

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET METALLURGIE

ENSMM-Annaba-



DÉPARTEMENT SCIENCE ET GÉNIE DES MATÉRIAUX

Mémoire de fin d'études

MASTER

THÈME :
ETUDE DE COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE
DE L'ALLIAGE TI-NI-CU

Présenté par : - HEBBAZ Abd ennour

Encadré(e) par : - Dr KAHLOUL Latifa

Membres du jury : - Dr Y.TAIBI Présidente
- Dr T.TAHRAOUI Rapporteur

Juin 2016

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à ma mère et ma grande sœur

A mon père source de courage et volante qui m'a soutenu tous
le long de ma vie.

A ma famille la plus chère à ma vie.

Et tous mes collègues de l'ENSMM.

Abdennour

Remerciements

J'aimerais avant tout remercier «الله»

Je tiens à remercier mes parents qui m'ont soutenu tout le long de ma vie et c'est grâce à eux que je suis arrivé à ce niveau.

Ce mémoire concrétise trois mois de travail effectuée au département de Chimie, Physique, Métallurgie et Génie des Matériaux à l'université d'ANNABA et l'école Nationale Supérieure des Mines et Métallurgie d'ANNABA. Je remercie particulièrement Mme **Latifa KAHLOUL** Maître assistante, qui a assuré l'encadrement de ma mémoire d'ingénieur et de master. Je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance.

Il m'est très agréable de remercier tous ceux, qui d'une manière ou d'une autre, m'ont apporté leur contribution, les personnels de laboratoire en particulier **Mme S. MEDDAH** et Monsieur **N. BENAMIRA** et **H. BRAHMIA**.

Sommaire

Chapitre I

Synthèse bibliographique

Introduction :.....	1
I.1. Introduction sur l'alliage Ti-Ni-Cu :.....	3
I.2. Structure et formes de Titane-Nickel (Ti-Ni) :.....	3
I.2. La tribologie :.....	5
I.3. Les 4 principaux modes d'usure :.....	5

Chapitre II

Techniques expérimentales

II.1. Préparation des échantillons :.....	8
II.2. Mesure de rugosité :.....	8
II.3. Tests tribologiques :.....	9
II.4. Le microscope électronique à balayage (MEB) :.....	10

Chapitre III

Résultats et discussion

III.1. La rugosité :.....	13
III.2. Partenaire statique en AL ₂ O ₃ :.....	14
III.2.1. Courbes de frottement :.....	14
III.2.2. Images de MEB :.....	16
III.2.3. L'analyse EDS :.....	17
III.3. Partenaire statique en Os :.....	18
III.3.1. Courbes de frottement :.....	18
III.3.2. Images de MEB:.....	20
III.3.3. L'analyse EDS :.....	21
Conclusion :.....	22

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Présentation de la structure austénite en système Ti-Ni [2] :.....	4
Figure I.2 : La structure cristalline de la martensite dans un alliage de Ti-Ni [2] :.....	4
Figure I.3 : La déformation nécessaire pour transformer une maille cubique en une maille rhomboédrique [2] :.....	4
Figure I.4 : les paramètres d'un essai tribologique [3] :.....	5

Chapitre II

Figure II.1 : Principe de rugosimètre :.....	8
Figure II.2 : Rugosimètre de type TR220 :.....	8
Figure II.2 : Un tribomètre :.....	9
Figure II.3 : Schéma représentatif d'un MEB :.....	10

Chapitre III

Figure III.1 : Evolution de coefficient de frottement en fonction de la distance des couples échantillon fritté/ Al ₂ O ₃	13
Figure III.2 : Histogramme illustrant l'évolution de coefficient de frottement en fonction de teneur de cuivre du couple alliage TiNiCu/ Al ₂ O ₃	14
Figure III.3 : Photo MEB des pistes d'usure des échantillons frités/ Al ₂ O ₃ . a : 0% de Cu, b : 2% de Cu, c : 4% de Cu, d : 6% de Cu, e : 8% de Cu.....	15
Figure III.4 : L'analyse EDS d'usure des échantillons frités/ Al ₂ O ₃ , a : 0% de Cu, b : 2% de Cu, c : 4% de Cu, d : 6% de Cu, e : 8% de Cu.....	16
Figure III.5 : Evolution de coefficient de frottement en fonction de la distance des couples échantillon fritté/ Os	17
Figure III.6 : Histogramme illustrant l'évolution de coefficient de frottement en fonction de teneur de cuivre du couple alliage TiNiCu/ Os.....	18
Figure III.7 : Photo MEB des pistes d'usure des échantillons frités/ Os. a : 0% de Cu, b : 2% de Cu, c : 4% de Cu, d : 6% de Cu, e : 8% de Cu.....	19
Figure III.8 :L'analyse EDS d'usure des échantillons frités/Os, a : 0% de Cu, b : 2% de Cu, c : 4% de Cu, d : 6% de Cu, e : 8% de Cu.....	20

Liste de tableaux

Chapitre II

Tableau II.1 : les conditions des essais tribologiques :.....12

Chapitre III

Tableau III.1 : Les paramètres de rugosité de chaque échantillon :.....13

Tableau III.2 : Le coefficient de frottement moyenne des échantillons pour Al_2O_3 :.....13

Tableau III.3 : Le coefficient de frottement moyen des échantillons pour l'Os :.....17

Résumé :

La biocompatibilité peut être classée en deux types : structurale et de surface. Elle est caractérisée par les endommagements causés par l'interaction implant -tissus. Ces dommages sont liés à des produits libérés par le frottement.

A cet effet, l'Objectif de ce travail est l'étude du comportement tribologique de l'alliage TiNiCu poreux obtenu par frittage, en utilisant deux partenaires statiques : bille en alumine et pion en Os. Les résultats d'investigation confirment que la dégradation par l'usure se manifeste par le mode abrasif pour les deux partenaires. L'addition du cuivre améliore les propriétés tribologiques de l'alliage élaboré, en diminuant le coefficient de frottement.

Introduction :

Le développement de nouveaux biomatériaux requiert des exigences qui dépendent de la fonction et de l'endroit d'implantation. La compréhension des mécanismes associés à l'interaction matériau-milieu physiologique constitue un intérêt de plusieurs chercheurs. Bien qu'il soit difficile de simuler de façon réaliste l'environnement biologique dans lequel le biomatériau sera utilisé, l'évaluation in vitro de la corrosion demeure le seul moyen de fournir une estimation raisonnable du comportement électrochimique. La biocompatibilité des implants est une condition donc indispensable à leur usage [5]. Elle peut être définie par la compatibilité entre un système technique et un système biologique. On distingue deux types de biocompatibilité, structurale et celle de surface. Elle est caractéristique de l'endommagement provoqué par l'implant sur les tissus. Cet endommagement est lié aux propriétés mécaniques de l'implant et aux produits libérés par le frottement et par la corrosion qui se manifestent à l'interface du biomatériau et des tissus environnants. A cet effet l'objectif de ce travail est l'étude tribologique de l'alliage TiNiCu poreux obtenus par le frittage. Les tests de frottement à sec ont été effectués en utilisant un tribomètre CSM-Instrument de type Bille-Disque et Pion-Disque. Les contacts testés sont ceux d'alliage – Al_2O_3 et alliage – os.

