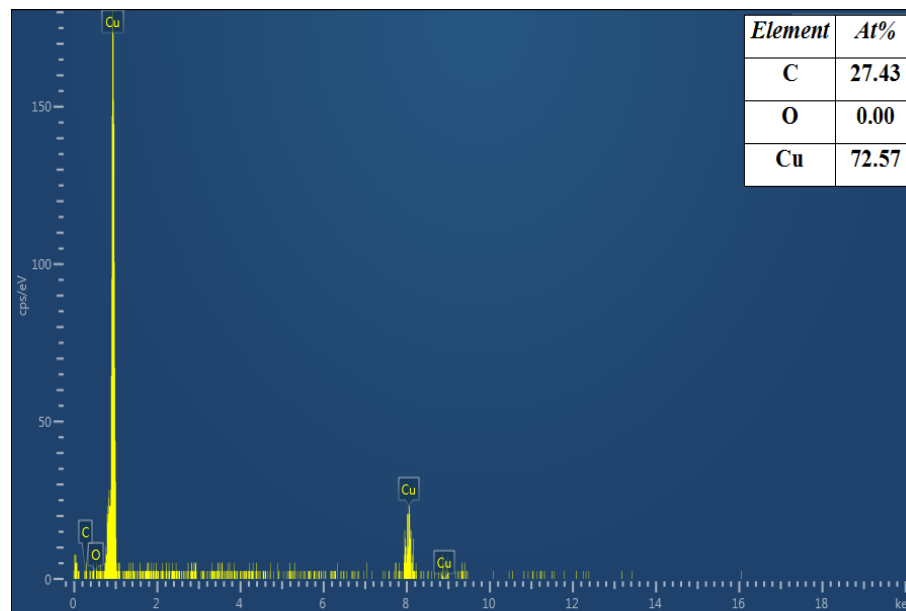


Figure III. 29. Illustration schématique d'un élargissement de la surface de contact par fluage.



(a)



(b)

Figure III. 30. (a) : Image obtenue par MEB de surface du pion usée en cuivre pour $P = 20$ N, $V = 0,5$ m/s ; (b) : spectre EDS.

III. 5. 2. Effet de la vitesse de glissement sur le frottement et l'usure

On a constaté dans la figure III. 4 que, à une faible vitesse de glissement ($V = 0,1$ m/s et $P = 20$ N), le nombre de jonctions entre les aspérités est accru à cause de cette

vitesse qui donne une grande durée d'exposition des antagonistes accompagné par une faible élévation de la température de contact (Fig. III. 13). Le coefficient de frottement prend une valeur de 0,26 pour le couple cuivre-graphite et 0,19 pour le couple graphite-graphite et le taux d'usure est au maximum.

A une vitesse de glissement supérieur à 0,1 m/s, la température de contact augmente à l'interface d'une façon linéaire pour les deux couples des matériaux activant ainsi le processus d'oxydation, ce qui accroît l'épaisseur de la couche d'oxyde de cuivre [17]. Cette couche protège la surface, contribue à la diminution du taux d'usure (Fig. III. 10) et à la stabilisation du coefficient de frottement.

Les valeurs du coefficient de frottement pour une vitesse de glissement de 0,4 m/s sont 0,23 et 0,20 des couples des matériaux cuivre-graphite et graphite-graphite respectivement. Donc, le coefficient de frottement n'a pas d'influence significative avec l'augmentation de la vitesse de glissement. Ceci confirme son indépendance de la vitesse de glissement dans le cas des régimes bas [7].

III. 5. 3. Effet de la charge appliquée et la vitesse de glissement sur la température de contact

Au cours du frottement mécanique, l'évolution de la température de contact passe par deux phases en fonction du temps d'essai (Fig. III. 11) :

- la température de contact augmente d'une manière progressive pour les deux couples de matériaux (cuivre-graphite et graphite-graphite). Les particules d'usure formées à l'interface, lors de la mise en contact par l'enchevêtrement des aspérités les plus élevées ont une influence significative sur cette élévation sous l'effet de la charge normale appliquée. C'est la phase transitoire ;
- une stabilisation du coefficient de frottement pour les deux couples du matériau est enregistrée après une phase de rodage (Fig. III. 1) à cause de la stabilité des conditions de fonctionnement à l'interface (la rupture des jonctions se stabilise, le nombre de particules d'usure arrachées devient constant et la formation de la couche d'oxyde). Ce qui conduit à une stabilisation des températures mesurées au voisinage de la surface de contact par élimination du contact direct des interfaces à cause de la croissance de la couche d'oxyde et le contact devient oxyde-oxyde [18].

On a obtenu des résultats similaires aux résultats obtenus par [7,14,19], concernant l'évolution de la température de contact en fonction du temps, qui passe par deux phases : une phase transitoire et une phase stationnaire.

Les Figures III. 14 et III. 15 montrent que la température de contact augmente avec l'accroissement de la charge appliquée et de la vitesse de glissement. Cette élévation de la température accélère la vitesse des différentes réactions et en particulier celle de la formation et la croissance de la couche d'oxyde. Cette couche atteint son épaisseur critique avec le temps (Fig. III. 31). Elle est détruite automatiquement au cours du frottement par action mécanique [20]. Ainsi, le flux de chaleur généré par frottement mécanique ($\phi_g = \mu \cdot P \cdot V$) augmente avec l'augmentation de la charge normale appliquée et la vitesse de glissement (Figs. III. 16 et III. 17), engendrant ainsi une élévation locale de la température de contact. Cette augmentation change les propriétés mécaniques des surfaces en contact, surtout quand la pression et la vitesse de glissement sont élevées, ce qui peut expliquer les conséquences sur le comportement tribologique [21].

Il est aussi important de rappeler que ponctuellement, la zone de contact réelle pour les antagonistes est assez inaccessible et se compose de petits points qui peuvent rester en contact pour une courte durée. Pendant cette période de contact, les points de contact peuvent devenir beaucoup plus chauds que le reste du matériau dans la zone de contact, atteignant ce que l'on a appelé une température flash [12]. Donc, lorsque l'aire réelle de contact diminue par le développement de la couche d'oxyde, la chaleur se concentre dans des petits volumes, entraînant alors une fusion locale du matériau le plus fusible [22].

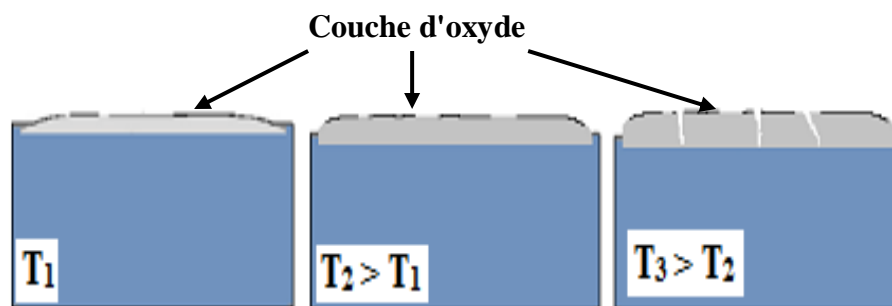


Figure III. 31. Illustration schématique de l'accroissement de la couche d'oxyde.

III. 6. Conclusion

On a développé, dans ce chapitre, une étude destinée à la détermination des températures interfaciales d'un contact dynamique, l'usure et le coefficient de frottement sans passage du courant électrique.

Les résultats expérimentaux ont confirmé l'effet de la charge normale appliquée et la vitesse de glissement des surfaces de contact sur la température interfaciale, le taux d'usure et le coefficient de frottement. On a constaté que :

- Une influence significative sur le coefficient de frottement à cause de l'application d'une charge normale P pour les pions en cuivre et, à un degré moindre pour ceux en graphite. En revanche, la vitesse de glissement, dans le cas des bas régimes, n'a pas d'influence importante sur le comportement en frottement des couples tribologiques ;
- Le taux d'usure augmente avec l'augmentation de la charge normale appliquée et diminue lorsque la vitesse de glissement croît. La cause de cette diminution est l'activation du processus d'oxydation, qui protège la surface de contact par un film d'oxyde, jouant le rôle de lubrifiant. Cependant, le comportement de la variation du taux d'usure et le coefficient de frottement en fonction de la charge normale appliquée et/ou la vitesse de glissement sont de nature différente ;
- Le couple graphite-graphite supporte mieux la température de frottement que le couple cuivre-graphite et ce, à cause des propriétés thermiques du carbone, qui s'adapte bien aux changements thermiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] J. Rech, C. Claudin, E. Eramo, « Identification of a friction model—application to the context of dry cutting of an AISI 1045 annealed steel with a TiN-coated carbide tool », *Tribology International*, 42, (2009), 738-744.
- [2] X.Z. Lin, M.H. Zhu, J.L. Mo, G.X. Chen, X.S. Jin, Z.R. Zhou, « Tribological and electric-arc behaviors of carbon/copper pair during sliding friction process with electric current applied », *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 21, (2011), 292–299.
- [3] Xin min Li et al, « A pin-on-disc study of the tribology characteristics of sintered versus standard steel gear materials », *Wear*, 340–341, (2015), 31–40
- [4] T. Ding et al, « Friction and wear behavior of pure carbon strip sliding against copper contact wire under AC passage at high speeds », *tribology international*, 44, (2011), 437–444.
- [5] Bhushan, B., « Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices, 2nd edition », Springer-Verlag, New York, (1996).
- [6] Blau, P. J., « Scale Effects in Sliding Friction: An Experimental Study, in *Fundamentals of Friction: Macroscopic and Microscopic Processes* (I.L., Singer and H. M., Pollock, eds.) », Kluwer Academic, Dordrecht, Netherlands, 220, (1992), 523-534,
- [7] Y. Mouadji, (2013), « Effets du courant électrique sur le mécanisme de croissance de la couche d'oxyde a l'interface des contacts électrodynamiques cuivre-graphite et graphite-graphite », Thèse de Doctorat en science, Université Frères Mentouri Constantine 1, Algérie.
- [8] A. Senouci, H. Zaidi, J. Frene, A. Bouchoucha, D. Paulmier, « Damage of surfaces in sliding electrical contact copper steel », *Applied Surface Science*, 144–145, (1999), 287–291.
- [9] D. Paulmier, A. Bouchoucha and H. Zaidi, « Influence of the electrical current on wear in a sliding contact copper-chrome steel, and connection with the environment », *Vacuum*, 41, (1990), 2230-2232.
- [10] Green A.P, « Friction between unlubricated: a theoretical analysis of the junction model », *Soc.:* A228, (1954), 191- 204.
- [11] Staffan Jacobson, Sture Hogmark, « Surface modifications in tribological contacts », *Wear*, 266, (2009), 370-378.

- [12] Kennedy Jr. F. E, « Thermal and thermomechanical effects in dry sliding », *Wear*, 100, (1984), 453-476.
- [13] M. Dubourg, Y. Berthier and L. Vincent, « Cracking under fretting fatigue: damage prediction under multi-axial fatigue », *Journal of Strain Analysis*, 37, (2002), 519-533.
- [14] A. Benfoughal, A. Bouchoucha, Y. Mouadji, « Effect of electrical current on friction and wear behavior of copper against graphite for low sliding speeds », *U.P.B. Sci. Bull*, Vol, 80, Iss, 03, (2018), 117-130.
- [15] A. ELHADI, (2018), « Processus de formation et de rupture des couches d'oxydes dans le contact tournant sec acier-acier : conséquences sur le frottement et l'usure », Thèse de Doctorat en science, Université Frères Mentouri Constantine 1, Algérie.
- [16] Ezugwu E. O, Okeke C. Machado A. R, «High speed threading of inclusion-modified steels with coated carbide tools», and *I Journal of Materials Processing Technology*. 86, (1998), 216–225.
- [17] N. Laraqi and al. « Temperature and division of heat in a pin-on-disc frictional device Exact analytical solution », *Wear*, 266, (2009), 765-770.
- [18] A. Moufki, A. Molinari, and D. Dudzinski. « Modelling of orthogonal cutting with a temperature dependent friction law ». *Journal of Mechanical Physics of Solids*, 46, (1998), 2103–2138.
- [19] N. Aderghal, (2012), « Répartition des flux de chaleur générés par frottement mécanique et modélisation des températures à l'interface des contacts dynamiques Cuivre-Acier et Cuivre-Graphite ». Thèse de Doctorat en science, Université Frères Mentouri Constantine 1, Algérie.
- [20] R. Komanduri, Z. B. Hou. « Analysis of heat partition and temperature distribution in sliding systems ». *Wear*, 251, (2001), 925–938.
- [21] A. Gaard, P. Krakhmalev, J. Bergström, J.H. Grytzelius, H.M. Zhang. « Experimental study of the relationship between temperature and adhesive forces for low alloyed steel. Stainless steel and titanium using atomic force microscopy in ultrahigh vacuum », *Journal of Applied Physics*, 103, (2008), 124301.
- [22] H. Zhao, G. C. Barber, J. Liu, « Friction and wear in high speed sliding with and without electrical current », *Wear*, 249, (2001), 409-414.

