

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**

**THEME:**  
**ETUDE COMPARATIVE TRIBOLOGIQUE**  
**ET PHYSICOCHIMIQUE D'UN ACIER 316L**  
**ET TA6V4**

**Présenté(e) par :** - Mr BOUSSAFEL Hacene

**Encadré par** - Mme MAATOUGUI Nadgoua.....(MCB)

**Membres du jury :**

- Dr TAHRAOUI Tarek	Président
- Dr BALHANI Mehdi	Rapporteur

**Juin 2016**

## Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à ma mère et mon frère aussi à  
mes sœurs

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.

***Hacene***

## **Remerciements**

*J'aimerai 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 l'école nationale supérieure des mines et Métallurgie (ENSM) ANNABA et centre de développement des technologies avancées.*

*Je tiens à exprimer toute nous reconnaissance et à remercier très chaleureusement M<sup>me</sup> N.MAATOUGUI et grâce à son encadrement consciencieux et à sa rigueur scientifique, j'ai pu progresser et apprendre ce qu'est le métier de chercheur. Merci à elle pour sa disponibilité, son soutien, ses conseils pertinents et ses encouragements tout au long de ces trois mois.*

*J'exprime également ma gratitude et mon profond respect à Monsieur **Larbi BAIT** attachement de recherche au centre de développement des technologies avancées pour m'avoir accueillie dans leurs unités de recherche. Je lui adresse ma gratitude pour sa disponibilité, ses conseils, son encouragement, sa patience et son amabilité.*

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

## Sommaire

Introduction .....	i
<b>Chapitre I : Aperçu bibliographiques .....</b>	<b>i</b>
I.1. Biomatériaux et biomédical prothèse de hanche .....	1
I.1.1. Matériaux métalliques .....	1
I.1.1.1 Acier inoxydable 316L .....	2
I.1.1.2 Alliage de Titane TA6V4.....	3
I.2. Corrosion et tribologie des matériaux métalliques .....	4
I.2.1. Rugosité .....	4
I.2.2. Tribologie.....	6
I.2.2.1 Frottement .....	6
I.2.2.2 Usure .....	7
I.2.3. Corrosion.....	9
I.2.3.1 Corrosion par piqûres .....	9
I.2.3.2 corrosion intergranulaire .....	9
I.2.3.3 Corrosion uniforme .....	9
<b>Chapitre II : Matériaux et techniques expérimentales .....</b>	<b>10</b>
II.1. Matériaux .....	11
II.2. Techniques expérimentales .....	11
II.2.1. Rugosimètre.....	11
II.2.2. Tribomètre .....	13
II.2.3. Essai de corrosion électrochimique .....	15
II.2.4. Microscopie optique .....	16
<b>Chapitre III : Résultats et discussions.....</b>	<b>17</b>
III.1. Propriétés de surface .....	18
III.1.1. Rugosités .....	18
III.2. Propriétés tribologiques et micrographique .....	18
III.1.1. coefficient de frottement .....	18
III.1.1. Observation microscopique.....	20
III.3. Propriétés électrochimiques .....	21

III.1.1. Taux de corrosion.....	22
<b>Conclusion.....</b>	<b>23</b>

## Liste des figures

### Chapitre I

<b>Figure I.1</b> – Défauts géométriques d'une surface.....	5
<b>Figure I.2</b> – Défauts géométriques d'une surface.....	5
<b>Figure I.3</b> – Contact entre deux solides en présence de frottement.....	6

### Chapitre II

<b>Figure II.1:</b> Ecart moyen arithmétique de rugosité Ra.....	12
<b>Figure II.2:</b> Hauteur maximale du profil à l'intérieur d'une longueur de base Ry.....	12
<b>Figure II.3:</b> La rugosité moyenne Rz Norme DIN 4768.....	12
<b>Figure II.4:</b> La rugosité moyenne Rz Norme ISO 4287/1.....	13
<b>Figure II.5:</b> rugosimètre TR220 et le principe de fonctionnement.....	13
<b>Figure II.6:</b> tribomètre de type TRB6-S-DE-0000.....	14
<b>Figure II.7.</b> Représentation schématique d'une cellule à trois électrodes.....	15
<b>Figure II.8</b> Détermination de l'intensité du courant et la résistance de polarisation.....	16
<b>Figure II.9:</b> Microscope optique.....	16

### Chapitre III

<b>Figure III.1.</b> Courbes d'évolution de coefficient du frottement en fonction de la distance....	18
<b>Figure III.2.</b> Courbes des coefficients de frottements en fonction de la charge appliquée....	19
<b>Figure III.3</b> variation du coefficient de frottement en fonction de la charge.....	20
<b>Figure III.4.</b> Morphologie des surfaces obtenues par microscopie optique après les essais de tribologie.....	21
<b>Figure III.5.</b> Courbes de polarisation de l'acier inoxydable 316L et l'alliage TA6V4.....	22
<b>Figure III.6.</b> Histogramme illustre le taux de corrosion de TA6V4 et 316L.....	22