Chapitre I

Synthèse bibliographie

I.1. Introduction sur l'alliage Ti-Ni-Cu :

Les composés equiatomiques Ti-Ni sont largement utilisés dans des applications biomédicales et d'ingénierie, en raison de leur effet de mémoire de forme, super-élasticité et biocompatibilité. Ces propriétés sont significativement modifiée par un écart de composition et peut être considérablement améliorée par l'ajout d'un troisième élément (tel que le cuivre) au composé binaire. Par le remplacement partiel de nickel avec le cuivre, non seulement la sensibilité de la composition de l'alliage est réduite, mais les caractéristiques de mémoire également la résistance à la corrosion de l'alliage peut être améliorée et le comportement de la transformation et la forme peuvent être affectées [1].

I.2. Structure et formes de Titane-Nickel (Ti-Ni) :

Les alliages à base de Ti-Ni présente une phase haute température ordonnée (austénite) qui est en général de type cubique à faces centrées ou cubique centrée. Cette phase de haute symétrie se transforme lors de refroidissement en une phase de symétrie moins élevée, nommée "Martensite". L'ordre atomique est important pour la réversibilité de transformation thermo-élastique, sans être une condition nécessaire à son apparition il s'agit d'une condition suffisante [2].

a. La phase austénite

Les alliages à base de Ti-Ni, présentant l'effet mémoire de forme ont une structure cristallographique à haute température de type cubique B2 (type de Cs-Cl), voire *la figure I.1*. Cette phase, appelée phase mère ou austénite, est une phase ordonnée qui n'est pas stable que pour une gamme de composition très proche de la composition équiatomique [2].

b. La phase martensitique

Depuis la découverte des propriétés intéressante de Ti-Ni, plusieurs chercheurs (Hehemann, 1971, Michal, 1981) ont essayé de déterminer la structure de la phase martensitique. Les paramètres de réseau et les positions des atomes proposés par ses chercheurs sont tous relativement proches. Seul Bühner et ses collaborateurs ont obtenu, en 1983, des résultats complets en diffraction neutronique proposant un groupe d'espace $P2_1/m$. Ces résultats ont été confirmés, en 1985, par Otsuka et collaborateurs par des mesures en rayons X. Cette structure monoclinique *la figure I.2* est appelée B'19 [2].

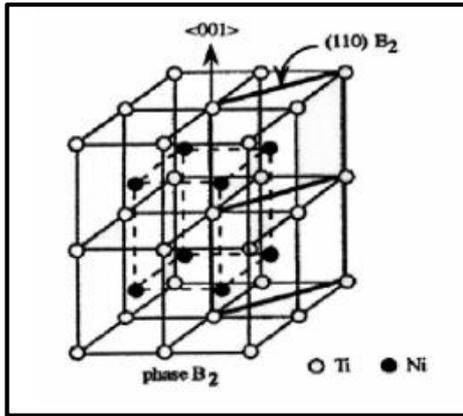


Figure I.1 : Présentation de la structure austénite en système Ti-Ni [2].

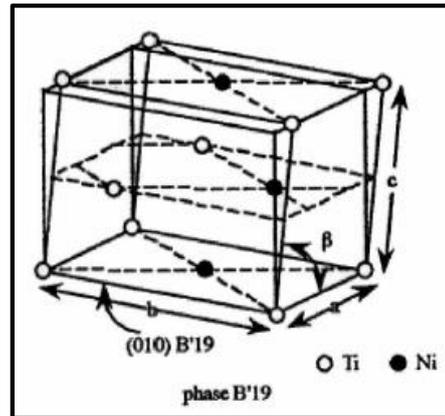


Figure I.2 : La structure cristalline de la martensite dans un alliage de Ti-Ni [2].

c. La phase R

Dans le cas des alliages à base de Ti-Ni la transformation martensitique n'est pas toujours directe. La transformation martensite - austénite peut passer par une phase intermédiaire appelée phase "R". Cela est surtout le cas quand l'alliage est surstœchiométriques en Ni ou quand le nickel est partiellement remplacé par le cobalt ou le fer.

La phase "R" est une structure martensitique, sa structure correspond à une distorsion rhomboédrique de la maille cubique, voire figure I.3. Elle peut être décrite par un allongement de la maille cubique dans la direction d'une des diagonales du cube avec une contraction dans les directions perpendiculaires telle que le changement de volume soit nul. Par le fait qu'il y ait quatre diagonales, on distingue quatre variantes différentes de la phase "R" [4].

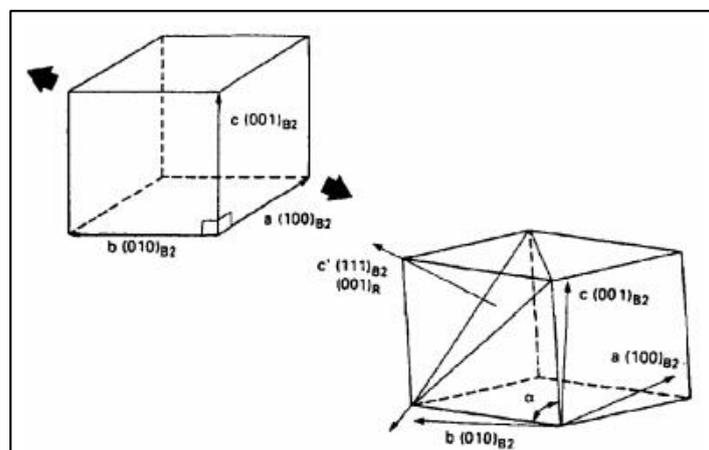


Figure I.3 : La déformation nécessaire pour transformer une maille cubique en une maille rhomboédrique [2].

I.2. La tribologie :

Un système tribologique se définit comme un système mécanique, formé de deux matériaux antagonistes en contact, animés de mouvements relatifs. Ces deux solides évoluent dans un milieu ambiant et peuvent être séparés par un film intercalaire appelé troisième corps. Sur le plan tribologique, le troisième corps est un opérateur qui transmet la charge (ou portance) d'un premier corps sur l'autre et accommode en s'écoulant (débit) d'une façon dissipative (frottement) l'essentiel de la différence de vitesse entre deux corps. Les troisièmes corps séparent partiellement ou entièrement les premiers corps. Ils sont introduits dans le contact ou bien par entraînement cinématique (lubrifiants solides ou liquides) ou par formation in situ (particules détachées), la figure I.4 montre les différents paramètres tribologiques

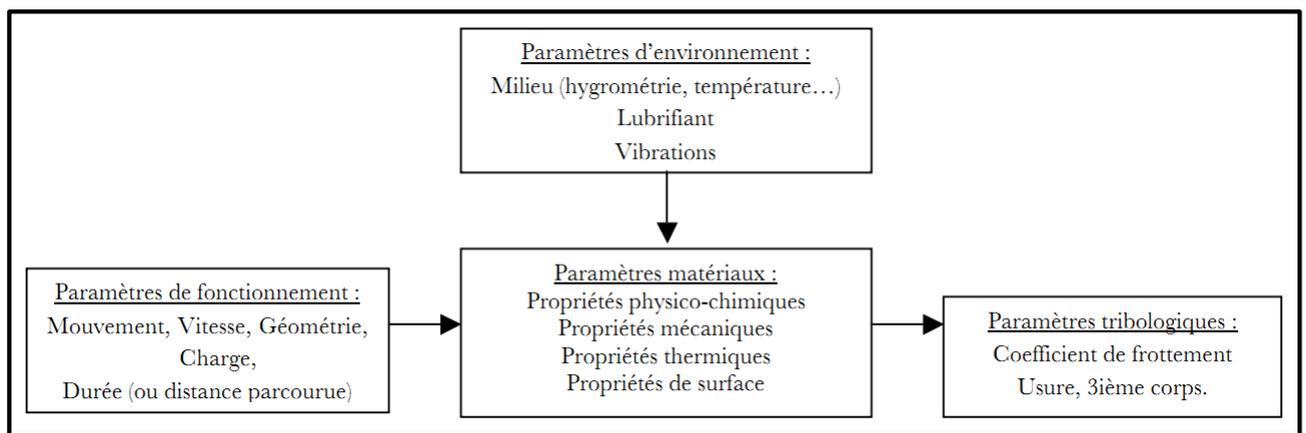


Figure I.4 : Paramètres tribologiques [3].