Chapitre IV :
Effet du courant électrique sur
le comportement
thermotribologique dans un
contact dynamique sec

IV. 1. INTRODUCTION

Dans le cas des contacts électriques glissants, il existe plusieurs sources de dissipation thermique telles que le frottement, l'effet Joule et dans certaines conditions la dissipation due à l'effet d'arc électrique [1]. L'augmentation de la température résultante est capable d'affecter les propriétés du matériau et les caractéristiques interfaciales des éléments et de modifier leur structure de surface dans certaines situations.

Plusieurs études ont été menées pour étudier le comportement tribothermique des contacts électrodynamiques secs pour différentes charges normales appliquées, vitesses de glissement et courants électriques [2-5]. Un certain nombre des travaux [6-9] montrent que le comportement en frottement et usure dépend largement de la charge normale, la vitesse de glissement, le courant électrique, le type de matériaux, la géométrie, l'humidité relative, la lubrification et des vibrations.

Dans ce chapitre, l'objectif est d'étudier l'effet de la charge appliquée et le courant électrique sur le comportement tribothermique de deux couples de matériaux cuivre-graphite et graphite-graphite dans des conditions de glissement à sec pour une vitesse de glissement de 0,5 m/s. De plus, on tentera de mettre en évidence l'effet de la couche d'oxyde formée à l'interface des antagonistes ainsi que son influence sur le frottement et l'usure des deux couples.

IV. 2. RESULTATS EXPERIMENTAUX

On a effectué plusieurs essais de frottement sec sur le tribomètre pion-disque pour les deux couples cuivre-graphite et graphite-graphite avec passage du courant électrique à l'interface, en faisant varier la charge appliquée et l'intensité du courant électrique. On a obtenu les résultats expérimentaux suivants :

IV. 2. 1. Evolution du coefficient de frottement

IV. 2. 1. 1. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps d'essai

Pour une charge de 20 N, une vitesse de glissement de 0,5 m/s et une intensité du courant électrique de 10 A. La figure IV. 1 illustre une augmentation du coefficient de frottement en fonction du temps dure de 1 à 3 minutes. Après cette période transitoire, on a observé que la courbe tend à se stabiliser.

Un régime transitoire relié par un régime stable comme la montre la figure IV. 1 se stabiliser autour d'une valeur de 0,17 pour le couple cuivre-graphite et 0,15 pour le couple graphite-graphite.

Si on compare les résultats du coefficient de frottement avec et sans passage du courant électrique en fonction du temps d'essai, on trouve qu'il y a une différence entre les deux résultats. La valeur du coefficient de frottement avec passage du courant électrique est inférieure à la valeur du coefficient de frottement pour le même couple des matériaux lorsqu'on n'a pas du courant, car une couche d'oxyde créée à l'interface des antagonistes due à l'effet du courant électrique appliqué joue un rôle de lubrifiant à l'interface de contact, ce qui conduit à un coefficient de frottement moins élevé. Un comportement similaire a été obtenu par Wang et al. [10].

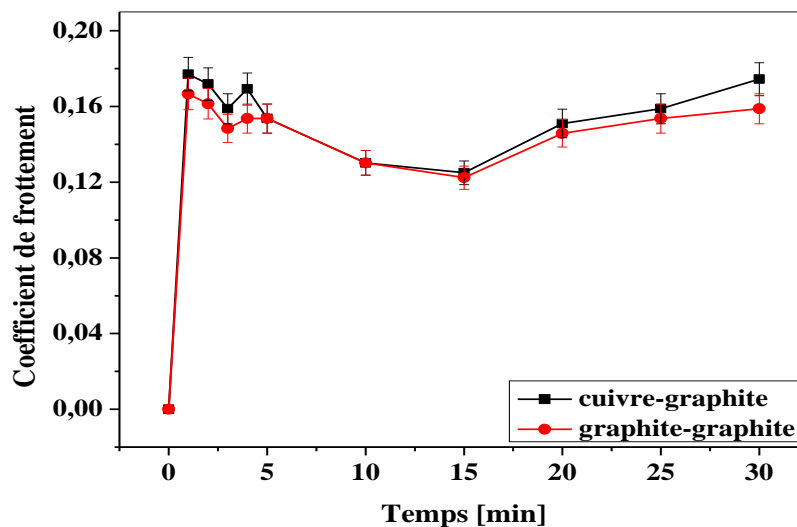
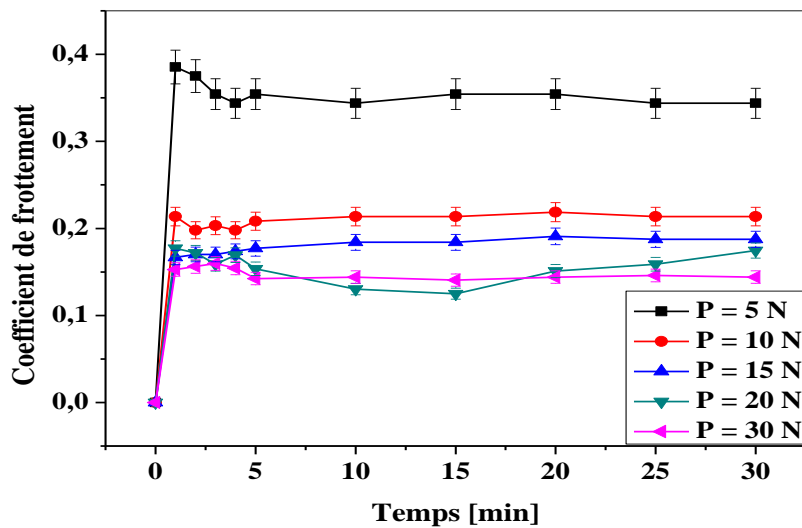


Figure IV.1. Variation du coefficient de frottement en fonction du temps pour les deux couples pour $P = 20$ N et $I = 10$ A.

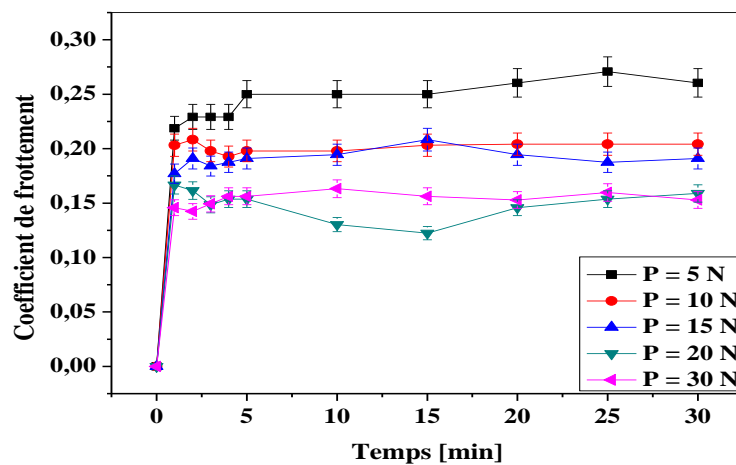
IV. 2. 1. 2. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps pour différentes charges normales

La variation du coefficient de frottement en fonction du temps d'essai, avec une valeur du courant électrique appliquée à l'interface de 10 A et une vitesse de glissement de 0,5 m/s sous différentes charges normales pour les deux couples des matériaux cuivre-graphite et graphite-graphite respectivement, est présenté par la figure IV. 2. On observe qu'il y a une augmentation brusque du coefficient de frottement pendant la phase initiale de frottement, puis

une augmentation progressive jusqu'à une durée de 15 minutes. Après cette durée, le coefficient de frottement reste constant pour le reste de l'essai. On observe aussi, lorsqu'on a une charge appliquée de 5 N, le coefficient de frottement a une valeur de 0,47 et 0,34 pour les couples tribologique cuivre-graphite et graphite-graphite respectivement sans passage du courant électrique, et une valeur de 0,34 et 0,26 pour les mêmes couples des matériaux avec passage du courant à l'interface des antagonistes.



(a)



(b)

Figure IV. 2. Variation du coefficient de frottement en fonction du temps pour les couples :

(a) cuivre-graphite (b) graphite-graphite avec $I = 10$ A.

IV. 2. 1. 3. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la charge appliquée

La figure IV. 3 illustre la variation du coefficient de frottement en fonction de la charge appliquée pour les deux couples des matériaux cuivre-graphite et graphite-graphite avec une intensité du courant électrique de 10 A et une vitesse de glissement de 0,5 m/s. le coefficient de frottement prend une allure décroissante pour les deux couples avec une courbe du pion de cuivre est inférieure à celle du pion en graphite.

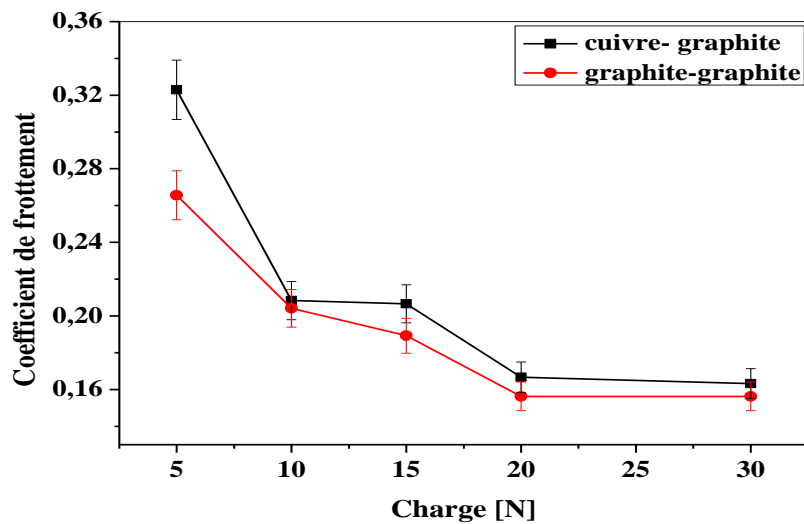


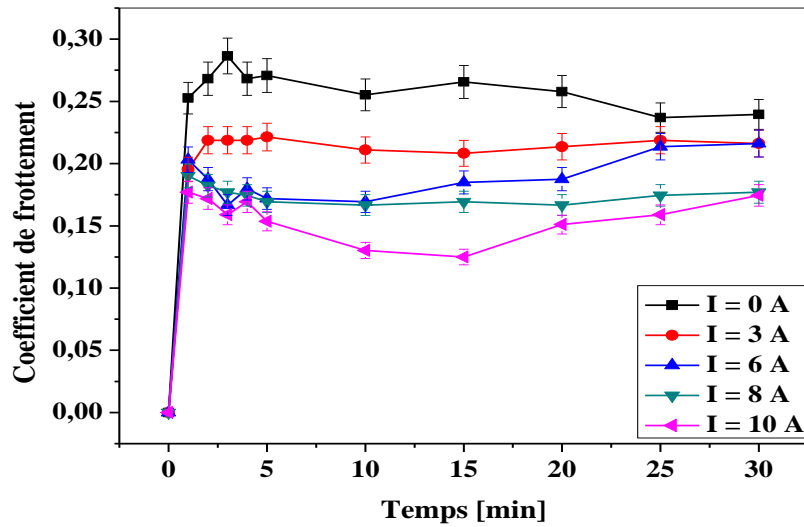
Figure IV. 3. Variation du coefficient de frottement en fonction de la charge appliquée pour les deux couples avec : $I = 10$ A.

IV. 2. 1. 4. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps pour différentes intensités du courant électrique

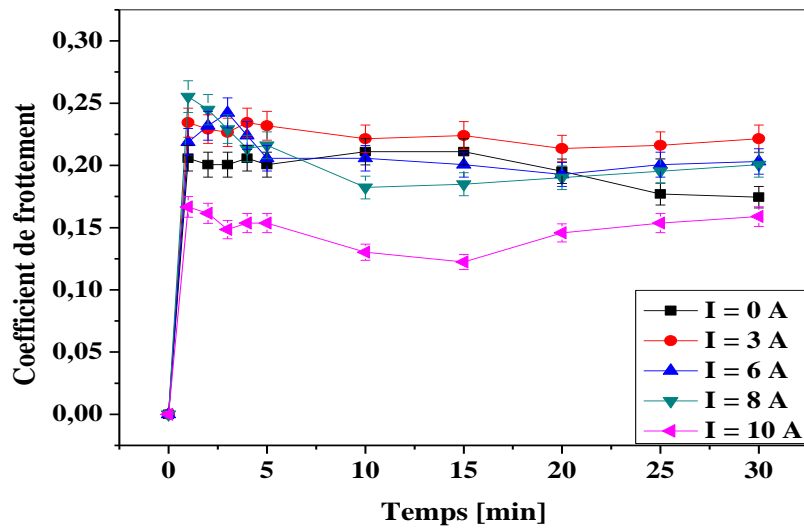
La figure IV. 4 illustre la variation du coefficient de frottement des couples tribologiques cuivre-graphite et graphite-graphite en fonction de la durée du frottement dans une ambiance atmosphérique pour une charge fixe de 20 N et une vitesse de glissement de 0,5 m/s, avec et sans passage du courant électrique.