## Liste des tableaux

### Chapitre I

<b>Tableau I.1</b> : Limites de composition chimique de l'acier 316L.....	2
<b>Tableau I.2</b> : Composition chimique du Ti-6Al-4V utilisé pour les aubes de disque.....	3
<b>Tableau I.3</b> . Principales formes d'usure.....	7

### Chapitre II

<b>Tableau II.1</b> . Récapitulation des conditions de travail.....	13
<b>Tableau II.2</b> . Récapitulation des conditions de travail.....	14
<b>Tableau II.3</b> : Composition chimique de la solution de Ringer.....	16

### Chapitre III

<b>Tableau III.1</b> . Les paramètres de rugosités.....	18
<b>Tableau III.2</b> . Les coefficients de frottements en fonction de la charge appliquée.....	19
<b>Tableau III.3</b> . Tableau récapitulatif des paramètres de corrosion.....	21

## Résumé :

Ce travail porte sur la caractérisation tribologique et physico-chimique des matériaux TA6V4 et l'acier AISI 316L à usage de biomatériaux, destinés au comblement osseux.

Nous nous sommes intéressés à la comparaison du point de vue tribologique et résistance à la corrosion de deux biomatériaux utilisés dans les tiges fémorales des prothèses de hanche, à savoir un acier inoxydable AISI 316L et un alliage de titane TA6V4. Premièrement La rugosité de surface a été déterminée par profilométrie à contact 2D. En suit la microscopie optique permis de caractérisé type d'usure après la tribologie, finalement l'électrochimie permis de déterminer les paramètres de corrosion.

Les essais tribologiques ont été effectués sur un tribomètre rotatif bille-plan de CSM. Nous avons fait varier la charge (3, 6, 9N) ; la distance de glissement a été fixée à 30m. Les résultats de frottement confirment les lois fondamentales de frottement. Les résultats montrent un meilleur comportement en frottement de l'acier AISI 316L.

Les essais électrochimiques ont été effectués par un appareillage électrochimique (PARSTAT 4000), constitué d'un POTENTIOSTAT GALVANOSTAT enchainé à un microordinateur au niveau de CDTA. Les résultats de l'électrochimie confirment le rôle protecteur de la couche de passivation de  $TiO_2$  pour l'alliage TA6V4.

**Mots clés:** tribologie, corrosion, acier inoxydable 316L, rugosité, frottement, électrochimie, passivation, alliage TA6V4.

## Introduction

Les métaux et les alliages sont depuis longtemps utilisés pour les applications biomédicales. Ils recouverts de leur couche d'oxyde naturel épaisse de quelques nanomètres, sont connus pour être bio-inertes.

Les aciers inoxydables et les alliages de titane sont intensivement utilisés dans l'implantation et connus comme des biomatériaux de choix à cause de leurs propriétés mécaniques excellentes et leurs modules d'élasticité qui le rend compatible avec les structures osseuses [2]. En plus de ces propriétés, l'acier inoxydable et l'alliage de titane ont des propriétés de surface essentielles. C'est la capacité de ces alliages à former spontanément à l'air une couche stable d'oxyde épaisse de 4 à 6nm, qui le protège contre la corrosion et ralentit la libération des ions de fer, chrome et nickel. Le développement et l'étude des biomatériaux a permis d'améliorer l'intégrité et le confort de personnes souffrant de problèmes fonctionnels [5]. L'engouement exceptionnel pour les prothèses de hanche vient du fait qu'elle donne des résultats tangibles concernant l'amélioration de la mobilité et la faible durée des suites opératoires. Mais des dégradations mécaniques ou biologiques peuvent survenir, tels le descellement, l'usure et la corrosion, entraînant une reprise de la prothèse.

Les matériaux les plus utilisés pour les prothèses de hanche sont l'acier inoxydable AISI 316L, les alliages de titane, Ti-6Al-4V, Ti-Al-Nb, les alliages de cobalt et les céramiques. Des traitements de surface (nitruration, implantation ionique, revêtement d'hydroxyapatite) peuvent avoir lieu sur le titane. Pour le choix des matériaux, un compromis doit être trouvé entre la résistance mécanique, le comportement en corrosion et la biocompatibilité. Suite à un travail effectué dans un laboratoire d'école ENSMM-Annaba, et en vue d'utiliser l'équipement de centre de recherche et développement des technologies avancés CDTA, nous avons choisi d'explorer l'axe des biomatériaux. A cet effet deux matériaux ont été considérés, l'acier inoxydable 316L et l'alliage de titane Ti-6Al-4V [7].