I.3. Les principaux modes d'usure :

A. L'usure par abrasion :

Elle se caractérise par la présence dans le contact 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 ou lié à la pollution du milieu. Ce mécanisme de dégradation qui fait intervenir dans les premiers instants uniquement les corps antagonistes, devient rapidement une usure à trois corps. Cette forme d'usure se manifeste par des polissages, des griffures, des micro-labourages (ou micro-usinage), des arrachements de particules) [3].

B. L'usure par transfert ou adhésion :

Elle se caractérise par un transfert de débris d'un des deux antagonistes vers l'autre soit par un mécanisme d'origine purement mécanique, soit suite à une réaction physico-chimique. Pour le transfert mécanique, plusieurs hypothèses ont été développées. 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 en contact) [3].

C. L'usure par fatigue :

Elle est liée à l'action d'un mouvement cyclique et à la capacité des matériaux à absorber les énergies de déformation et les contraintes thermiques générées par frottement. L'usure par fatigue se manifeste par des fissures, des écailles et des changements de structure métallurgique. Les comportements face à ce mécanisme d'usure dépendent de la nature du matériau. Dans le cas de matériaux ductiles (matériaux métalliques ou polymères), la rupture par fissuration (ou mécanisme de délaminage) a lieu en sous-couche, parallèle à la surface de frottement, dans les zones où les contraintes de cisaillement sont maximales [3].

D. L'usure par réactions tribochimiques :

C'est un système à trois composantes, où interviennent la réactivité chimique entre les surfaces, la réactivité chimique avec le milieu environnant et la réactivité physico-chimique avec les débris. Ce type de dégradation résulte d'une seule 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.

Chapitre II

Techniques expérimentales

I.1. Préparation des échantillons :

On a préparé les échantillons de l'alliage TiNiCu à partir des poudres préallié par un broyage à haute énergie effectué à l'aide d'un broyeur planétaire pendant 10 heures sous argon en suite les mélanges obtenus sont aggloméré à froid et fritté.

En fin on à obtenir des pastillés consolident et pores de forme cylindrique.

II.2. Mesure de rugosité :

Le rugosimètre est composé d'un stylet qui se déplace mécaniquement sur une surface pour enregistrer une « image » de la rugosité de surface sur une longueur d'échantillonnage déterminée.

Le principe de la mesure est présenté parla *figure II.1*.

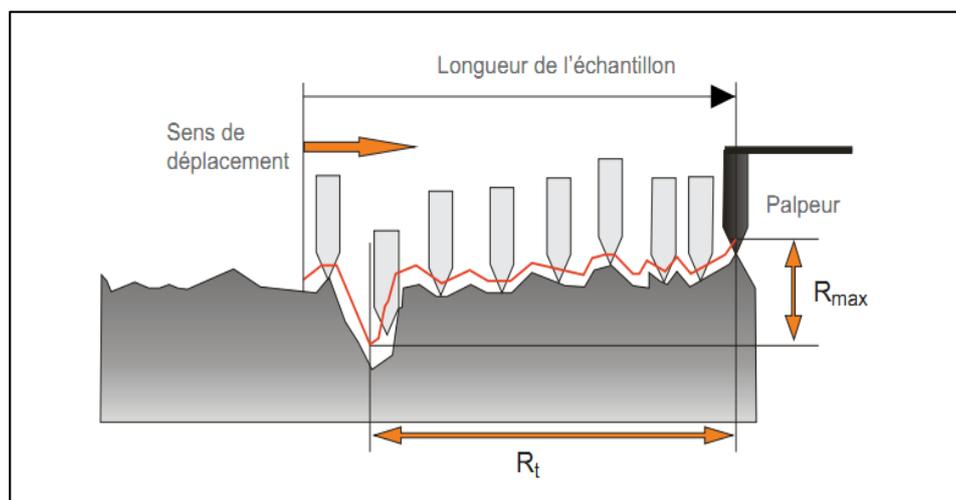


Figure II.1 : Principe de rugosimètre.



Figure II.2 : Rugosimètre de type TR220.

II.3. Tests tribologiques :

L'échantillon subit un déplacement rotatif ou alternatif en contact avec la bille en alumine (Al_2O_3) ou l'os montée sur un bras élastique sur la surface de l'échantillon durant 20mètre qui correspond approximativement à 17 min. Cependant ce processus nous a permet de trouver empiriquement la valeur de coefficient de frottement « μ . »



Figure II.2 : Un tribomètre.

Les essais tribologiques ont été réalisés à l'aide d'un tribomètre de marque CSM Instrument dopé avec un logiciel sur PC en configuration pion-plan *figure II.2*.

Les conditions des essais sont résumées dans le tableau II.1.

Tableau II.1 : les conditions des essais tribologiques.

Les conditions	Valeurs
Vitesse	2 [cm/s]
Force normale	5 [N]
Condition d'arrêt	20 [m]
Taux d'acquisition	31[hz]
Température	25[°c]
Atmosphère	Air
Humidité	50 [%]

II.4. Le microscope électronique à balayage (MEB) :

La figure II.3 présente un schéma de microscopie électronique à balayage qui permet d'examiner la morphologie des particules de poudres ou des pastilles frittées, en bombardant les poudres ou la surface avec un faisceau d'électrons très fin. Sous l'impact du faisceau d'électrons accélérés à une tension entre 10Kv et 20Kv, des électrons rétrodiffusés et des électrons secondaires émis par l'échantillon sont recueillis sélectivement par des détecteurs qui transmettent un signal à un écran cathodique dont le balayage est synchronisé avec celui du faisceau incident. Cette technique offre une vision tridimensionnelle de l'échantillon sur une très large gamme de grossissements et une souplesse d'utilisation permettant de combiner une approche morphologique et analytique.

Et pour l'analyse chimique des éléments nous avons utilisé un détecteur EDAX (analyse d'énergie dispersive des rayons-X) couplé avec le MEB ; qui est basé sur la détermination de l'énergie de rayonnement émet par l'excitation des électrons de surface de l'échantillon.

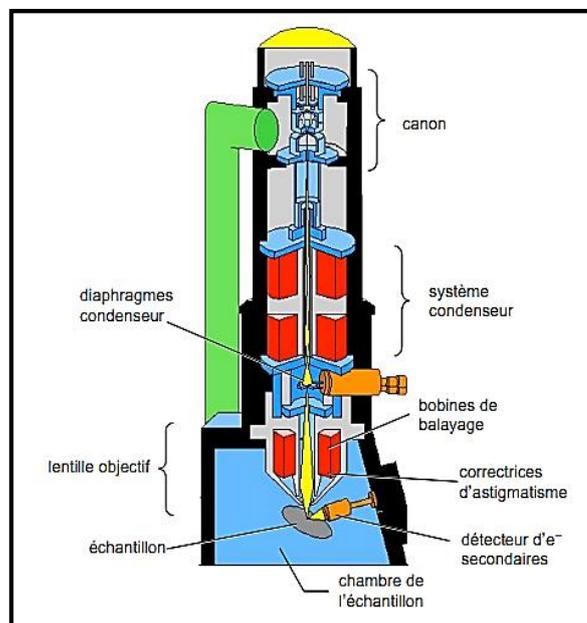


Figure II.3: Schéma représentatif d'un MEB.