Le coefficient de frottement du contact dynamique sec sans passage du courant électrique, illustré sur la figure IV. 4, montre une forte augmentation après le début de l'essai, puis cette augmentation devient modérée jusqu'à atteindre des valeurs asymptotiques après plusieurs minutes. Ceci indique que l'allure des courbes d'évolution du coefficient de frottement avec et sans passage du courant électrique est similaire. On peut également

remarquer que les valeurs du coefficient de frottement avec passage du courant sont plus faibles que celles sans courant.



(a)



(b)

Figure IV. 4. Variation du coefficient de frottement en fonction du temps pour les couples :
 (a) cuivre-graphite (b) graphite-graphite avec $P = 20$ N.

IV. 2. 1. 5. Evolution du coefficient de frottement en fonction du courant électrique

L'évolution du coefficient de frottement des deux couples tribologiques cuivre-graphite et graphite-graphite en fonction du courant électrique à une vitesse de glissement de 0,5 m/s et une charge de 20 N est représentée sur la figure IV. 5. Pour une charge normale de 20 N, le coefficient de frottement diminue avec l'augmentation du courant électrique. Ceci est dû à la formation d'un film d'oxyde qui joue un rôle d'une couche de lubrifiant à l'interface.

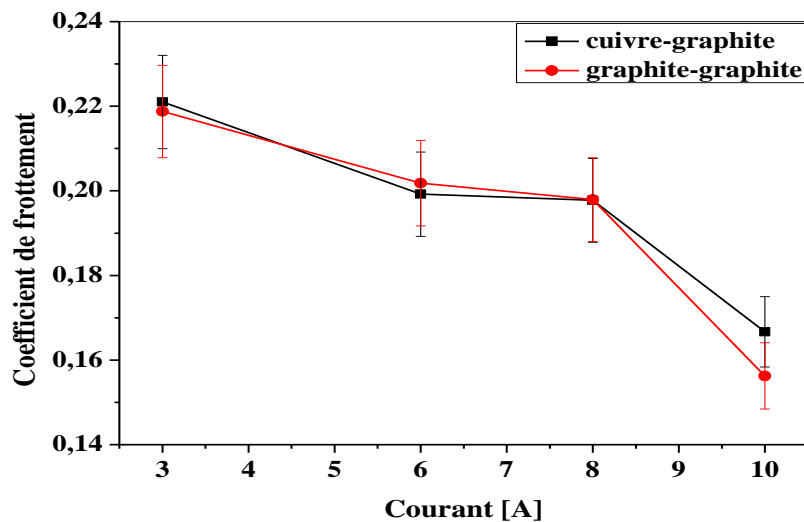


Figure IV. 5. Variation du coefficient de frottement en fonction du courant électrique pour les deux couples avec : $P = 20$ N.

IV. 2. 2. Evolution du taux d'usure

IV. 2. 2. 1. Evolution du taux d'usure en fonction de la charge appliquée

L'évolution de l'usure en fonction de la charge appliquée avec passage du courant électrique est représentée graphiquement par la figure IV. 6. On observe qu'il y a une légère augmentation du taux d'usure pour le couple cuivre-graphite et une augmentation linéaire pour le couple graphite-graphite. Les résultats que l'on a obtenus montrent, que le taux d'usure du couple cuivre-graphite varie de $1,9 \cdot 10^{-4}$ à $4,2 \cdot 10^{-4}$ mg/m et de $8,9 \cdot 10^{-4}$ à $25,8 \cdot 10^{-4}$ mg/m pour le deuxième couple en fonction de la variation de la charge normale de 5 à 30 N et dans des conditions identiques, les valeurs du taux d'usure du couple cuivre-graphite sont inférieures à celles du couple graphite-graphite. On constate aussi qu'il y a une différence entre les résultats du taux d'usure que l'on a obtenu avec et sans passage du courant électrique.

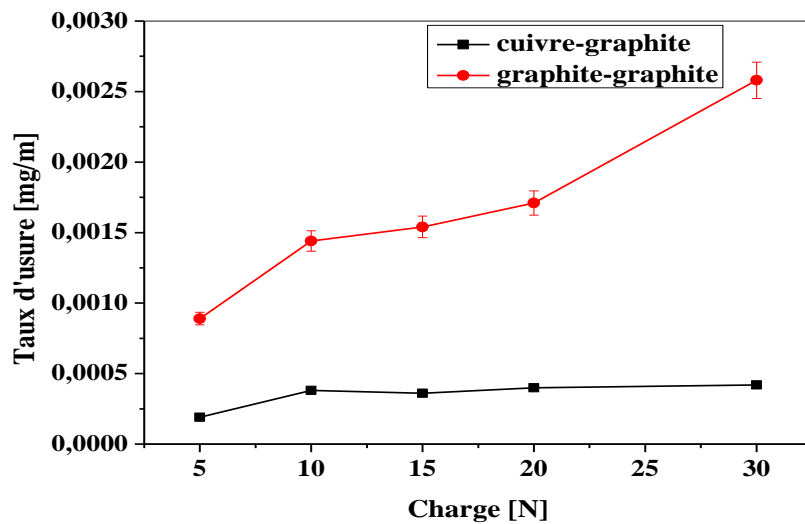


Figure IV. 6. Variation de l'usure en fonction de la charge appliquée pour les deux couples avec : $I = 10$ A.

IV. 2. 2. 2. Evolution du taux d'usure en fonction du courant électrique

Les variations du taux d'usure en fonction du courant électrique avec une charge normale appliquée de 20 N pour le couple cuivre-graphite et graphite-graphite sont présentés sur la figure IV. 7. On observe que le taux d'usure augmente linéairement avec l'augmentation de l'intensité du courant électrique pour le couple graphite-graphite et une valeur presque constante pour le couple cuivre-graphite.

On constate que l'intensité du courant électrique n'a pas d'influence sur le taux d'usure pour le couple cuivre-graphite et une valeur varie de $11,3 \cdot 10^{-4}$ à $17,1 \cdot 10^{-4}$ mg/m pour le couple graphite-graphite. Il est également révélé que dans les mêmes conditions, les valeurs du taux d'usure du couple cuivre-graphite sont inférieures à celles du couple graphite-graphite.

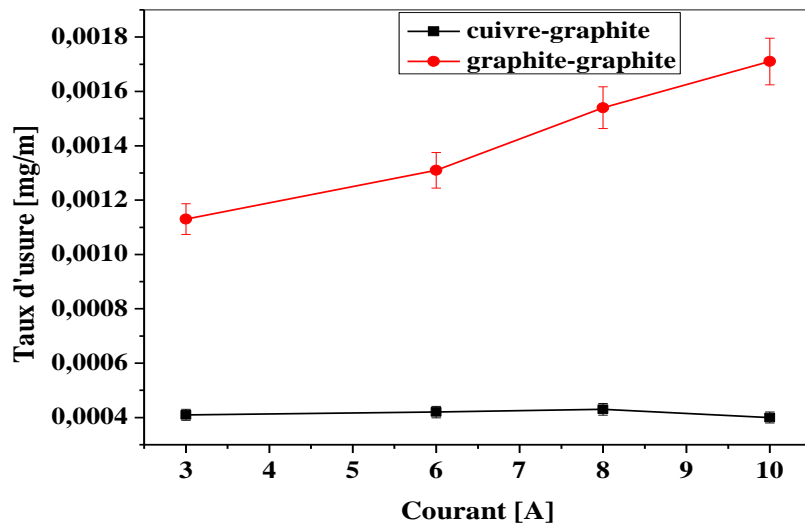


Figure IV. 7. Variation de l'usure en fonction du courant électrique des deux couples pour $P = 20$ N.

IV. 2. 3. Evolution de la température de contact à l'interface

IV. 2. 3. 1. Evolution de la température de contact en fonction du temps d'essai

La figure IV. 8 montre la variation de la température de contact du couple cuivre-graphite et graphite-graphite en fonction du temps d'essai avec une charge appliquée de 20 N, une vitesse de glissement de 0,5 m/s et une intensité de courant électrique de 10 A. On observe que, la température de contact augmente rapidement pour les deux couples du matériau jusqu'à la 15^{ème} minutes, puis la température augmente lentement jusqu'à devenir stable et se maintient à environ 148 °C pour le couple cuivre-graphite et 100 °C pour le deuxième couple.

En présence du courant électrique, on peut voir que la température de contact augmente significativement et que la production d'étincelles observée à l'interface des surfaces frottantes se produit dans le processus de frottement électrique de glissement. La combinaison entre l'effet Joule, la chaleur générée par frottement et l'effet d'arc électrique conduit à une augmentation rapide de la température de contact [6].

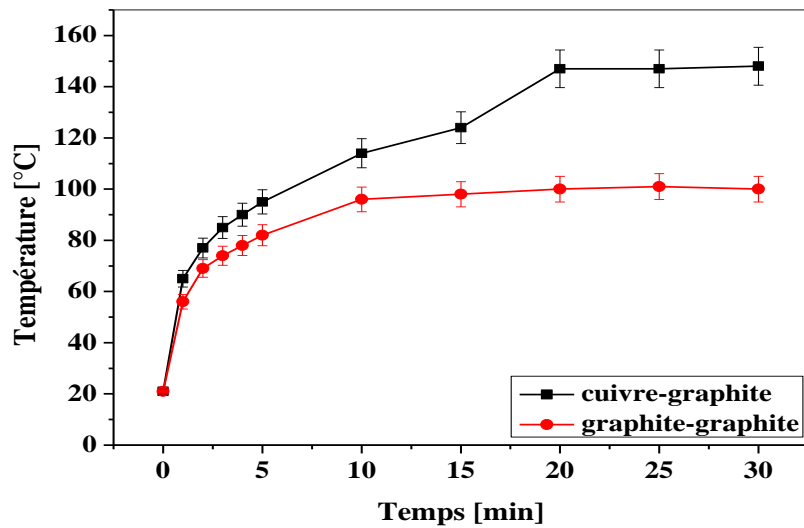
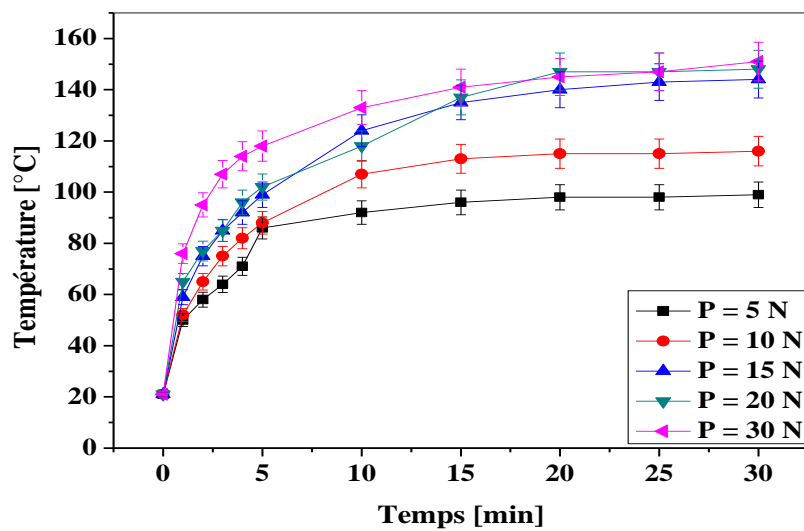


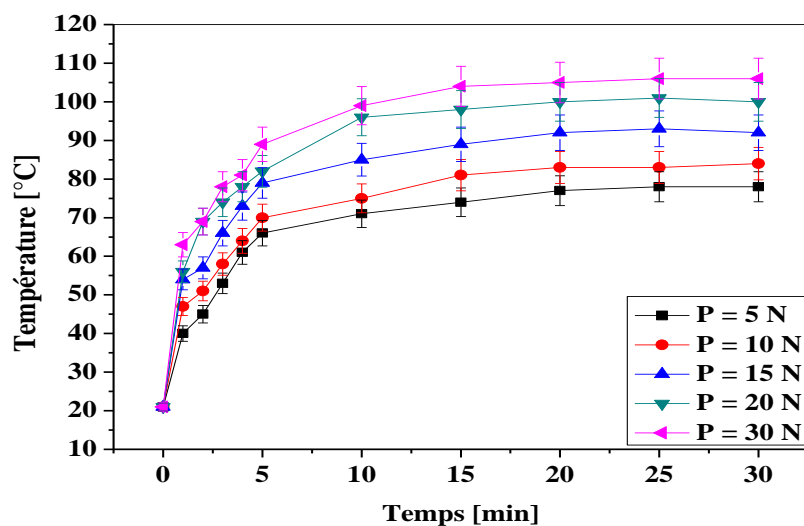
Figure IV. 8. Variation de la température de contact à 2 mm de l'interface en fonction du temps pour les deux couples avec $P = 20$ N et $I = 10$ A.

IV. 2. 3. 2. Evolution de la température de contact en fonction du temps pour différentes charges appliquées et courants électriques

La figure IV.9 présente la variation de la température de contact à 2 mm de l'interface du couple cuivre-graphite et graphite-graphite en fonction du temps avec plusieurs charges appliquées, vitesse de glissement de 0,5 m/s et une intensité du courant électrique de 10 A dans une ambiance atmosphérique. On observe que la température de contact augmente rapidement, puis la température augmente lentement jusqu'à devenir stable pour les deux couples du matériau.