Nous nous sommes intéressés à la comparaison du point de vue tribologique et électrochimique de deux biomatériaux utilisés dans les tiges fémorales des prothèses de hanche, à savoir un acier inoxydable AISI316L et un alliage de titane Ti-4A-6V. La rugosité de surface a été déterminée par profilométrie à contact 2D.

Les essais tribologiques ont été effectués sur un tribomètre rotatif bille-plan de CSM. Nous avons fait varier la charge (3, 6, 9N) ; la distance de glissement a été fixée à 30m. Les résultats de frottement confirment les lois fondamentales de frottement : l'augmentation du coefficient de

frottement avec la charge et son indépendance vis-à-vis de la vitesse. Les résultats montrent un meilleur comportement en frottement de l'acier AISI316L.

Les essais de corrosion ont été effectués par un appareillage électrochimique (PARSTAT 4000), constitué d'un POTENTIOSTAT GALVANOSTAT enchainé à un microordinateur au niveau de CDTA. Les résultats de l'électrochimie confirment le rôle protecteur de la couche de passivation de TiO<sub>2</sub> pour l'alliage TA6V4 [3].

Ce mémoire comportera trois chapitres :

- Dans le *premier chapitre*, nous avons présenté des définitions sur l'acier AISI 316L et TA6V4 comme des biomatériaux, leurs caractéristiques, par la suite, les différentes essais ont été clairement évoqués. Il sera aussi l'occasion de présenter des notions de surfaces par exemple propriétés topographiques, tribologiques et résistance à la corrosion ainsi les résultats bibliographiques importants dans le cadre de cette étude, tant au point de vue mécanique que physico-chimique.

- Le *second chapitre* abordera les méthodes expérimentales, ainsi que la caractérisation effectuée sur les deux matériaux. Pour une meilleure caractérisation et interprétation des résultats, nous avons choisi d'utiliser des techniques telles que la rugosimétrie, tribométrie, microscopie optique, et les caractérisations électrochimiques.

- Le *troisième chapitre* de ce manuscrit permettra d'aborder les *résultats obtenus* suivi des *discussions*. Enfin, nous proposerons une *conclusion générale* et envisagerons les *perspectives* de ce travail.

# **Chapitre I : Aperçu bibliographiques**

## **I.1. Biomatériaux et biomédical prothèse de hanche**

Grâce à la disponibilité des meilleurs outils de diagnostics et les avancements dans la science et génie des matériaux et des procédures chirurgicales [1]. L'implantologie a assumé une grande catégorie des implants biomédicaux employés en art dentaire, orthopédie, chirurgie reconstructive, ophtalmologie, chirurgie cardiovasculaire, neurochirurgie, immunologie, histopathologie, chirurgie expérimentale et la médecine vétérinaire. Les avancés de l'implantologie ont pour but de diminuer la douleur pendant la chirurgie, réduire le coût chirurgical et augmenter du taux de succès. Afin de servir à une longue période sans rejet, les implants biomédicaux devraient répondre à des exigences spéciales [2].

La première et la plus importante condition, est que le matériau doit être biocompatible. Cela signifie que le dispositif ne cause aucune réaction défavorable dans le corps et peut être bien intégré avec les tissus environnants [3]. La deuxième condition est que le matériau doit être résistant à la corrosion dans l'environnement agressif du corps. C'est-à-dire que le dispositif implantable maintiendra son intégrité et ne se dégradera pas en raison de la corrosion. La troisième et dernière condition est que le dispositif doit avoir la résistance mécanique suffisante ainsi qu'une tenue à fatigue. Ceci garantira une similitude entre l'implant et le tissu normal.

### **I.1.1. Biomatériaux métalliques**

Plusieurs métaux et alliages sont utilisés dans le domaine biomédical. Ils permettent la réalisation de plusieurs reconstitutions des tissus ; prothèse de hanche, les dents, implants orthopédiques unitaires ou pluraux. L'éventail de choix de matériaux est large, allant du métal pur, par exemple le titane, à l'alliage de plusieurs métaux. Ce large choix implique des différences notoires de comportement, il est donc nécessaire d'avoir une bonne connaissance des matériaux pour faire le meilleur choix en fonction de l'indication et du patient [5].

L'utilisation des métaux purs comprenant du Titane seulement ne suffit pas à fabriquer la tête fémorale de la prothèse de hanche, par exemple : un manque de la résistance de l'implant. Ainsi, les alliages produits par certaines proportions de mélange de métaux sont nécessaires pour obtenir de meilleures qualités physiques, biocompatibilité et résistance à la corrosion.