Chapitre III

Résultats et discussion

III.1. La rugosité :

Afin de déterminer les paramètres de surface de chaque échantillon, nous avons réalisé des mesures de rugosité à l'aide d'un rugosimètre 2D de type TR220. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Les paramètres de rugosité de chaque échantillon.

Echantillon	R _a (μm)
0% de Cu	3.929
2% de Cu	1.674
4% de Cu	-
6% de Cu	-
8% de Cu	3.04

Avec:

R_a: Rugosité moyenne sur la longueur analysée

D'après ces résultats on remarque que l'échantillon à 0% de cuivre présente un état de surface plus rugueux par rapport à l'échantillon à 2 et 8% de cuivre. Suite à la forme non régulière des échantillons à 6 et 4% on n'arrive pas à mesurer la rugosité de ces derniers. La dispersion des valeurs de R_a est probablement due au différents taux de porosité des échantillons frités à différents teneur en cuivre. L'effet de l'ajout de cuivre peut améliorer l'état de surface par le passage d'une morphologie des pores interconnectés à la forme sphérique.

III.2. Partenaire statique en Al_2O_3 :

III.2.1. Courbes de frottement :

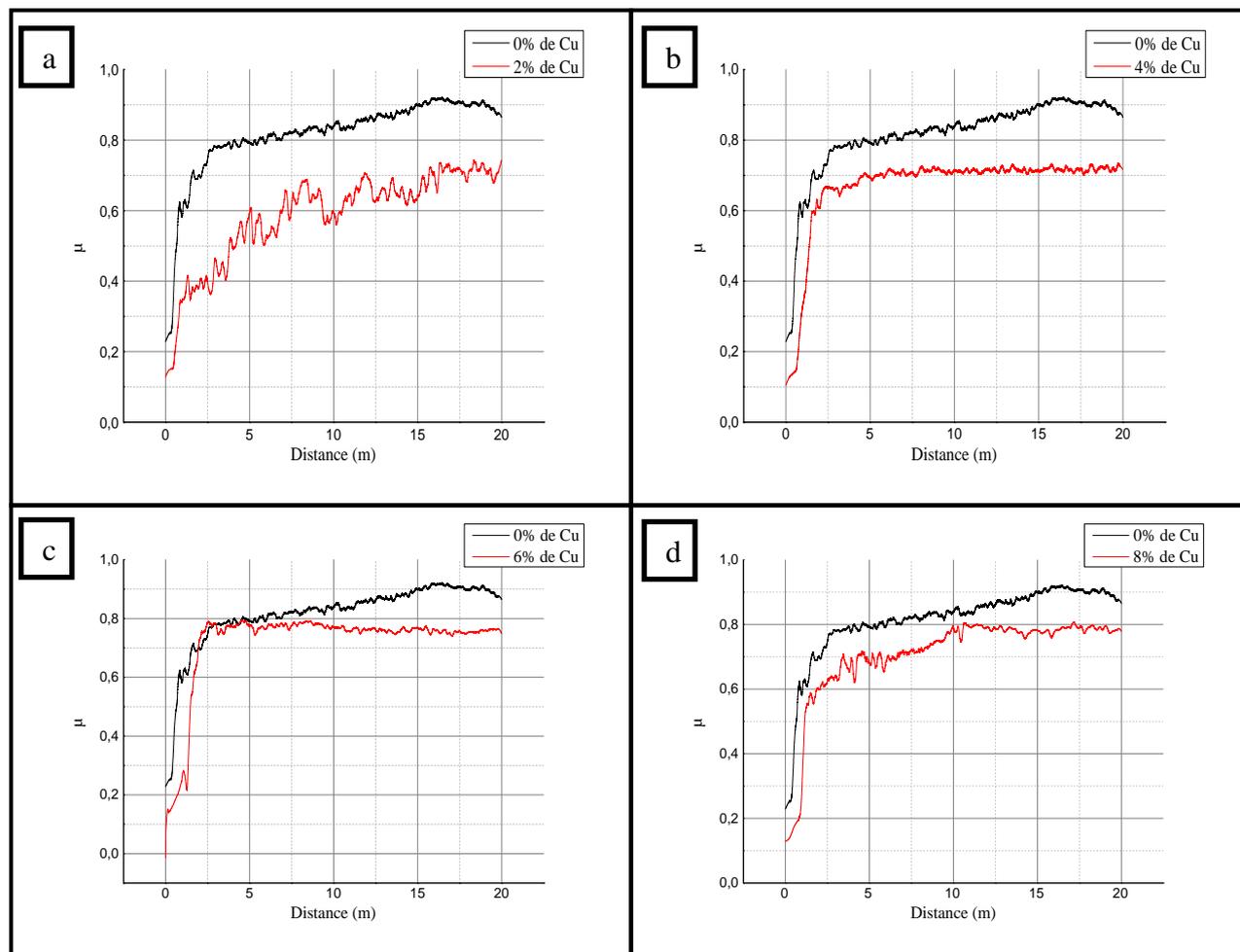


Figure III.1 : Evolution de coefficient de frottement en fonction de la distance des couples échantillon fritté/ Al_2O_3

Tableau III.2 : Le coefficient de frottement moyen des échantillons frittés / Al_2O_3 .

Echantillon	μ_{moy}
0% de Cu	0.815
2% de Cu	0.585
4% de Cu	0.669
6% de Cu	0.711
8% de Cu	0.707

Les courbes de la figure III.1 montre que le coefficient de frottement augmente en fonction de la distance parcourue jusqu'à une certaine distance, puis se stabilise; donc on peut diviser la courbe en deux parties, la première représente l'étape de transition confirmant l'usure de l'échantillon par la bille d'alumine, la deuxième étape correspond à la formation du troisième corps qui contribue au mécanisme de frottement et il peut jouer le rôle d'un lubrifiant solide. Par conséquent, le coefficient de frottement reste constant dans cette étape. Donc le contact passe d'un contact de deux corps (bille en alumine – échantillon) à un contact à trois corps (bille en alumine-débris- échantillon) [5].

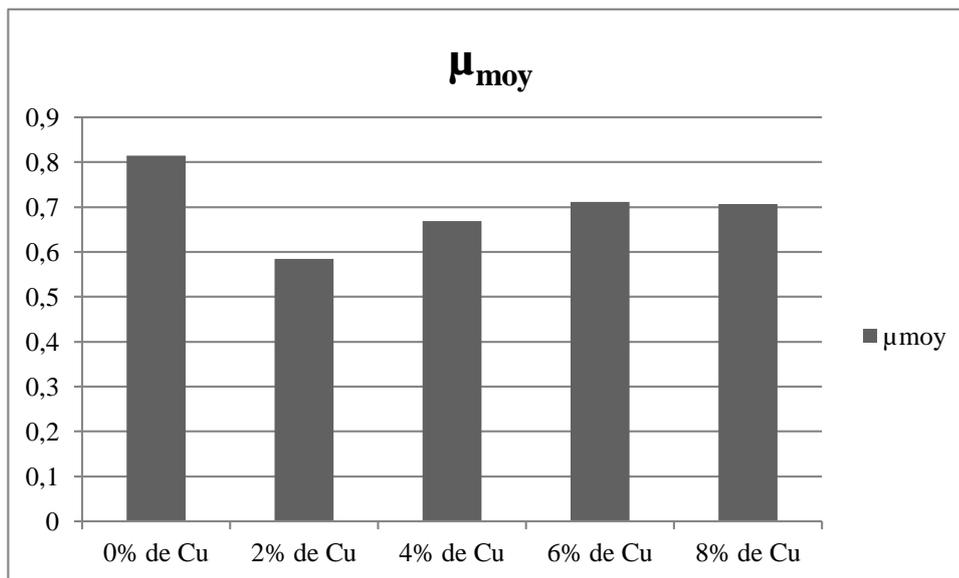


Figure III.2 : Histogramme illustrant l'évolution de coefficient de frottement en fonction de teneur de cuivre du couple alliage TiNiCu/ Al_2O_3 .