(a)

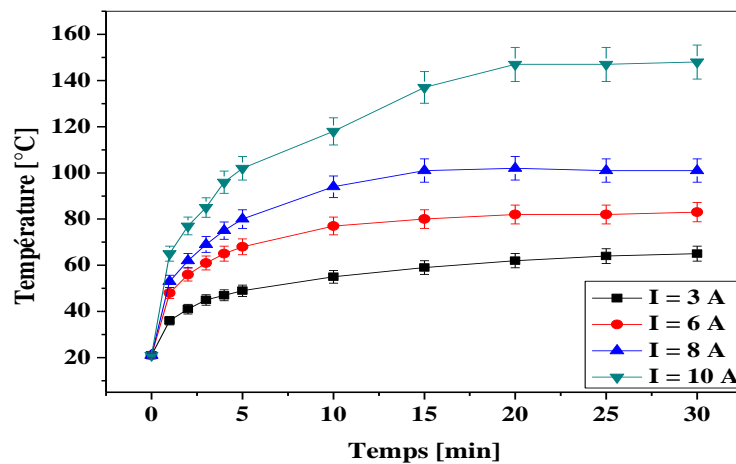


(b)

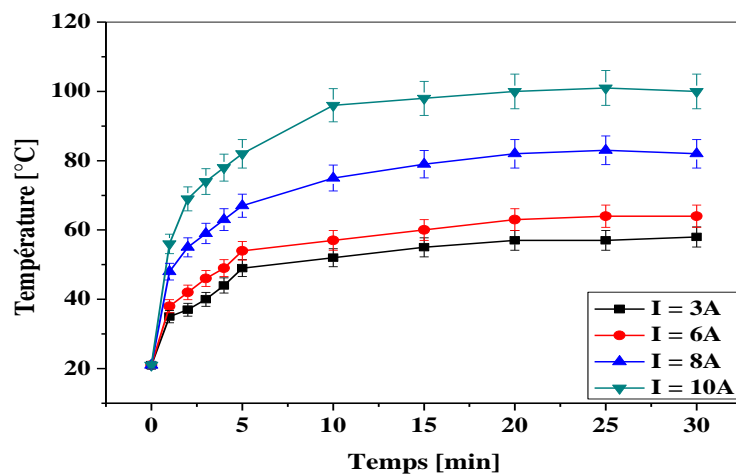
Figure IV. 9. Variation de la température de contact à 2 mm de l'interface en fonction du temps pour les couples : (a) cuivre-graphite (b) graphite-graphite avec $I = 10$ A.

La variation de la température de contact à 2 mm de l'interface en fonction du temps d'essai avec différents courants électriques appliqués est représentée sur la figure IV. 10 pour les deux couples cuivre-graphite et graphite-graphite. On observe que la température moyenne de contact augmente rapidement au début de l'expérience, ensuite augmente lentement pour

devenir stable après environ 15 minutes. On peut observer que lorsque l'intensité du courant électrique appliqué est plus grande, la température de contact du couple tribologique est plus élevée. Par exemple, pour un courant électrique appliqué de $I = 3 \text{ A}$, la valeur asymptotique de la température de contact est d'environ $65 \text{ }^\circ\text{C}$ et $58 \text{ }^\circ\text{C}$ pour les couples cuivre-graphite et graphite-graphite respectivement. Cependant, pour un courant électrique maximum appliqué ($I = 10 \text{ A}$), la valeur asymptotique de la température de contact est beaucoup plus élevée et égale à environ $148 \text{ }^\circ\text{C}$ et $100 \text{ }^\circ\text{C}$.



(a)



(b)

Figure IV. 10. Variation de la température de contact à 2 mm de l'interface en fonction du temps pour les couples : (a) cuivre-graphite (b) graphite-graphite avec $P = 20 \text{ N}$.

IV. 2. 3. 3. Evolution de la température de contact en fonction de la charge appliquée et le courant électrique

Les figures IV. 11 et IV. 12 illustrent la variation de la température générée par frottement à 2 mm de la surface de contact en fonction de la charge appliquée, avec une intensité de courant électrique de 10 A et vitesse de glissement de 0,5 m/s pour les couples tribologique cuivre-graphite et graphite-graphite, et le courant électrique respectivement. La température moyenne de contact augmente linéairement avec l'augmentation de la charge appliquée et l'intensité du courant pour les deux couples. Aussi, la température de contact du couple cuivre-graphite est plus élevée que le couple graphite-graphite dans les mêmes conditions et ce à cause des propriétés du graphite qui supporte bien les changements thermiques.

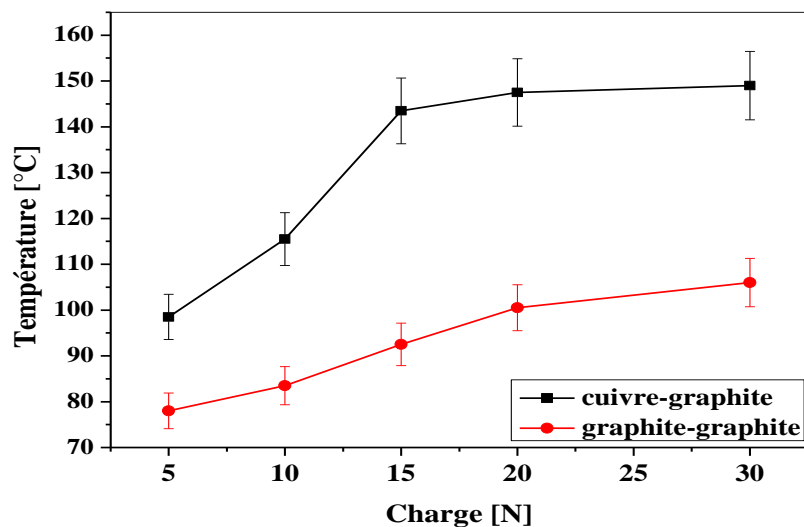


Figure IV. 11. Variation de la température de contact à 2 mm de l'interface en fonction de la charge appliquée pour les deux couples avec : $I = 10$ A.

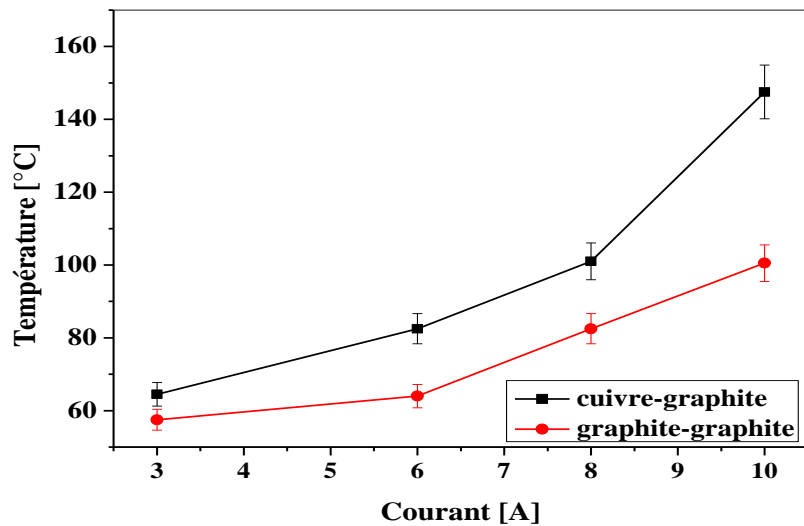


Figure IV. 12. Variation de la température de contact à 2 mm de l'interface en fonction du courant électrique pour les deux couples avec : $P = 20$ N.

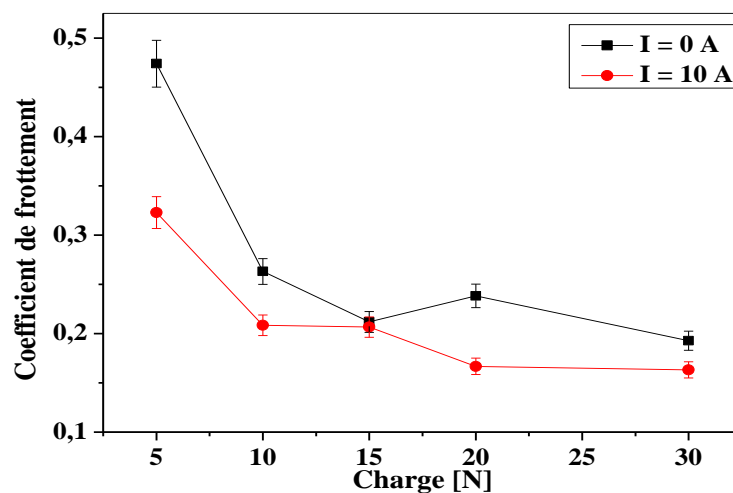
IV. 3. DISCUSSION

IV. 3. 1. Effet du courant électrique sur le comportement en frottement

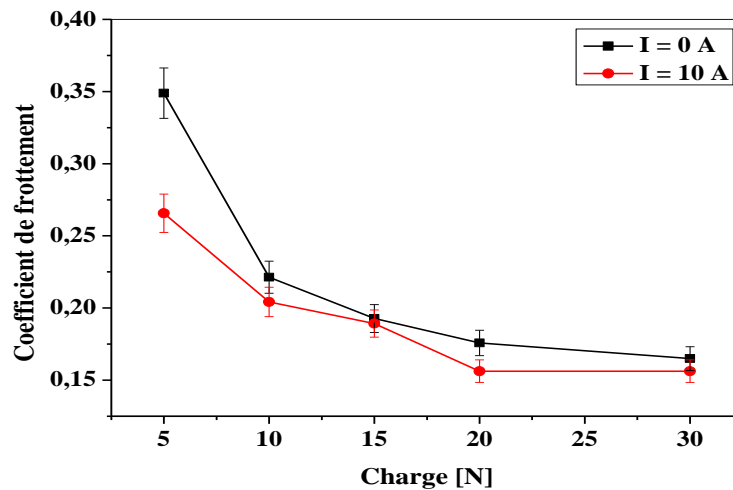
Une comparaison a été illustrée par la figure IV. 3 qui donne l'évolution du coefficient de frottement en fonction de la charge normale pour les deux couples cuivre-graphite et graphite-graphite dans une ambiance atmosphérique. Pour une faible charge normale appliquée ($P = 5$ N), le coefficient de frottement prend une valeur maximale μ_{max} pour les deux couples de matériaux ($\mu = 0,322$ à $0,163$ et $\mu = 0,265$ à $0,156$ pour les couples cuivre-graphite et graphite-graphite respectivement). Dans ce cas, l'enchevêtrement des aspérités augmentent l'adhérence entre les antagonistes et la contrainte de cisaillement à l'interface. Lorsque le courant électrique est de 10 A, la température de contact atteint 98 °C. En effet, le courant électrique augmente le flux de chaleur généré à l'interface ($\varphi_g = \varphi_{Méc} + \varphi_{Joule} + \varphi_{Arc}$). Ce qui conduit à réduire la surface réelle de contact, par recouvrement de cette surface avec une couche d'oxyde et/ou des débris. Ce film empêche le contact direct entre antagonistes et minimise l'adhérence lors du fonctionnement [11,12]. De plus, quand la température s'élève, un ramollissement de la piste de contact du disque en graphite et une oxydation du pion en cuivre se produisent, entraînant ainsi la formation d'un film lubrifiant à l'interface (Fig. IV. 18 (a)). Lorsque le courant électrique est interrompu ($I = 0$ A), la température de contact diminue à environ 40 °C (Fig. IV. 23). Dans ces conditions, le film d'oxyde protecteur ne peut pas se

former. Par conséquent, le coefficient de frottement avec passage du courant électrique est inférieur à celui sans passage du courant (Fig. IV. 13) [11].

Lorsque $P = 5 \text{ N}$, le coefficient de frottement prend une courbe décroissante jusqu'à atteindre une valeur minimale μ_{min} (Fig. IV. 3). L'augmentation de la charge normale avec une intensité du courant électrique de 10 A , engendre une élévation de la température de contact, favorisant ainsi le développement de la couche d'oxyde à l'interface [13]. L'oxyde de cuivre présent à l'interface se rompt lorsqu'il atteint son épaisseur critique puis, il est transféré vers la contre face pour se mêler aux particules de graphite pour former une mixture (oxyde de cuivre-particules de graphite), son compactage sous l'effet combiné de la charge normale et la contrainte tangentielle, comble les creux des irrégularités de la piste de frottement du cuivre, et diminue la rugosité (Tableau IV. 1) entraînant ainsi une diminution le coefficient de frottement. Donc, une augmentation de la charge normale, dans les conditions du frottement mécanique et électrique, engendre un accroissement de nombre de point de contact par une rupture supplémentaire des jonctions métalliques, et par conséquent, l'accroissement de la surface de contact par fluage (diminution de la résistance de cisaillement à l'interface). Une tendance similaire du coefficient de frottement a été obtenue par Wang et al [10] et Ding et al [11] pour une plage plus élevée de la vitesse de glissement appliquée avec et sans passage du courant électrique.