Les facteurs principaux affectants le choix d'alliage sont :

- Les propriétés physiques et mécaniques.
- Biocompatibilité et corrosion.
- Les facteurs économiques

### I.1.1.1 Acier inoxydable 316L

L'acier 316L est un acier inoxydable austénitique et reste stable jusqu'à la limite de sa température de fusion. La particularité des aciers inoxydables est la présence de chrome (>12%), qui favorise la résistance dans les milieux oxydants, en assurant la formation d'une couche de passivité. Grâce à l'ajout de différents éléments d'alliage en plus du chrome, il est possible d'obtenir une grande variété d'aciers inoxydables, qui diffèrent tant par les caractéristiques métallurgiques que par les propriétés thermo-physiques ou mécaniques. Ces caractéristiques peuvent également être modifiées par des traitements thermiques et / ou mécaniques particuliers.

La famille des aciers austénitiques dont fait partie le 316L est l'une des grandes familles d'acier inoxydable. Ce dernier apparaît comme étant le plus résistant à la fissuration après maintien à température élevée, même sous contrainte avec une ductilité importante [7].

Les aciers inoxydables type 316L sont constitués d'une matrice austénitique Fer-Chrome-Nickel, c'est à dire un réseau d'atomes de fer cubique face centrés, avec des atomes en solution solide d'insertion (comme le carbone ou l'azote) et des atomes en solution solide de substitution (Molybdène, silicium, manganèse...). Des impuretés (souffre, phosphore) sont également présentes en faible quantité. Les limites de composition du 316L sont données dans le tableau ci-dessous.

**Tableau I.1** : Limites de composition chimique de l'acier 316L [7].

<b>composition</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>N</b>
<b>Min</b>	0	0	1.6	0	0	17	12	2.30	0.06
<b>Max</b>	0.03	0.5	2	0.035	0.025	18	12.5	2.70	0.08

D'une manière générale, certains éléments chimiques seront dits gammagènes, car ils auront tendance à stabiliser la phase austénitique. C'est le cas du Nickel, dont la teneur supérieure à 12% dans le 316L assure la stabilité de la structure austénitique de 20°C à la température de fusion (1450°C environ). Les éléments dit gammagènes sont ceux, à de rares exceptions près, qui ont une structure Cubique Faces Centrées (CFC), comme l'austénite. Ce sont : Ni, Mn, Co, Cu, Ti... Le Carbone et l'azote sont également des éléments gammagènes puissants, même en faible quantité. Paradoxalement, les autres éléments sont dits alphasgènes ayant une structure Cubique Centrée (CC) exemples : Cr, Si, Mo,...

Cet acier 316L est utilisé dans le domaine de la production d'énergie électronucléaire, de par ses propriétés de résistance à des sollicitations mécaniques, chimiques et thermiques sévères. Le 316L est l'acier constitutif des tuyauteries de fortes sections des circuits de refroidissement des centrales

nucléaires de type REP. Il est également utilisé dans le domaine biomédical pour la fabrication d'outils chirurgicaux (aiguilles, scalpels, etc.) et d'implants temporaires, notamment en chirurgies orthopédique et cardiaque [8].

### I.1.1.2 Alliage de Titane TA6V4

L'alliage de Ti-6Al-4V anciennement appelé TA6V est le plus couramment utilisé, il représente à lui seul 50 % du marché. Cet alliage présente une structure mixte  $\alpha+\beta$ , stabilisée par l'aluminium (6%) étant l'élément  $\alpha$ -gène, et le vanadium (4%) qui est le  $\beta$ -gène. L'aluminium durcit la phase  $\alpha$  en améliorant la résistance mécanique et la tenue au fluage, mais son pourcentage est limité à 7% pour éviter des précipitations locales de phase  $\alpha_2$  fragilisante tel que le Ti<sub>3</sub>Al [Combres, 1999 ; Lütjering & Williams, 2003]. Le vanadium améliore la ductilité mais diminue la tenue à l'oxydation. Compte tenu de ses éléments d'alliage, sa température de transus  $\beta$  se situe vers 1000°C [9]. La composition chimique des billettes en Ti-6Al-4V généralement utilisé par la société Snecma-Moteurs pour l'usinage des disques et des aubes fan des turboréacteurs aéronautiques est présentée dans le tableau I.2.