D'après cet histogramme on constate une diminution considérable du coefficient de frottement avec l'augmentation de la teneur de cuivre. Ce la est valable jusqu'à 4% de cuivre ce qui confirme que le coefficient de frottement est dépend dans une large mesure de la nature des phases formés (compositions), l'état de surface, la morphologie des pores en plus des différents phénomènes qui se déroulent au cours de l'essai et peuvent modifier la valeur du coefficient tels que :

- ✓ La formation des particules d'usure qui conduit au changement de la rugosité par déformation pastique des aspérités.
- ✓ Le durcissement par écrouissage dans les parties des contacts.
- ✓ Augmentation de la température dans la zone de contact [6,7].

III.2.2. Microscopie électronique à balayage des pistes d'usure :

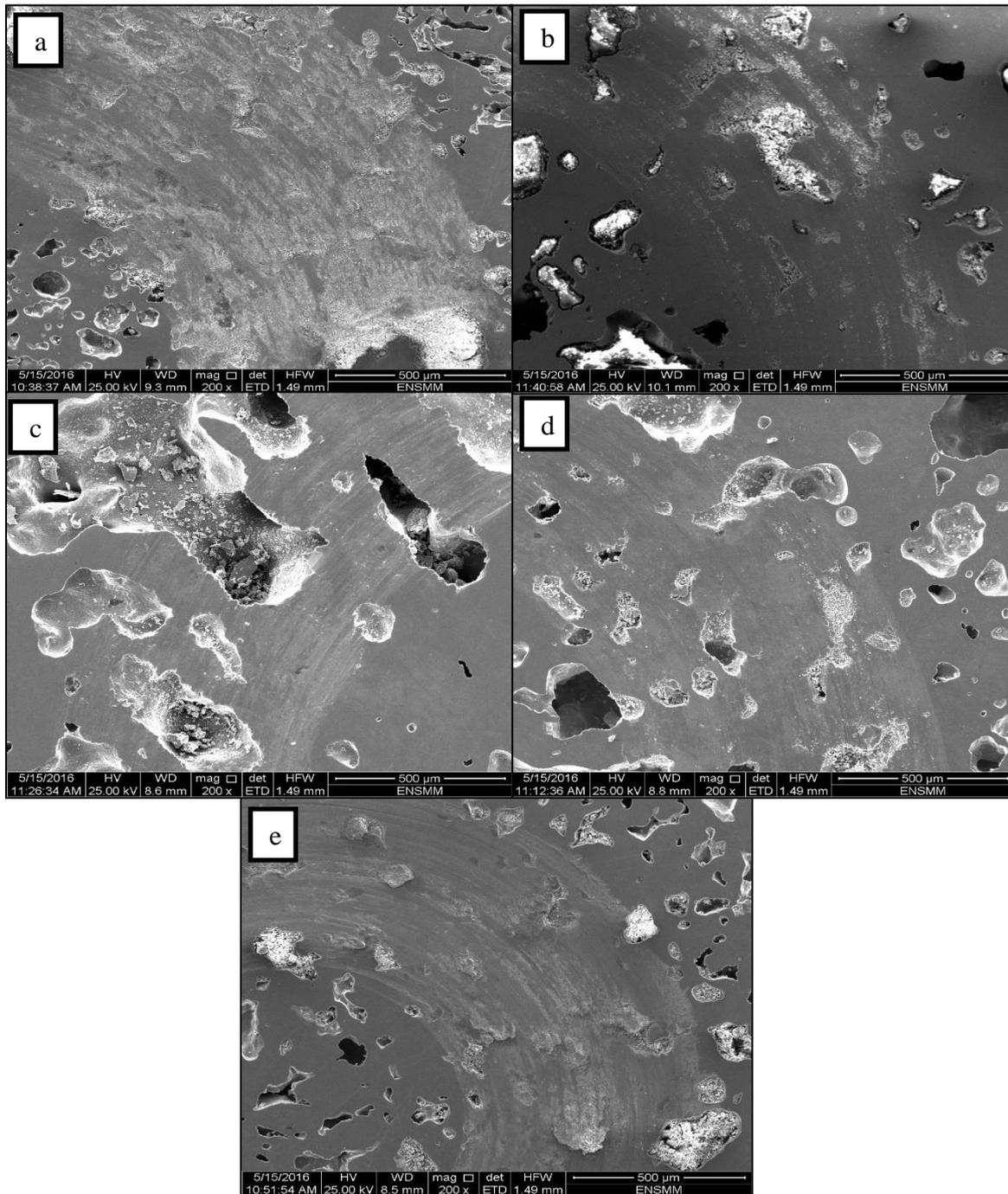


Figure III.3 : Photo MEB des pistes d'usure des échantillons frittés/ Al_2O_3 . a : 0% de Cu, b : 2% de Cu, c : 4% de Cu, d : 6% de Cu, e : 8% de Cu.

La figure III.3 montre les morphologies de surfaces usées prises à la région de contacts alliage / bille en alumine. Lors du déplacement de partenaire statique sur la surface des échantillons, il provoque une usure par abrasion sous la forme des rayures parallèles. Ce mécanisme conduit à la formation et à la propagation de microfissures et l'arrachement des débris de la surface de l'alliage NiTiCu[8].

III.2.3. L'analyse EDS :