(a)



(b)

Figure IV. 13. Variation du coefficient de frottement en fonction de la charge appliquée avec et sans passage du courant électrique pour les couples : (a) cuivre-graphite (b) graphite-graphite.

Courant électrique (A)	0	3	6	8	10
Rugosité (μm)	0,1557	0,1206	0,0682	0,0617	0,0416

Tableau IV. 1. Variation de la rugosité du pion en cuivre pour $P = 20 \text{ N}$ et $V = 0,5 \text{ m/s}$.

IV. 3. 2. Effet du courant électrique sur le comportement en usure

La figure IV. 16 représente la variation du taux d'usure du pion (tantôt en cuivre, tantôt en graphite) des deux couples cuivre-graphite et graphite-graphite en fonction de la charge appliquée avec et sans passage du courant électrique. Elle montre une augmentation quasi linéaire du taux d'usure avec une différence importante entre les deux couples ($1,9 \cdot 10^{-4}$ à $4,2 \cdot 10^{-4} \text{ mg/m}$ et de $8,9 \cdot 10^{-4}$ à $25,8 \cdot 10^{-4} \text{ mg/m}$ pour les couples cuivre-graphite et graphite-graphite respectivement).

Les particules d'usure arrachées sont plus importantes pour le couple graphite-graphite avec la présence du courant électrique que celles sans courant et moins importantes pour le couple cuivre-graphite (Fig. IV. 16 (b)). Ces particules sont dues aux processus de déformations et de rupture des jonctions durant le glissement. La présence du courant électrique à l'interface de contact a une grande influence sur le taux d'usure car il conduit à plusieurs effets négatifs.

Premièrement, l'augmentation du courant électrique peut provoquer un arc électrique, ce qui entraîne une augmentation du taux d'usure en raison de l'érosion [14]. Deuxièmement, l'augmentation du courant électrique peut provoquer une augmentation de la température de contact par effet Joule [15]. La chaleur générée par effet Joule, l'arc électrique et par frottement mécanique entraîne une augmentation rapide de la température de contact et conduit à une fusion locale du matériau le plus tendre.

Cette élévation de la température de contact par la présence du courant électrique affecte les propriétés du matériau qui deviennent plus doux, diminue la rugosité de la surface de contact (Tab IV. 1) et réduit le coefficient de frottement. De plus, l'augmentation de la température de contact accélère l'arrachement des débris, ce qui facilite le transfert des particules d'usure dans les creux du contre face (Fig. IV. 14). Le film d'oxyde rend la surface moins rugueuse que celle obtenue sans courant électrique [16]. Avec passage du courant électrique, on constate qu'il n'y a pas d'influence significative sur l'usure du couple cuivre-graphite à cause de la formation d'oxyde de cuivre, qui s'adapte bien à la topographie de la surface de contact du pion sous forme d'une couche mince, jouent un rôle de lubrifiant [17].

L'usure avec le passage du courant électrique au cours du frottement est de type abrasif où les particules arrachées engendrent des rainures profondes sur la surface frottante du pion en cuivre (Fig. IV. 18(a)). Une adhérence de l'oxyde à l'interface et une modification de sa rhéologie par réduction de la force de frottement facilite le glissement et diminue l'endommagement [18]. En revanche, l'usure du couple graphite-graphite est largement influencée par la présence du courant et augmente linéairement avec l'augmentation du I (Fig. IV. 7).

En absence du courant électrique, sous faible charge, le taux d'usure est sensiblement proportionnel à la charge. Une augmentation de la charge entraîne une augmentation de la force tangentielle [1]. Le mélange de débris constitué de particules de cuivre et de graphite piégées entre le pion et le disque laboure la surface du cuivre et entraîne une déformation plastique avec transfert mutuel des surfaces en regard (Fig. III. 9). Sans courant électrique, le taux d'usure dépend uniquement de l'usure mécanique.

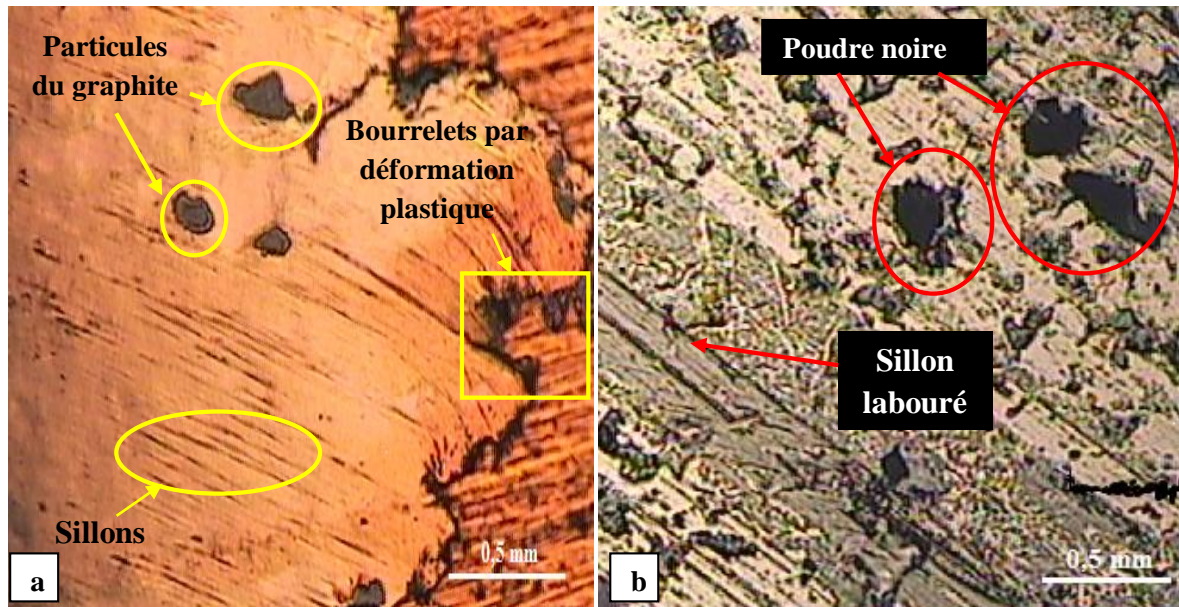


Figure IV. 14. Image microscopique de la surface usée du pion en : (a) cuivre, (b) graphite ($P = 20 \text{ N}$, $V = 0,5 \text{ m/s}$, $I = 10 \text{ A}$).

Un modèle physique simple peut être utilisé pour expliquer le mécanisme de formation de l'usure due à l'élévation de la température de contact (Fig. IV. 15). Lorsque l'usure due à l'effet thermique se produit à l'interface du couple de contact, une couche d'oxyde se forme sur la surface du pion (Fig. IV. 15 (a)). La couche d'oxyde présente des fractures et des fissures sous l'action conjuguée de la contrainte de cisaillement et la charge normale (Fig. IV. 15 (b)). De plus, le délaminage sous forme de flocon est visible sur la surface de contact. De nombreux blocs et particules se forment à l'interface du pion (Figs. IV. 15 (c) et IV. 15 (d)). Lorsque les particules d'usure sont éliminées de la surface de contact du pion, des sillons se forment sur la surface de contact à cause de l'abrasion. De la même manière, quelques particules d'usure accumulées peuvent être observées au bord de la trace due à l'usure (Fig. IV. 15 (e)). C'est le mécanisme de formation de l'usure par délamination due à l'échauffement de la surface de contact par effet Joule.

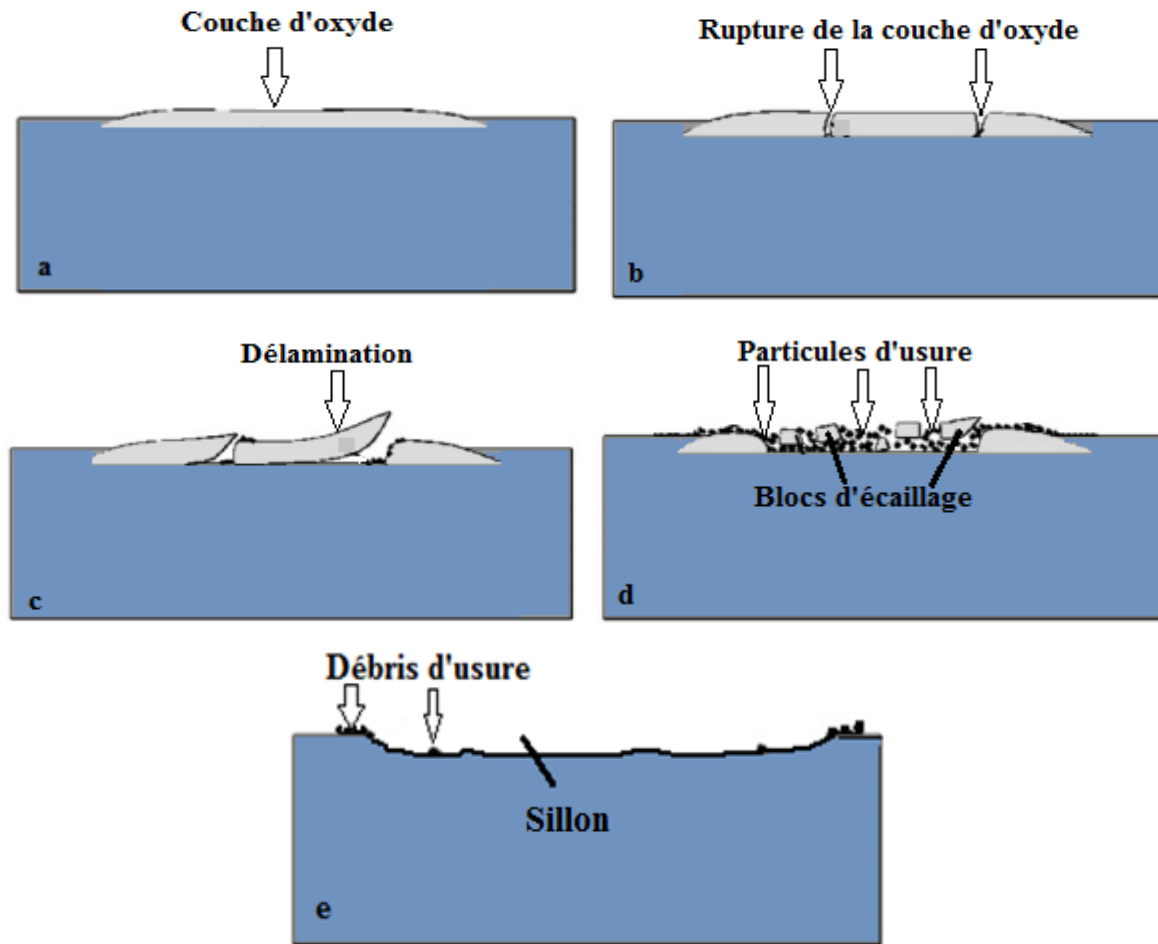
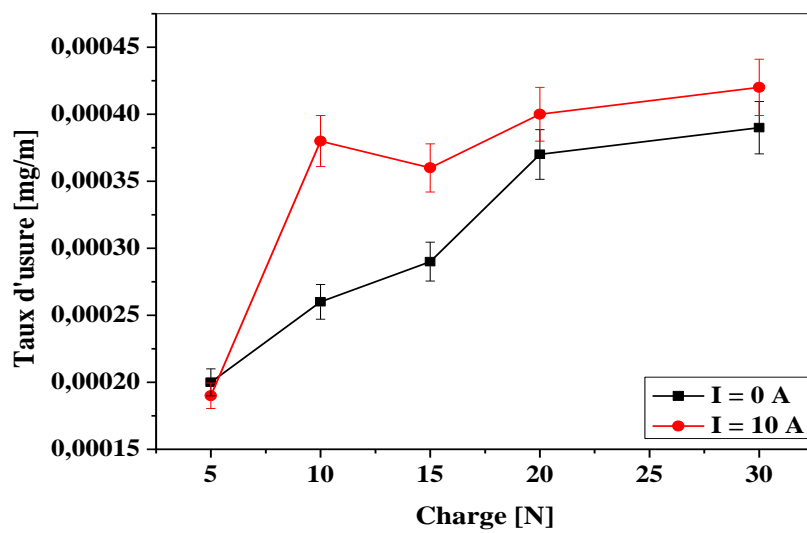
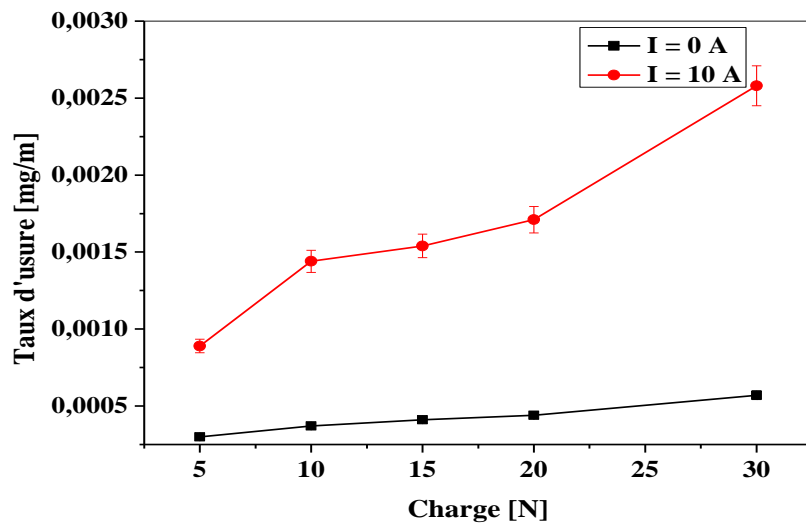


Figure. IV. 15. Modèle physique du mécanisme de formation de l'usure par délamination [9].