**Tableau I.2 :** Composition chimique du Ti-6Al-4V utilisé pour les aubes de disque [10].

<b>Eléments (% massique)</b>	<b>Al (%)</b>	<b>V (%)</b>	<b>O (ppm)</b>	<b>Fe (ppm)</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>N (ppm)</b>	<b>Sn (ppm)</b>	<b>H (ppm)</b>
<b>Valeurs mesurées</b>	6.39	3.87	1811	1036	101	63	103	<60
<b>Eléments (% massique)</b>	<b>Cu (ppm)</b>	<b>Mn (ppm)</b>	<b>Mo (ppm)</b>	<b>Zr (ppm)</b>	<b>B (ppm)</b>	<b>Y (ppm)</b>	<b>Ayre (ppm)</b>	<b>Total Aytres (ppm)</b>
<b>Valeurs mesurées</b>	< 20	< 50	< 100	< 50	< 50	< 10	< 1000	< 2000

Les alliages TA6V4 ont une résistance à la corrosion et des propriétés mécaniques élevées. La bonne résistance à la corrosion est due au développement d'une couche protectrice de quelques centaines de nanomètres à la surface du titane et de ses alliages. Cette couche est constituée majoritairement d'oxyde TiO<sub>2</sub>, mais il est possible qu'elle contienne d'autres variétés. La formation de cette couche est liée au caractère oxydable du titane (son potentiel électrochimique est de -1,63 V/ENH, ce qui est très proche de l'aluminium). Les alliages de titane sont des matériaux très

employés dans l'industrie et particulièrement dans le secteur aéronautique ou bien dans l'automobile. Il offre également comme avantage d'avoir une très bonne résistance à la corrosion ce qui fait de ce matériau un très bon outil dans le secteur biomédical et dans les applications à un environnement sévère [11,12].

Les alliages de titane présentent des caractéristiques cristallographiques et thermiques nettement supérieures à celles d'autres métaux fréquemment utilisés. Les principales caractéristiques remarquables du titane et de ses alliages sont :

- Une faible masse volumique (4.5 g/cm<sup>3</sup>), soit environ 60% de celle de l'acier ;
- Un faible module d'Young ;
- Une excellente résistance à la corrosion dans de nombreux milieux tels que l'organisme humain ;
- Un coefficient de dilatation, légèrement inférieur à celui de l'acier, et moitié de celui de l'aluminium ;
- Des caractéristiques mécaniques élevées jusqu'à une température d'environ 600°C;
- Une faible conductibilité thermique [13].

## **I.2. Corrosion et tribologie des matériaux métalliques**

Lors d'un contact entre deux solides en mouvement relatif, il se produit une perte de matière superficielle nommée l'usure, dont l'étude relève de la tribologie. Or, suivant les conditions de service, ces contacts peuvent s'effectuer en milieu liquide. Il se produit dès lors des phénomènes de lubrification et de dissipation thermique modifiant l'état de la surface au niveau du contact, et par conséquent l'usure.

Dans le cas de métaux en milieu agressif aqueux, une composante de corrosion s'ajoute à la dégradation mécanique. Cette situation relève de la tribocorrosion [14].

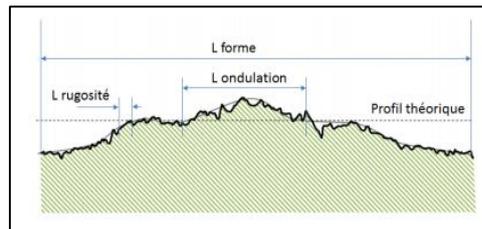
### **I.2.1. Rugosité**

Une surface, quel que soit son procédé de fabrication, n'est pas une surface parfaitement lisse : selon la méthode d'usinage et les outils utilisés, mais aussi selon le matériau, elle présente de nombreuses irrégularités, micro-géométriques ou macro-géométriques. Ces irrégularités sont définies par comparaison avec une ligne "moyenne" et sont classées en deux catégories : des aspérités ou "pics", et des cavités ou "creux". L'ensemble de ces défauts de surface constitue la rugosité [15].

La norme NF E 05-515 distingue six ordres de défauts de surface, du plus grand au plus petit :

1. Écart de forme (échelle macroscopique) : défaut de planéité, de rectitude, de circularité, ...

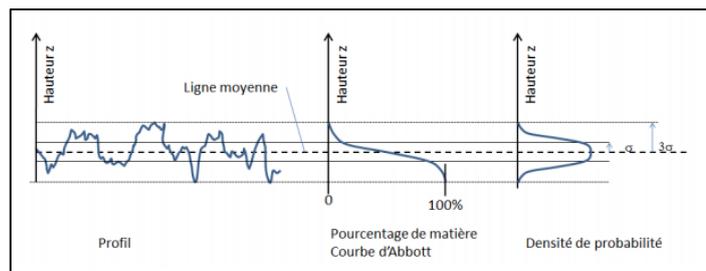
2. Ondulation (échelle macroscopique) : l'écart entre les crêtes est compris entre 0,5 et 2,5 mm ;
3. Stries et sillons (défauts périodiques ou pseudopériodiques, échelle microscopique) : l'écart entre les crêtes est inférieur ou égal à 0,5 mm ;
4. Défauts localisés (échelle microscopique) : marque d'outil, arrachement, fente, piqûre, ... ;
5. Structure cristalline (échelle mésoscopique)
6. Réseau cristallin (échelle nanoscopique)



**Figure I.1** – Défauts géométriques d'une surface [16]

L'état de surface est par plusieurs points de vue, qui ne sont toutefois pas indépendants, rendant difficile la préparation optimale d'une surface. En conséquence, nous pouvons distinguer en termes de caractérisation :

- La cristallographie, la texture et la structure.
- La topographie (rugosité) et la morphologie.
- L'analyse chimique (composition).
- La mécanique (contraintes résiduelles, déformation) [15].