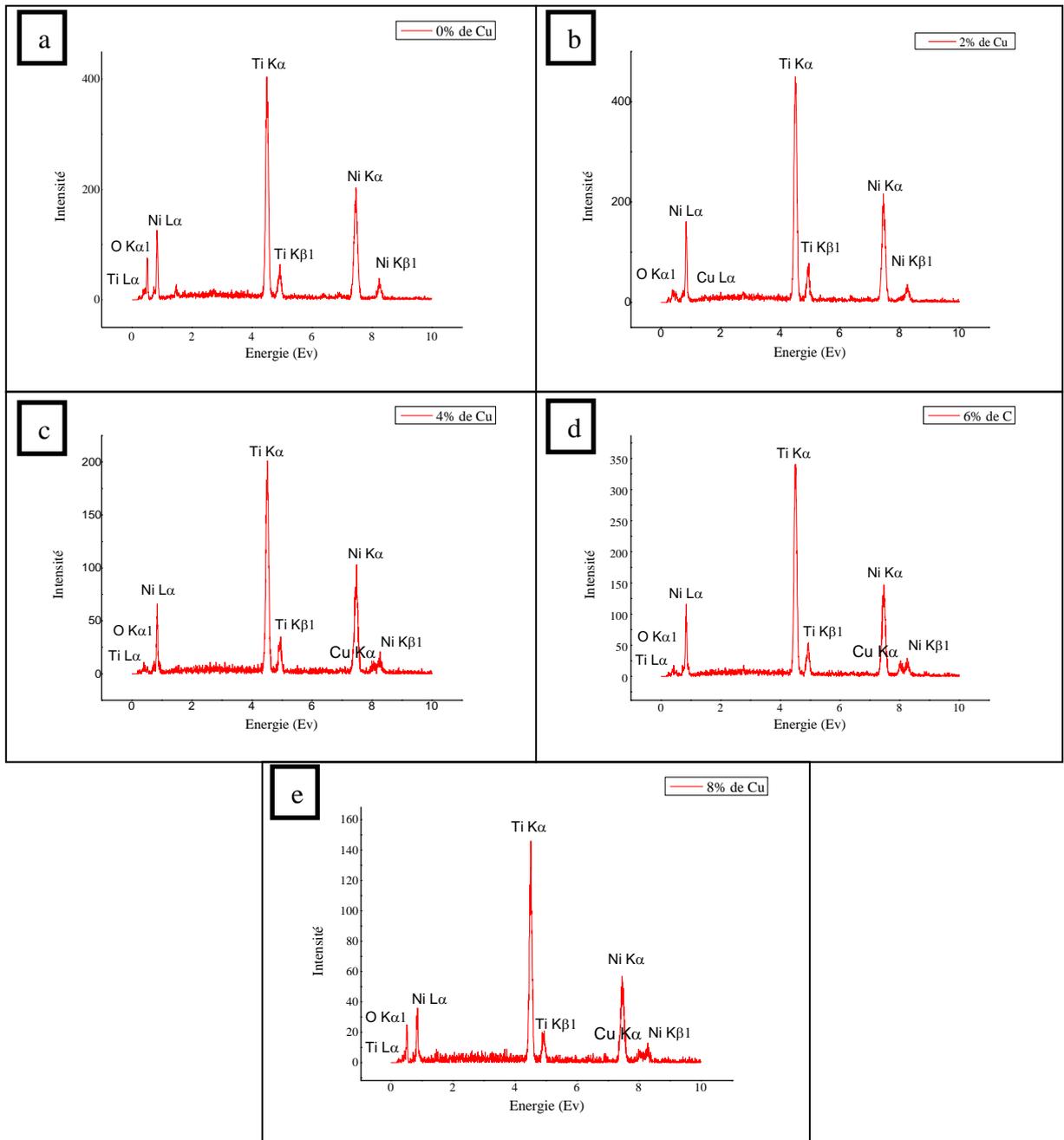


Figure III.4 : L'analyse EDS d'usure des échantillons frittés/ Al_2O_3 , a : 0% de Cu, b : 2% de Cu, c : 4% de Cu, d : 6% de Cu, e : 8% de Cu.

L'analyse EDS des traces d'usure pour les différents échantillons frittés à des teneurs de cuivre entre 0 et 8%, confirme la présence du pique d'oxygène. Cela est dû au phénomène d'oxydation dans la région de contact activée par l'augmentation de température suite au frottement entre le couple. Par contre, on observe l'absence du pique d'aluminium, cela est en relation avec la stabilité du partenaire statique.

III.3. Partenaire statique en Os :

III.3.1. Courbes de frottement :

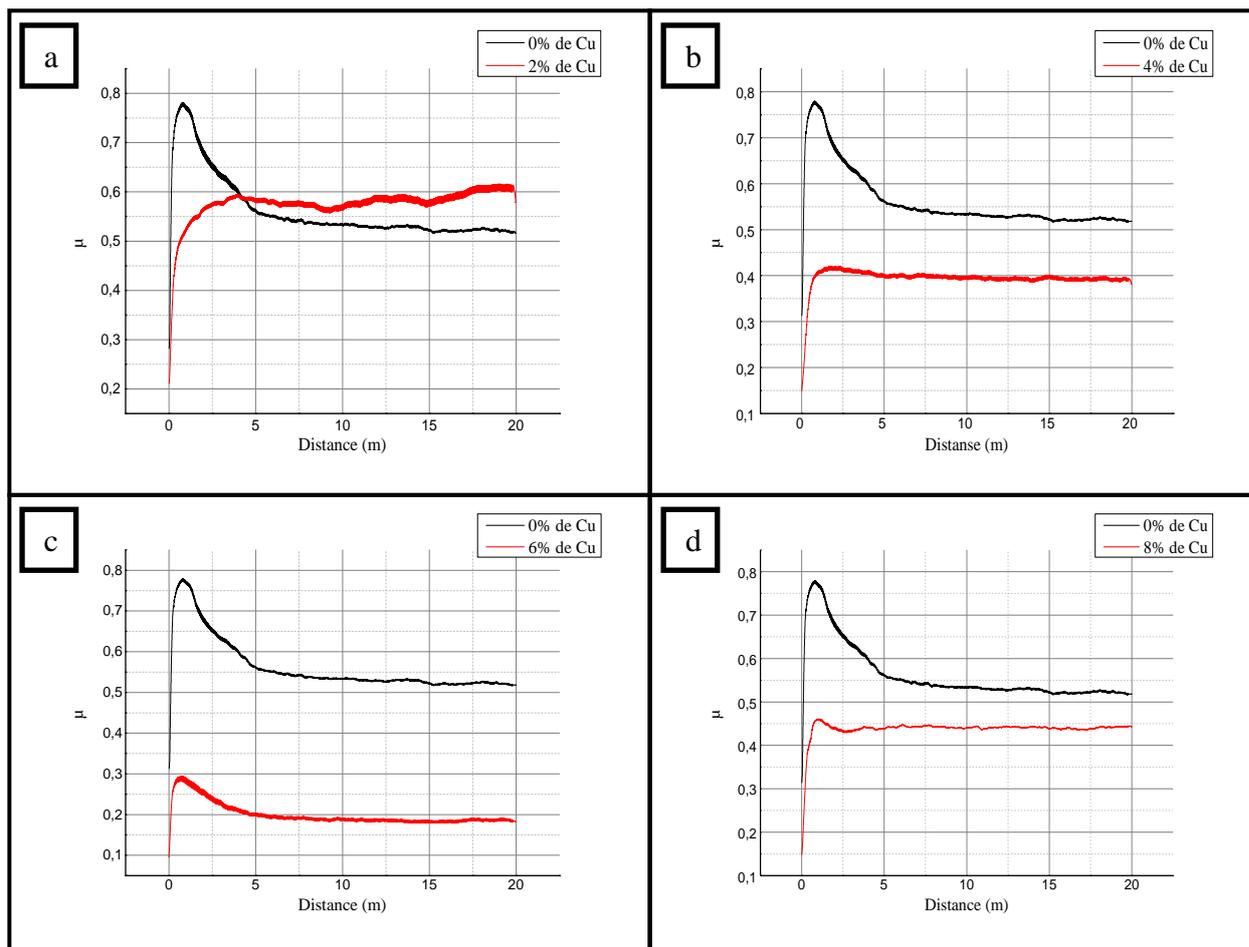


Figure III.5 : Evolution de coefficient de frottement en fonction de la distance des couples échantillon fritté/ Os

Tableau III.3 : Le coefficient de frottement moyen des échantillons frittés /Os.