(a)



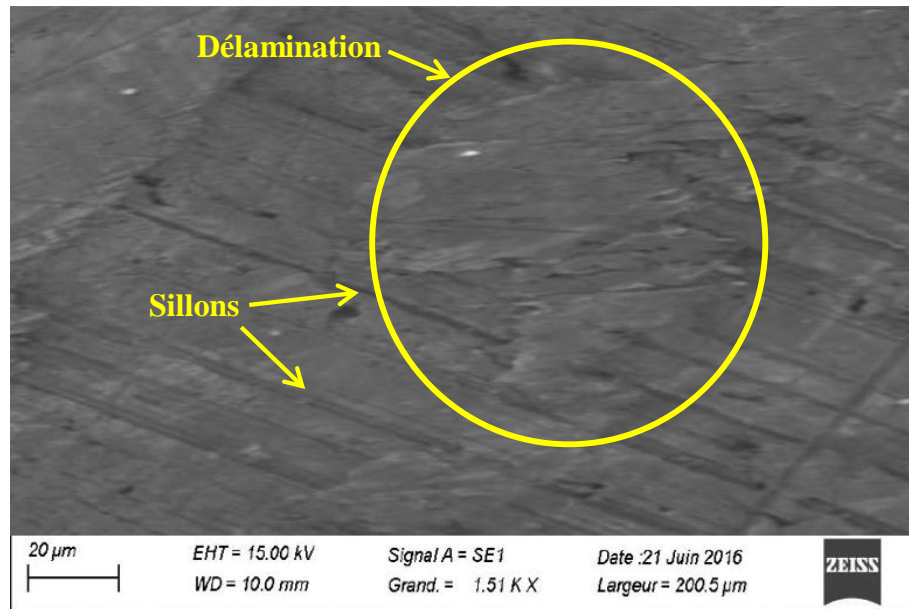
(b)

Figure IV. 16. Variation du taux d'usure du pion en fonction de la charge appliquée avec et sans passage du courant électrique pour les couples : (a) cuivre-graphite (b) graphite-graphite.

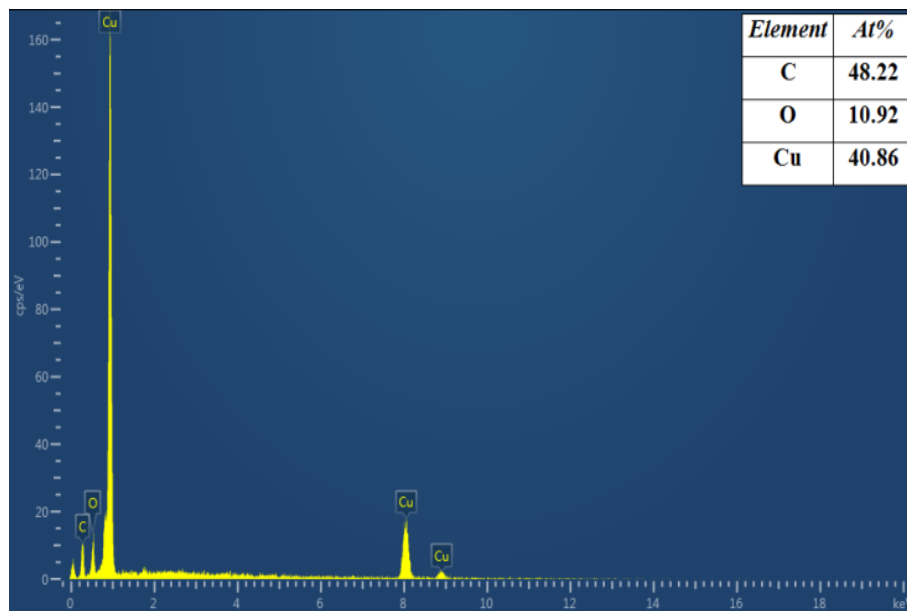
La morphologie de la surface usée du pion en cuivre est observée par MEB pour plusieurs intensités du courant électrique. On observe un pic d'oxyde de cuivre de 52 % et un pic de 48 % de graphite transféré vers la surface du pion en cuivre (Fig. IV. 17). Une couche d'oxyde de cuivre formée sur la surface du pion facilement détachable. Elle donne une idée sur la température de contact atteinte au niveau des aspérités et qui dépasse vraisemblablement les 400 °C [19]. Cette couche est due à l'élévation de la température de contact à l'interface des antagonistes.

La surface usée (Fig. IV. 18 (a)) présente des micro-fissures, des rainures profondes et des blocs écaillés. Abrasion ou délamination crée le troisième corps à l'interface du frottement (abrasion à trois corps). Le spectre EDS (Fig. IV. 18 (b)) montre des pics de carbone avec 52,07 %, des pics de cuivre avec 31,29 % et la présence d'un pic d'oxygène avec 16,64 %.

Donc, la délamination et l'abrasion sont les mécanismes d'usure dominants lorsqu'on a un passage du courant électrique.

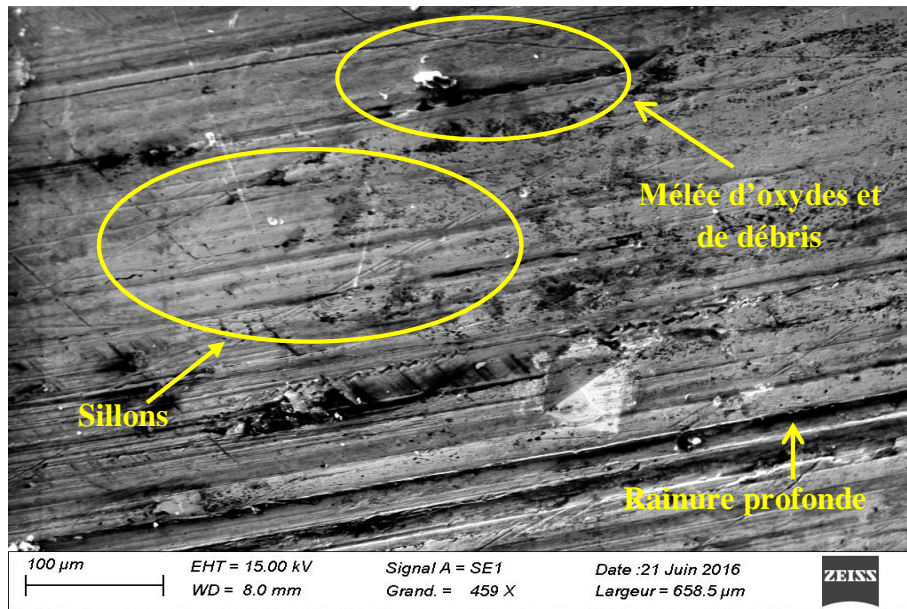


(a)

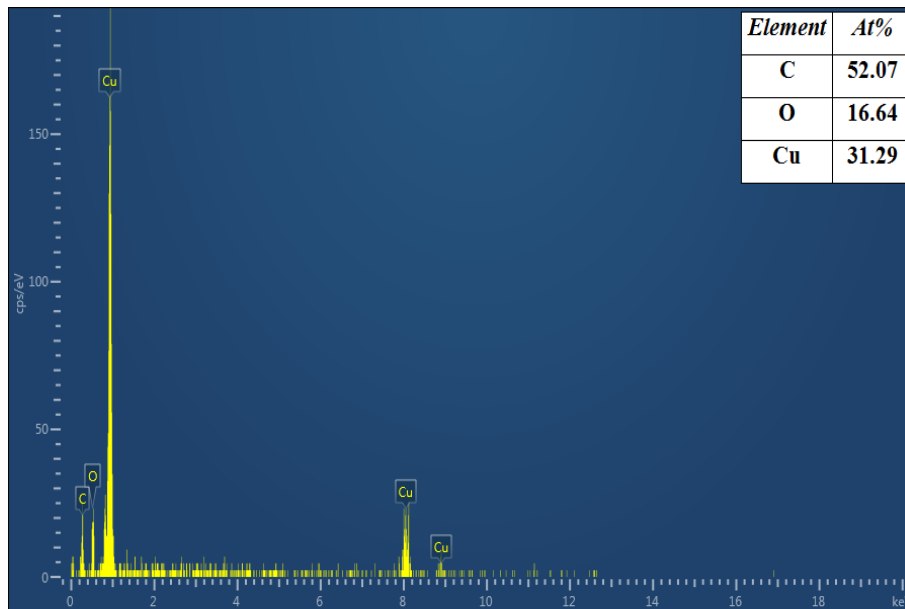


(b)

Figure IV. 17. (a) : image obtenue par MEB de la surface du pion en cuivre usée pour $P = 20$ N, $V = 0,5$ m/s et $I = 3$ A ; (b) : spectre EDS.



(a)



(b)

Figure IV. 18. (a) : image MEB de la surface du pion en cuivre usée pour $P = 20 \text{ N}$, $V = 0,5 \text{ m/s}$ et $I = 10 \text{ A}$; (b) : spectre EDS.

Des études effectuées dans des conditions de courant électrique plus élevé ($I = 250 \text{ A}$) et une charge normale appliquée de 120 N [4], l'usure de la piste de contact devient plus sévère avec l'augmentation de la vitesse de glissement (200 à 300 Km/h). Une observation par la

microscopie électronique à balayage de la surface de contact est illustrée par la figure IV. 19. Il y a des creux d'érosion qui se répartissent sur toute la surface usée du pion donnant une surface inégale et des fissures dues à la contrainte thermique.

Ding et al. [9] ont étudié l'effet de l'arc électrique sur le comportement en frottement et en usure de la bande de carbone pur glissée sur un câble en cuivre (système pantographe-caténaire). Ils ont constaté que, le coefficient de frottement augmente au début de l'essai en raison de l'accumulation des débris d'usure. Puis, Une adhérence de l'oxyde à l'interface crée par effet Joule et une modification de sa rhéologie par réduction de la force de frottement, facilite le glissement et diminue l'endommagement [9]. On a pu constater, un comportement à peu près similaire pour le couple cuivre-graphite (Fig. IV. 2(a)).

La morphologie de la surface usée à une température ambiante avec une décharge de l'arc électrique est observée par MEB [9]. Beaucoup des sillons dus à des déformations plastiques engendrés par des particules d'usure, des zones brillantes blanches, des creux d'arc électrique et un nombre important de débris sont visibles sur la surface usée (Fig. IV. 20(a)). En revanche, pour des conditions de température contrôlée ($T = 220\text{ °C}$) [9], on peut constater qu'il y a des cratères et des zones brillantes blanches (Fig. IV. 20(b)). Cela est attribué à l'ablation de l'arc, à la fusion du métal et à l'usure due à l'oxydation provoquée par l'action intégrée de la décharge en arc et des températures élevées.