**Figure I.2** – Défauts géométriques d'une surface [16]

La rugosité c'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'obtentions, aux outils, à la matière, etc. Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.).

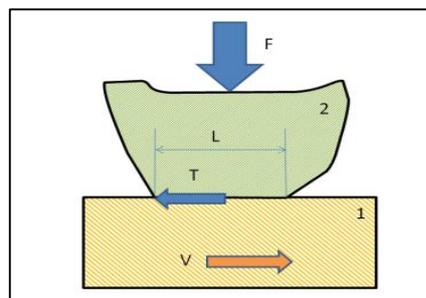
## I.2.2. Tribologie

Le mot tribologie a été proposé par Peter Jost en 1966 et est basé sur le mot grec "tribos" qui signifie frotter.

Il s'agit donc de la science du frottement. Son but est de regrouper sous une seule terminologie l'ensemble des sciences du frottement :

- Usure ;
- Frottement ;
- Lubrification ;

Une définition plus précise de la tribologie est « l'étude des interactions entre surfaces solides en mouvement relatif ». Lorsque deux solides sont mis en contact sous l'action d'une force normale  $F$ , une force tangentielle  $T$  apparaît et s'oppose au déplacement relatif des deux solides (figure 1). Le frottement est très utile lorsque l'on cherche à immobiliser deux solides l'un par rapport à l'autre. Par exemple il facilite nos déplacements en nous permettant d'exercer, sans glisser, des forces de poussée tangentielle sur le sol pour nous propulser. En revanche, il présente un inconvénient dès lors que l'objectif est de mettre en mouvement relatif deux solides [16].



**Figure I.3** – Contact entre deux solides en présence de frottement [16].

La présence de frottement dans un contact glissant conduit à une perte d'énergie mécanique qui est transformée en chaleur [16].

### I.2.2.1 Frottement

Le frottement est défini comme la résistance au mouvement d'un corps quand il se déplace tangentiellement par glissement ou par roulement sur un autre. La force tangentielle qui agit dans la direction opposée au mouvement est nommée force de frottement, alors que la force requise pour initier le mouvement est la force de frottement statique  $F_s$ . Il y'a aussi une force tangentielle requise pour produire le mouvement relatif qui est connue comme force de frottement cinétique ou

dynamique  $F_k$ . Il est important de remarquer que le frottement n'est pas une propriété du matériau, c'est une réponse du système tribologique

Les lois fondamentales qui gouvernent le frottement des corps solides ont été proposées par Coulomb en 1875 avec les hypothèses suivantes [17]:

- Le frottement statique doit être supérieur au frottement dynamique,
- Le frottement est indépendant de la vitesse de glissement,
- La force de frottement est proportionnelle à la charge appliquée,
- La force de frottement est indépendante de l'aire de contact.

Le frottement est communément représenté par son coefficient ( $\mu$ ), qui est le rapport de la force de frottement ( $F_f$ ) sur la force normale appliquée ( $F_N$ ) (*cf. Équation I.1*) [18].

$$\mu = \frac{F_f}{F_n} \quad \text{Equation I.1}$$

### I.2.2.2 L'Usure

L'usure d'une surface est définie comme une perte de matière, accompagnée de modifications géométriques, de perte de masse et la plupart du temps de modifications profondes sur le plan physico-chimique. Elle intervient lorsque deux surfaces en contact ne sont plus capables d'accommoder élastiquement les déformations qu'elles subissent en frottant l'une contre l'autre. L'usure est souvent due à plusieurs processus : mécaniques, physiques, thermiques ou bien encore chimiques qui agissent simultanément, et très rarement à un seul processus clairement identifiable. Il est possible d'analyser l'usure comme un débit [18,19].

**Tableau I.3.** Principales formes d'usure [19].

<b>Usure abrasive</b>	<b>à trois corps (low stress)</b> <b>à deux corps (high stress)</b> <b>coupe sous l'effet de chocs (gouging)</b> <b>meulage (grinding)</b> <b>polissage (dishing)</b>
<b>Usure adhesive (scuffing)</b>	douce (oxidative wear) sévère avec grippage (seizure) galling
<b>Usure par fatigue superficielle</b>	piqûration (bitting) écaillage (spalling) formation de taches grises (frosting)

### I.2.3. Corrosion

La corrosion est le phénomène suivant lequel les métaux ont tendance, sous l'action d'agents atmosphériques ou de réactifs chimiques, à retourner à leur état original d'oxydes, de sulfures, de carbonates, et ainsi, à subir une détérioration de leurs propriétés. C'est donc un processus de dégradation des métaux qui, à l'exception des métaux tels que l'or et le platine, ont toujours tendance à s'altérer au contact de l'atmosphère, des eaux et des divers milieux corrosifs [20].