Echantillon	μ_{moy}
0% de Cu	0.563
2% de Cu	0.575
4% de Cu	0.394
6% de Cu	0.200
8% de Cu	0.438

La figure III.5 montre l'évolution des coefficients de frottement des différents couples échantillon fritté/Os, en fonction de la distance parcourus. L'allure des courbes pour les différents échantillons est la même avec un écart qui dépend de la teneur de cuivre. Au début le coefficient augmente rapidement jusqu'à qu'il atteigne une valeur maximale (phase de rodage), puis il diminue et se stabilise à des valeurs plus basse. Etant que le coefficient de frottement est liée à de nombreux facteurs, comme les conditions de surface, les propriétés macromécanique de la surface de contact et ainsi de suite.... cette étape est très compliqué, c'est pour cela le coefficient n'est pas stable au début de l'essai [9].

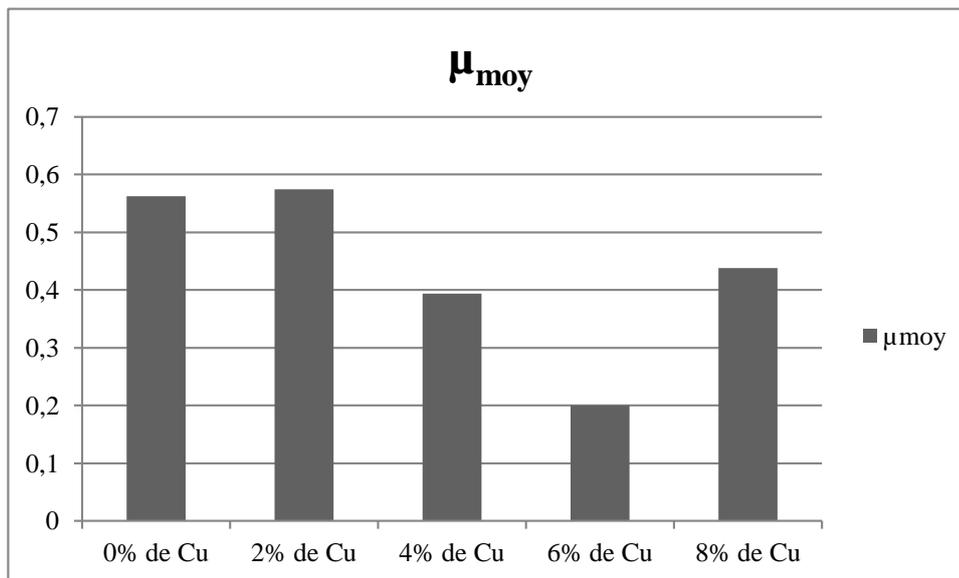


Figure III.6 : Histogramme illustrant l'évolution de coefficient de frottement en fonction de teneur de cuivre du couple alliage TiNiCu/ Os

D'après les résultats illustrés par l'histogramme de la figure III.6, on peut dire que l'addition du cuivre améliore sensiblement la résistance à l'usure et par conséquent diminue la valeur du coefficient de frottement.

III.3.2. Images de MEB :

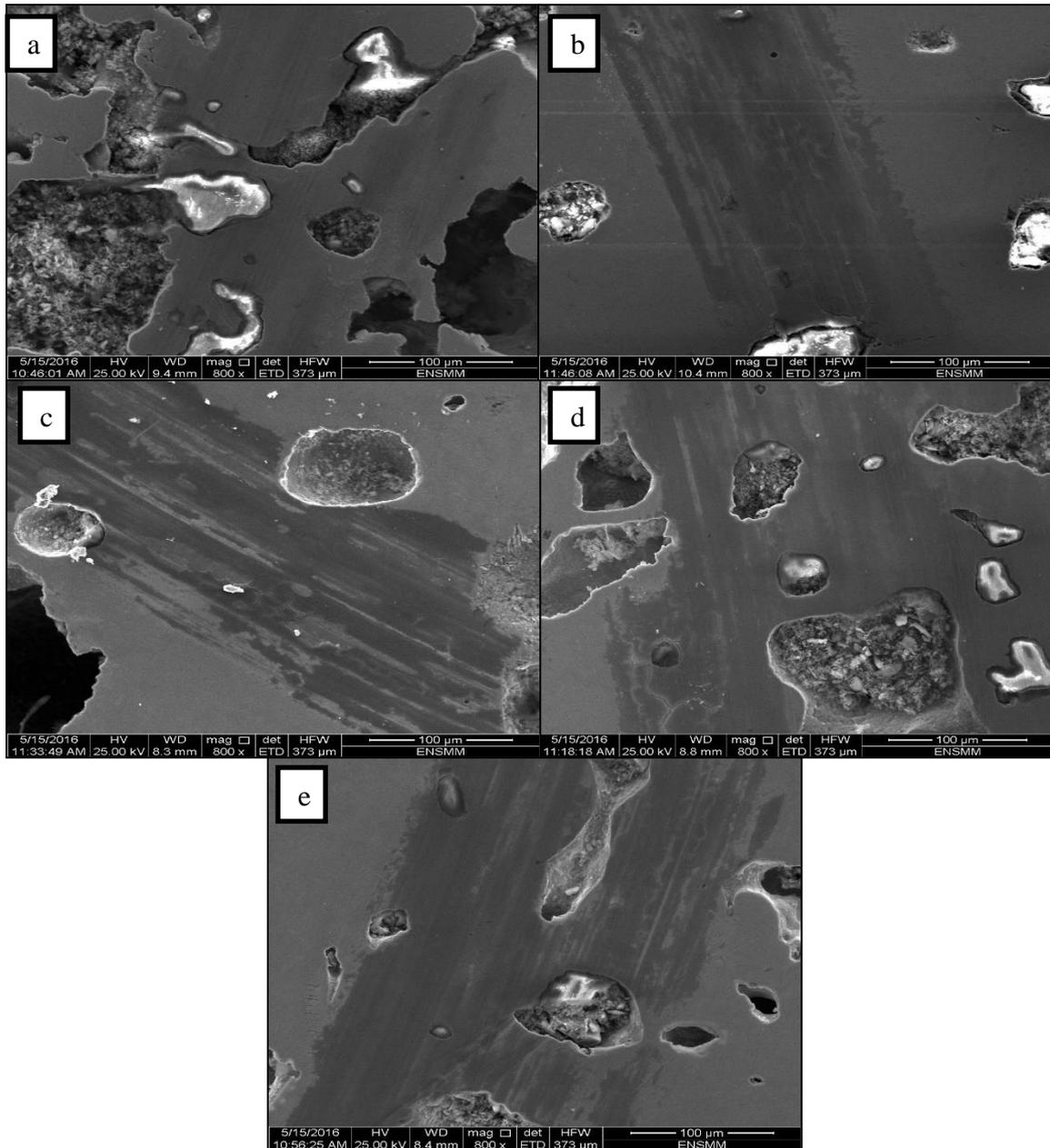


Figure III.7 : Photo MEB des pistes d'usure des échantillons frittés/ Os. a : 0% de Cu, b : 2% de Cu, c : 4% de Cu, d : 6% de Cu, e : 8% de Cu.

La figure III.7 présente la microscopie électronique à balayage des traces d'usure des couples d'échantillons frittés de cuivre/Os. D'après cette figure on observe que la largeur du sillon est moins importante que ceux testé avec la bille Al_2O_3 . L'usure des échantillons est caractérisée par déformation plastique et transfert de matière par abrasion. Dans ce cas les débris produit pour les

couples TiNiCu/Os testés par le pion Os sont doux et lisse par rapport aux ceux produit pour les couples TiNiCu/Al₂O₃.