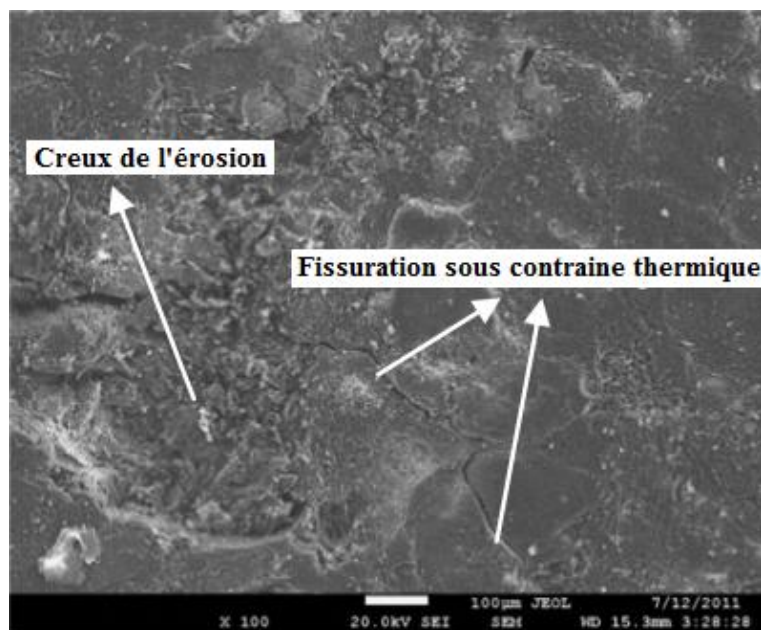
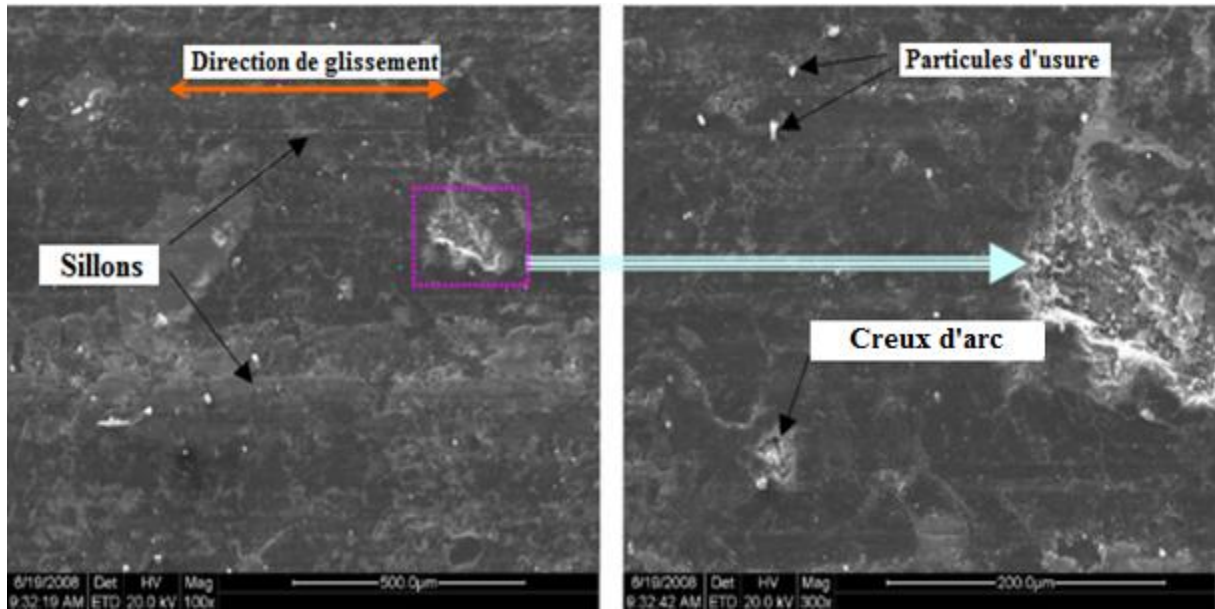
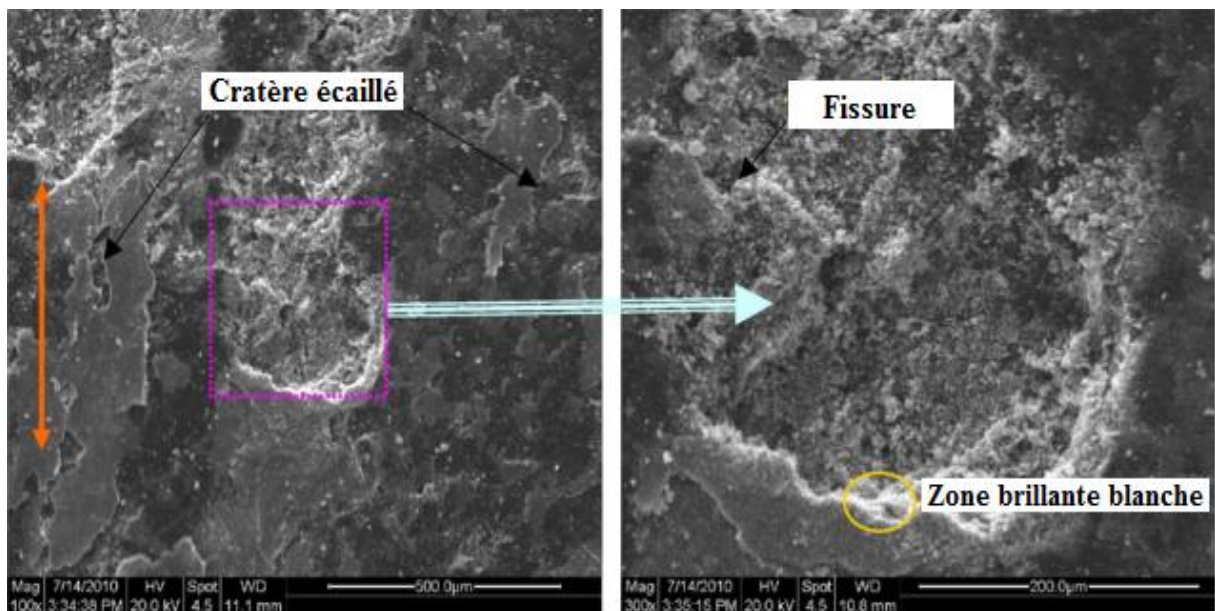


Figure IV. 19. Image MEB de la surface usée du pion pour $I = 250\text{ A}$, $P = 120\text{ N}$ et $V = 200\text{ km/h}$ [4].



(a)



(b)

Figure IV. 20. Comparaison entre les micrographies MEB des surfaces usées avec : (a) $I = 30$ A à une température ambiante ; (b) $I = 30$ A et $T = 220$ ° C [9].

IV. 3. 3. Effet du courant électrique sur la température de contact

D'après la théorie de Holm [20], la zone des contacts électriques est illustrée par la figure IV. 21. Le flux de courant entre les extrémités des couples en frottement est limité par la zone étroite de contacts métal-métal, appelée «Spots». Tout contact électrique est supposé contenir un certain nombre de Spots. L'aire de conduction électrique est la somme des aires de Spots qui représente une très petite fraction de l'aire réelle de contact, nettement plus petite que l'aire apparente de contact [21,22].

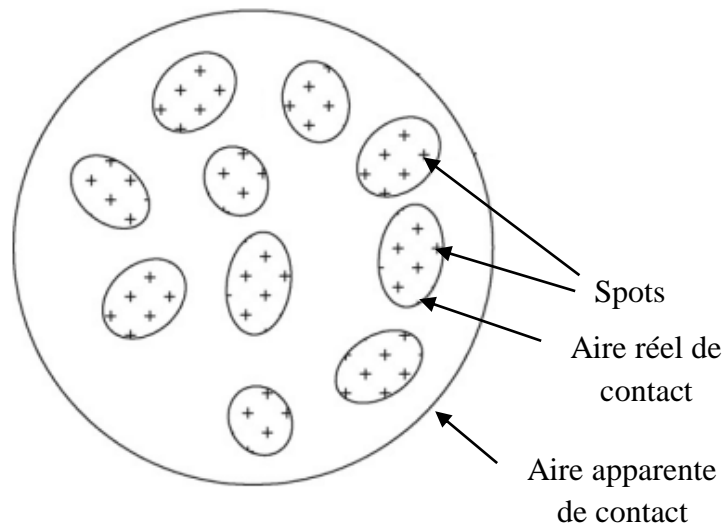


Figure. IV. 21. Schéma d'un contact électrique

Holm [20] montre que, le passage d'une intensité du courant électrique augmente la température de contact à l'interface, ce qui réduit l'énergie des liaisons entre les métaux en contact et facilite le glissement.

Ainsi, la surface de contact du pion est chauffée d'une façon continue pour tous les points composant son parcours sur la surface du disque [23, 24]. En revanche, l'évolution de la température de contact sur la surface de contact du disque est périodique dans le temps. Chaque point de la piste de contact sur le disque est chauffé au contact du pion, puis refroidi par convection, de sorte que, il se déplace loin du point de contact.

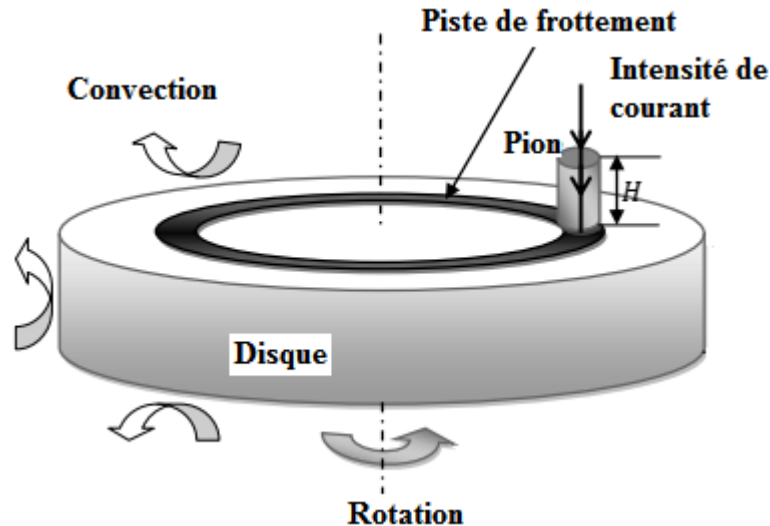


Figure. IV. 22. Principe d'un contact pion-disque [24]

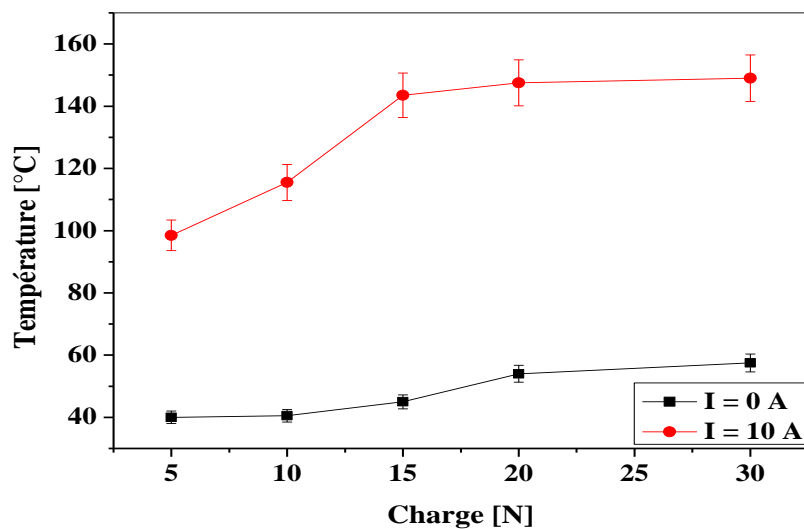
D'autre part, Elhadi [13] a étudié l'évolution de la température de contact à l'interface pour des pions de dureté différente. Il a constaté que, la variation de la température de contact des pions de haute dureté par rapport aux pions de faible dureté est attribuée à l'aire de contact. Hisakado et Tsukizoe [25] montre que, l'aire de contact est toujours proportionnelle à la charge appliquée et diminue lorsque la dureté augmente.

L'évolution de la température de contact passe toujours par deux phases : transitoire et permanente (Fig. IV. 8), avec l'augmentation de flux de chaleur généré à l'interface par le passage du courant électrique ($\phi_{\text{Joule}} + \phi_{\text{Arc}}$). La durée de la période transitoire dépend des paramètres électromécaniques particulièrement la vitesse de glissement [26]. En effet, si la vitesse de glissement augmente, cette période diminue.

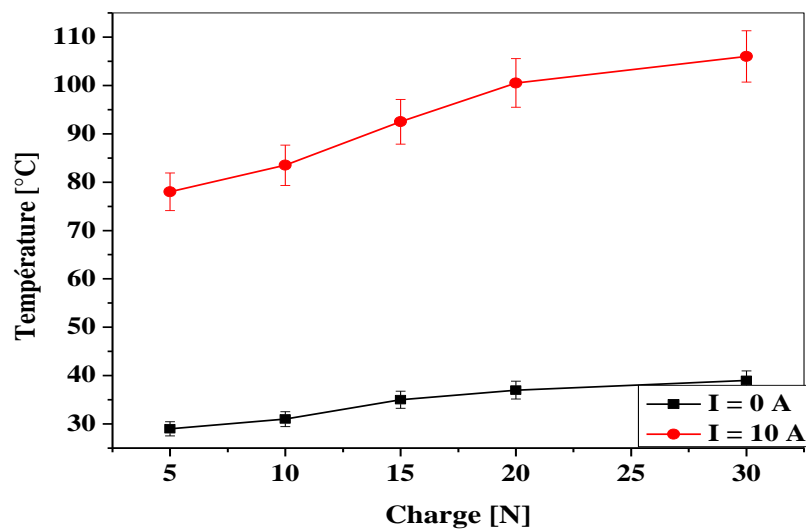
Comme on l'a signalé plus haut, la température de contact mesurée à 2 mm de la surface frottante, en fonction de la charge appliquée, avec et sans passage du courant électrique pour les deux couples cuivre-graphite et graphite-graphite augmente rapidement avec l'augmentation de la charge appliquée (Fig. IV. 23). L'examen de la figure. IV. 23 montre que sans passage du courant électrique ($I = 0$ A), la valeur asymptotique de la température de contact maximale est environ 54 °C. Cependant, pour un courant électrique de 10 A, la valeur de la température de contact maximale atteint la valeur de 148 °C favorisant ainsi la création d'un film d'oxyde à l'interface (Fig. IV. 18), provoquant un ramollissement des jonctions du pion en cuivre ($T_{\text{Cu max}} > T_{\text{Cu critique}}$) [27,28], diminue la rugosité de la surface (Tab. IV. 1) et facilite le transfert des particules arrachées vers les creux de la contre face (Fig. IV. 14).