La corrosion désigne l'altération d'un objet manufacturé par l'environnement. Les exemples les plus connus sont les altérations chimiques des métaux dans l'eau (avec ou sans oxygène), Ces altérations chimiques sont regroupées sous le terme de corrosion aqueuse. Elles sont dues à des effets de plusieurs sortes : dissolution des métaux dans l'eau, apparition de piles électrochimiques, existence de gradients de concentration, aération différentielle ou piqûration. Globalement, la corrosion aqueuse est un phénomène dont l'impact économique est très important, nécessitant une grande variété de moyens de protection des métaux [21].

La corrosion des métaux consiste essentiellement en leur oxydation (retour à l'état "naturel"). Cependant, l'oxydation n'est pas nécessairement la combinaison d'un élément avec de l'oxygène ; d'une manière plus générale, il s'agit d'une réaction chimique au cours de laquelle le composé considéré cède des électrons. On obtient une corrosion généralisée.

La corrosion des métaux en milieu aqueux résulte de l'oxydation du métal, mais pas nécessairement par le dioxygène de l'air qui est dissout dans l'eau : l'oxydation peut également se produire avec d'autres espèces chimiques, notamment des ions.

La corrosion, comme toute discipline scientifique, possède aussi son "jargon" qu'il importe de connaître. Nous présentons ci-après les termes couramment usités dans ce domaine [21].

- Vitesse de corrosion: La vitesse de corrosion correspond au courant électrique (dit de corrosion) débité par une pile ou plus généralement un système électrochimique métal/solution. Son unité est donc l'ampère. On utilise aussi la densité de courant qui représente l'intensité de courant débité par la pièce, rapporté à l'unité de surface en contact avec le milieu.
- Electrolyte: c'est une solution contenant des espèces chimiques ioniques (solutés) et/ou des gaz dissous, tels que l'oxygène. Il est donc conducteur de l'électricité. On appelle espèces électrochimiquement actives, des ions ou des molécules qui peuvent être réduits par des électrons.
- Electrode: Par abus de langage, c'est simplement le métal qui est immergé dans un électrolyte. Plus exactement, c'est le système représenté par un métal en contact avec un électrolyte.

- **Potentiel:** Le potentiel est la différence électrique de tension entre deux électrodes, typiquement une électrode de référence et le métal.
- **Polarisation:** C'est le terme utilisé quand on impose un potentiel à un métal immergé dans une solution.
- **Potentiel en circuit ouvert:** c'est le potentiel d'équilibre qu'acquiert un métal lorsqu'il est immergé dans une solution, en absence de polarisation.

Il existe différents types de corrosion [22]:

### **I.2.3.1 Corrosion par piqures**

C'est une forme de corrosion localisée produite par certains anions, notamment les halogènes et plus particulièrement les chlorures, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince.

Elle induit typiquement des cavités de quelques dizaines de micromètres de diamètre.

### **I.2.3.2 Corrosion galvanique**

Appelée aussi corrosion bimétallique, elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux qui diffèrent par leur potentiel de corrosion. Le métal ayant le potentiel de corrosion le plus négatif subit une corrosion accélérée par l'autre métal.

### **I.2.3.3 Corrosion intergranulaire**

C'est une autre forme de corrosion localisée s'attaquant aux joints de grains, rendant la structure mécaniquement fragile.

### **I.2.3.4 Corrosion uniforme**

C'est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface. Cette attaque est observée, par exemple, sur les métaux exposés aux milieux acides.

# **Chapitre II :**

## **Matériaux et techniques expérimentales**

Ce chapitre est consacré à la description des dispositifs expérimentaux utilisés lors des caractérisations de nos matériaux. Les échantillons ; l'acier 316L et l'alliage TA6V4 sont prélevés au centre de développement des technologies avancées (CDTA). Cependant les essais expérimentaux sont faits dans le laboratoire de recherche au sein de l'école nationale supérieure des mines et métallurgie (ENSMM).

Dans ce chapitre nous allons montrer comment on a caractérisé les échantillons afin d'améliorer les propriétés biomédicales de ces dernières.

## II.1. Matériaux

Les matériaux utilisés dans cette étude sont :

- Alliage de nuance TA6V4 contenant 6% d'aluminium, 4% Vanadium, de l'azote, de l'oxygène sous forme de traces, et du titane.
- Acier inoxydable austénitiques 316L à faible teneur en carbone <1%.