III.3.3. L'analyse EDS :

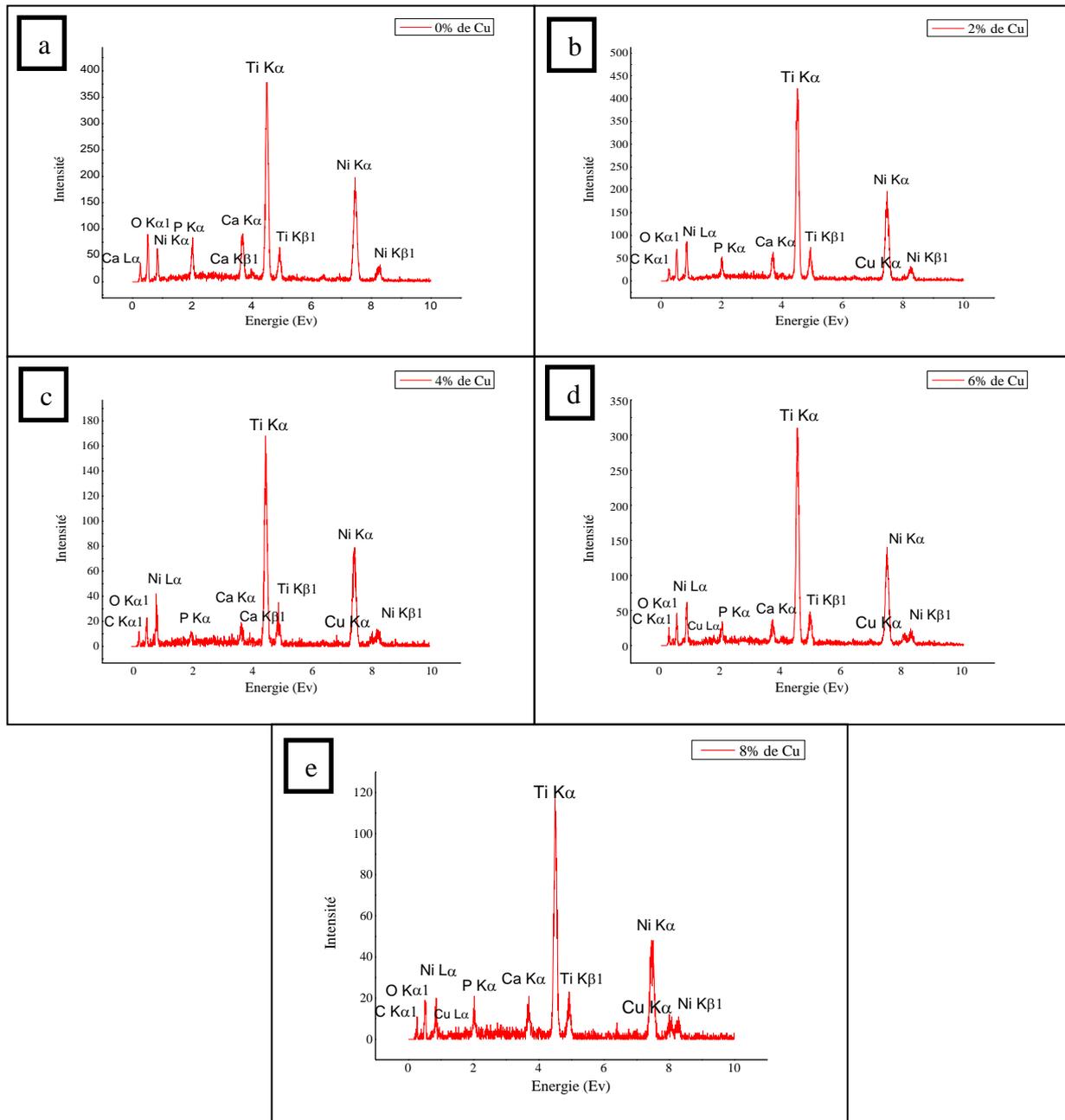


Figure III.8 :L'analyse EDS d'usure des échantillons frittés/Os, a : 0% de Cu, b : 2% de Cu, c : 4% de Cu, d : 6% de Cu, e : 8% de Cu.

D'après les spectres de la figure III.8 qui exprime l'analyse EDS des traces d'usure pour les différents échantillons frittés à des teneurs de cuivre entre 0 et 8%, on remarque la présence des piques des éléments tels que : l'oxygène, le phosphore, et calcium libérés de l'Os et au conditions de travail (l'air ambiant).

Conclusion :

L'objectif de ce travail est l'étude du comportement tribologique de l'alliage TiNiCu obtenue par frittage à différents teneurs de cuivre. Les tests ont été réalisés en utilisant deux partenaires statiques : alumine et Os.

Les principaux résultats des investigations peuvent être résumés comme suit :

- ✓ L'évolution de coefficient de frottement du couple alliage TiNiCu /bille en alumine, au début de l'essai augmente en suite se stabilise suite à l'apparition du troisième corps.
- ✓ L'analyse par microscopie électronique à balayage et EDS des traces d'usure pour les différents échantillons frittés à des teneurs de cuivre varie de 0 à 8%, testé par la bille en Al_2O_3 confirme la présence du pique d'oxygène. Cela est dû au phénomène d'oxydation dans la région de contact activée par l'augmentation de température.
- ✓ L'augmentation rapide du coefficient de frottement du couple alliage TiNiCu /pion en Os est lié à de nombreux facteurs à savoir l'état de surface et les propriétés macromécaniques de la surface de contact.
- ✓ L'analyse EDS des traces d'usure des couple alliage TiNiCu /Os confirme la présence des composant de l'Os.
- ✓ L'addition du cuivre améliore les propriétés tribologiques de l'alliage élaboré, en diminuant le coefficient de frottement.

Synthèse bibliographique

- [1] **F. Alijani, R. Amini, M. Ghaffari, M. Alizadeh, A. Kemal Okyay**, Effect of milling time on the structure, micro-hardness, and thermal behavior of amorphous/nanocrystalline TiNiCu shape memory alloys developed by mechanical alloying, 2013.
- [2] **S. Baidi**, Etude Thermodynamique D'alliages Binaires A Mémoire De Forme, thèse de l'université De Batna, 2009.
- [3] **O. Barrau**, Étude Du Frottement Et De L'usure D'acier À Outils De Travail À Chaud, Docteur de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 14 décembre 2004.
- [4] **Y. K. Choi**, Realisation Et Caractérisation De Composites Hybrides Verre/Epoxy/Ni-Ti Adaptatifs, thèse de L'école Centrale De Lyon, 24 juin 2002.
- [5] Anne SIMON, intérêt de la microscopie de force atomique sur la bio fonctionnalisation des matériaux : caractérisation du greffage et de l'adhésion cellulaire, L'université Bordeaux, 2002
- [6] Zhenxia Wang, Microstructure and tribological behaviors of Ti6Al4V alloy treated by plasma Ni alloying, Applied Surface Science 257 (2011) 10267– 10272.
- [7] Cezary Rapiejko, A representative ex-situ fretting wear investigation of orthodontic arch-wire/bracket contacts, Wear 266 (2009) 850–858.
- [8] Narendranath.S, Effect of Applied Load on Dry Sliding Wear Property of Aged TiNiCu Alloy, Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, Vol. 9, No.9, pp.811-817, 2010.
- [9] Tadeja Kosec, The tribocorrosion behaviour of NiTi alloy, Applied Surface Science 288 (2014) 727– 735.