De plus, l'élévation de la température de contact augmente la vitesse des différentes réactions chimiques et en particulier la vitesse de la formation d'une couche d'oxyde à l'interface du pion en cuivre [26]. La production des étincelles observées à l'interface, de temps à autre, au cours de l'essai a influencée sur le processus de frottement électrique.

Par ailleurs, La chaleur produite par effet Joule, effet d'arc électrique et le frottement mécanique entraîne une augmentation rapide de la température à l'interface des surfaces du couple et conduit à une fusion locale du matériau le plus doux [9, 29-31]. Donc, ils sont les principales sources de l'élévation de la température lors du processus de frottement dynamique traversé par un courant électrique.



(a)



(b)

Figure IV. 23. Variation de la température de contact en fonction de la charge appliquée avec et sans passage du courant électrique : (a) cuivre-graphite (b) graphite-graphite.

IV. 4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on s'est intéressé à l'étude du comportement tribologique et thermique des couples dynamiques cuivre-graphite et graphite-graphite avec passage du courant électrique.

Plusieurs essais expérimentaux ont été effectués à l'aide d'un tribomètre pion-disque sous un contact glissant sec à l'air ambiant pour un courant électrique variant de 0 à 10 A, des charges normales comprises entre 5 et 30 N et une faible vitesse de glissement fixée à 0,5 m/s. Les modifications de la topographie et de la chimie des tribo-surfaces ont été caractérisées par microscopie électronique à balayage (MEB) et spectromètre à dispersion d'énergie (EDS). Différents points peuvent être tirés :

- Le coefficient de frottement diminue avec l'augmentation de l'intensité du courant électrique et de la charge appliquée. Ces dernières engendrent une élévation de la température interfaciale des antagonistes, favorisant le développement du film d'oxyde ;

- Avec passage du courant électrique, le taux d'usure du cuivre est presque constant avec l'accroissement de la charge normale et de l'intensité du courant à cause de l'adhérence de l'oxyde à l'interface qui facilite le glissement et diminue l'endommagement ;
- Le comportement en frottement et en usure pour une vitesse de glissement faible, en présence du courant électrique, sont similaires à ceux obtenus par d'autres chercheurs travaillant avec des vitesses de glissement élevées ;
- En présence de courant électrique, la génération des particules d'oxyde abrasives régit le comportement tribologique du couple. Le mécanisme d'usure adhésive est actif dans le cas où le courant électrique $I = 0 \text{ A}$;
- La température mesurée au voisinage de la surface de contact augmente rapidement avec la charge d'appui et l'intensité du courant électrique. Cette élévation provoque un ramollissement des jonctions, qui par la suite facilite le transfert des débris arrachés par frottement vers les creux de la contre face en entraînant à la fin une diminution de la rugosité de la surface.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Y. Mouadji, (2013), « Effets du courant électrique sur le mécanisme de croissance de la couche d'oxyde à l'interface des contacts électrodynamiques cuivre-graphite et graphite-graphite », Thèse de Doctorat en science, Université Frères Mentouri Constantine 1, Algérie.
- [2] E.M. Bortoleto et al, « Experimental and numerical analysis of dry contact in the pin on disc test », *Wear*, 301, (2013), 19-26.
- [3] A. Senouci, J. Frene, H. Zaidi, « Wear mechanism in graphite–copper electrical sliding contact », *Wear*, 225–229, (1999), pp. 949–953 (Part 2).
- [4] Jie Yang et al, « Experimental research on the friction and wear properties of a contact strip of a pantograph–catenary system at the sliding speed of 350 km/h with electric current », *Wear*, 332-333, (2015), 949–955.
- [5] Chen, G.X., Hu, Y., Dong, B.J., Yang, H.J., Gao, G.Q., Wu, G.N., Zhang, W.H., Zhou, Z.R, « Experimental study on the temperature of the contact strip in sliding electric contact », *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 231, (2017), 1268-1275.
- [6] J. Brocaïl, M. Watremez, L. Dubar, « Identification of a friction model for modeling of orthogonal cutting », *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 50, (2010), 807-814.
- [7] A. Yasuhisa, « lowering friction under low loads by minimizing effects of adhesion force and viscous resistance », *Wear*, 254, (2003), 965-973.
- [8] J. F. Archard, « Wear Theory and Mechanisms, Wear Control Handbook », M. B. Peterson and W.O. Winer, eds., ASME, New York, NY, (1980), 35–80.
- [9] T. Ding, G.X. Chen, J. Bu, W.H. Zhang, « Effect of temperature and arc discharge on friction and wear behaviors of carbon strip/copper contact wire in pantograph–catenary systems », *Wear*, 271, (2011), 1629-1636.
- [10] Y.A. Wang, J.X. Li n, Y. Yan, L.J. Qiao, « Effect of electrical current on tribological behavior of copper-impregnated metallized carbon against a Cu–Cr–Zr alloy », *Tribology International*, 50, (2012), 26–34.

- [11] T. Ding, G.X. Chen, X. Wang, M.H. Zhu, W.H. Zhang, W.X. Zhou, « Friction and wear behavior of pure carbon strip sliding against copper contact wire under AC passage at high speeds », *Tribology International*, 44, (2011), 437–444.
- [12] X.C. Ma, G.Q. He, D.H. He, C.S. Chen, Z.F. Hu, « Sliding wear behavior of copper-graphite composite material for use in maglev transportation system », *Wear*, 265, (2008), 1087–1092.
- [13] A. Elhadi, (2018), « Processus de formation et de rupture des couches d’oxydes dans le contact tournant sec acier-acier : conséquences sur le frottement et l’usure », Thèse de Doctorat en science, Université Frères Mentouri Constantine 1, Algérie.
- [14] Ding T, Chen GX, Zhu MH, Zhang WH, and Zhou ZR. « Influence of the spring stiffness on friction and wear behaviors of stainless steel/copper-impregnated metallized carbon couple with electrical current », *Wear*, 267, (2009), 1080–1086.
- [15] Bouchoucha A, Chekroud S, Paulmier D. « Influence of the electrical sliding speed on friction and wear processes in an electrical contact copper– stainless steel ». *Applied Surface Science*, 223, (2004), 330–42.
- [16] H. Zaidi, M. Amirat, C. Vallée et J. Frêne. « Magnéto-tribologie des contacts glissants ferromagnétiques », 18ème Congrès Français de Mécanique Grenoble, 27-31 août (2007).
- [17] J.P. Bonal, J. Charles Robin, « Un matériau fascinant : le graphite », 2005.
- [18] M.O.A. Mokhtar et al. « A theoretical and experimental study on the dynamics of sliding bodies with dry conformal contacts ». *Wear*, 218, (1998), 172-178.
- [19] A. Dubois-Salomon, « Chimie de l’état solide. Paris. Ed. Masson », p.250, (1978).
- [20] R. Holm, « Electric Contacts », Springer, Berlin, 1967.
- [21] T.A. Dow, J.W. Kannel, « Thermomechanical effects in high current density electrical slip rings », *Wear*, 79, (1982), 93–105.
- [22] D.K. Lawson, T.A. Dow, The sparking and wear of high current density electrical brushes, *Wear*, 102, (1985), 105–125.

[23] A. Mekroud, "Influence du champ magnétique sur le comportement tribologique des couples métalliques glissants acier XC 48/acier XC 48, laiton/acier XC 48 et aluminium/acier XC 48". Thèse de Doctorat en science, Université Frères Mentouri Constantine 1, Algérie.

[24] N. Aderghal, (2012), « Répartition des flux de chaleur générés par frottement mécanique et modélisation des températures à l'interface des contacts dynamiques Cuivre-Acier et Cuivre-Graphite ». Thèse de Doctorat en science, Université Frères Mentouri Constantine 1, Algérie.

[25] T. Hisakado, T. Tsukizoe, « Effects of distribution of surface slopes and flow pressures of contact asperities on contact between solid surfaces », *Wear*, 30, (1974), 213-227.

[26] D. Bekhouche et al. « Thermal behaviour of the graphite-bronze couple in dry sliding conditions studied with taguchi method », *International Journal of Mechanics and Control*, 18(1), (2017), 31-37.

[27] G. Bucca and A. Collina, « A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph–catenary system », *Wear*, 266, (2009), 46–59.

[28] A. Bouchoucha, (1988), « Contribution à l'étude du comportement en frottement et usure du cuivre dans un contact dynamique cuivre-acier traversé par un courant électrique », Thèse de doctorat INPL, Nancy, France.

[29] A. Bouchoucha, E.K. Kadiri, F. Robert, H. Zaidi, D. Paulmier, « Metals transfer and oxidation of copper–steel surfaces in electrical sliding contact », *Surface and Coatings Technology*, 76–77, (1995), 521–527.

[30] H. Nagasawa, K. Kato, « Wear mechanism of copper alloy wire sliding against iron-base strip under electric current », *Wear*, 216, (1998), 179–183.

[31] S. Kubo, K. Kato, « Effect of arc discharge on wear rate of Cu-impregnated carbon strip in unlubricated sliding against Cu trolley under electric current », *Wear*, 216, (1998), 172–178.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de thèse exposé s'intéresse à l'étude de l'effet des paramètres mécaniques et électriques sur le comportement tribo-thermique des couples des matériaux glissants cuivre-graphite et graphite-graphite à une ambiance atmosphérique. Une série des essais expérimentaux a été faite à l'aide d'un tribomètre pion-disque pour déterminer le coefficient de frottement, le taux d'usure et la température de contact avec et sans passage du courant électrique.

Plusieurs essais de frottement a permis d'étudier l'influence des paramètres mécaniques et électriques sur le comportement tribologique et thermique des couples de matériau, ainsi que l'oxydation des surfaces frottantes. L'évolution du coefficient de frottement, l'usure et la température de contact généré à l'interface de contact ont été identifiés.

Le calcul numérique de la température de contact grâce à une valeur du coefficient de frottement expérimental et la modélisation du contact dynamique pour calculer le coefficient de frottement théorique, on utilisant l'équation de Bowden et Tabor en fonction de la charge appliquée et la vitesse de glissement, a été établi à partir de la modélisation du contact plan-plan.

La charge normale, la vitesse de glissement, le courant électrique et le temps d'essai sont des paramètres jouent un rôle primordial sur le comportement tribologique et thermique surtout le processus d'oxydation pour le couple cuivre-graphite.

Pour les deux couples tribologiques cuivre-graphite et graphite-graphite sans passage du courant électrique, on remarque qu'il y a une faible variation entre les valeurs du coefficient de frottement en fonction de la charge appliquée, et des valeurs presque constantes pour des petites vitesses de glissement. Les paramètres mécaniques ont une influence significative sur l'usure du pion en graphite et un faible effet pour le pion en cuivre, et le type d'usure qui domine dans ce cas est l'usure adhésive. La température de contact est toujours augmentée en fonction de la charge appliquée avec moins d'importance en fonction de la vitesse de glissement. Le couple graphite-graphite donne des meilleurs résultats par rapport au couple cuivre-graphite concernant l'évolution de la température de contact pour toutes variation des paramètres mécanique et ce à cause des propriétés thermique du carbone.

Avec passage du courant électrique, le coefficient de frottement diminue en fonction de la charge appliquée, et une faible variation entre les deux couples de matériau en fonction

du courant électrique. Une grande augmentation du taux d'usure pour le couple graphite-graphite par rapport au couple cuivre-graphite en fonction des paramètres mécaniques et électriques, et ce à cause de l'effet de la couche d'oxyde créée à l'interface du pion en cuivre. Une température de contact élevée par rapport au cas d'un courant électrique nul. La couche d'oxyde créée à l'interface par effet Joule réduit la surface réelle de contact par réduction de nombre des jonctions métalliques et, joue un rôle d'un lubrifiant solide entre les antagonistes.

Le passage du courant électrique a un effet très important, il modifie la chimie et la topographie des tribo-surfaces, augmente la surface usée de la piste de frottement du couple graphite-graphite, favorise l'oxydation et élimine l'usure adhésif.

Les paramètres mécaniques et électriques jouent un rôle primordial sur le comportement tribologique surtout le processus d'oxydation pour le couple cuivre-graphite qui protège le pion contre l'usure, et diminue la force de frottement.

Le comportement en frottement et en usure des couples des matériaux dans un contact dynamique à petite vitesse est le même si on comparant avec des travaux qui utilisent des vitesses de glissement plus élevées avec et sans passage du courant électrique.

On peut considérer que ce travail est une contribution dans le domaine des contacts glissant traversé par un courant électrique constant.

Perspectives

Une étude à avenir devrait se tourner sur les étapes suivantes :

- Etude du comportement tribologique des couples de matériaux sous des intensités du courant électrique élevées ;
- Etude du comportement tribologique des contacts électrodynamiques sec sous des charges et des vitesses de glissement élevées ;
- Analyser l'état des surfaces usées en utilisant un microscope électronique à fort grossissement pour identifier les phénomènes de frottement résultants.