Comme il a été discuté dans l'introduction du mémoire, l'objectif principal recherché dans ce travail est l'étude du comportement tribologique et électrochimique de ces matériaux utilisés dans le domaine biomédical (fabrication de prothèse de hanche), L'étude tribologique se fait à différentes conditions alors que l'électrochimie a lieu dans une solution ringer à 37C°

## II.2. Techniques expérimentales

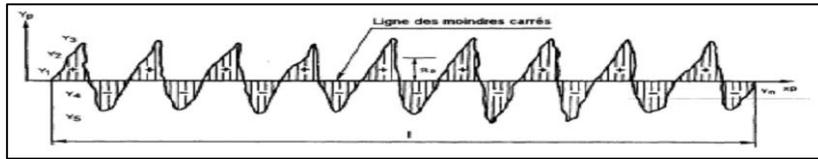
Dans cette partie de notre travail, nous nous sommes intéressé à la réalisation des essais de rugosité, tribologie et électrochimie des matériaux étudiés : l'acier 316L et l'alliage de Titane TA6V4.

### II.2.1. Rugosité

Les instruments les plus répandus sont les rugosimètres mécaniques, avec lesquels la variation de la rugosité d'une surface est déterminée à l'aide d'un palpeur mécanique qui balaye la surface. Le mouvement vertical du stylet qui est mécaniquement en contact avec la surface est capté soit par un système inductif soit par un système optique avec réflexion d'un laser sur le levier (voir figure II.5). La variation en hauteur z est mesurée en fonction de la direction x. en déplaçant le stylet sur un tracé ou successivement sur toute la surface, on obtient l'image de la topographie de la surface. Le signal mesuré est enregistré de façon digitale ; on peut alors visualiser le résultat sur un écran et calculer les paramètres de rugosité. L'inclinaison de la surface peut être contrôlée par le porte-échantillon. Les rugosimètres servent à déterminer rapidement la rugosité des surfaces. Ces instruments donnent la profondeur de la rugosité moyenne Rz et la valeur de rugosité moyenne Ra en  $\mu\text{m}$ , et le Ry.

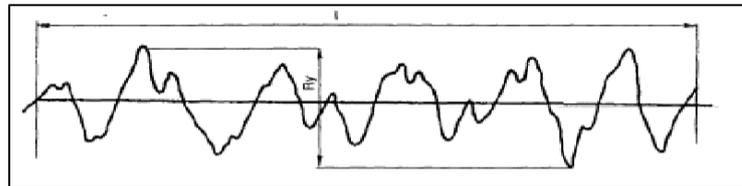
- **Ra** : Ecart moyen arithmétique de rugosité Le Ra est égal à la moyenne arithmétique de la valeur absolue d'ordonnée Y entre chaque point du profil et la ligne moyenne :

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx = \frac{\Sigma(\text{aires}+) + \Sigma(\text{aires}-)}{l} \quad \text{Équation II.1}$$



**Figure II.1:** Ecart moyen arithmétique de rugosité Ra [23].

- **Ry** : Hauteur maximale du profil à l'intérieur d'une longueur de base C'est la distance entre le point le plus haut des saillies et le point le plus bas des creux, à l'intérieur de la longueur de base.



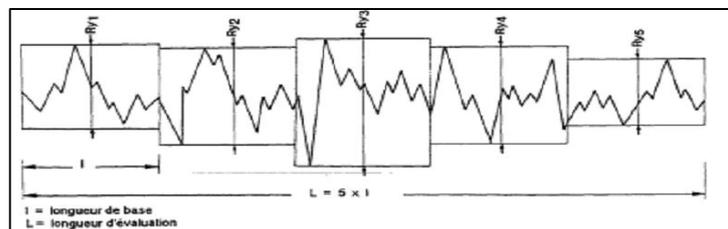
**Figure II.2:** Hauteur maximale du profil à l'intérieur d'une longueur de base Ry [23].

- **Rz**: Profondeur moyenne de rugosité sur 5 longueurs de base

Il existe deux définitions du Rz :

1. Norme DIN 4768 : La rugosité moyenne Rz est la moyenne arithmétique des profondeurs de rugosité de cinq zones d'évaluation successives de longueur égale à la longueur de base l.

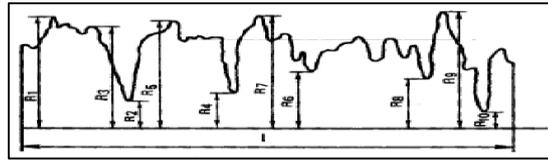
$$Rz = \frac{(Ry_1 + Ry_2 + Ry_3 + Ry_4 + Ry_5)}{5} \quad \text{Equation II.2}$$



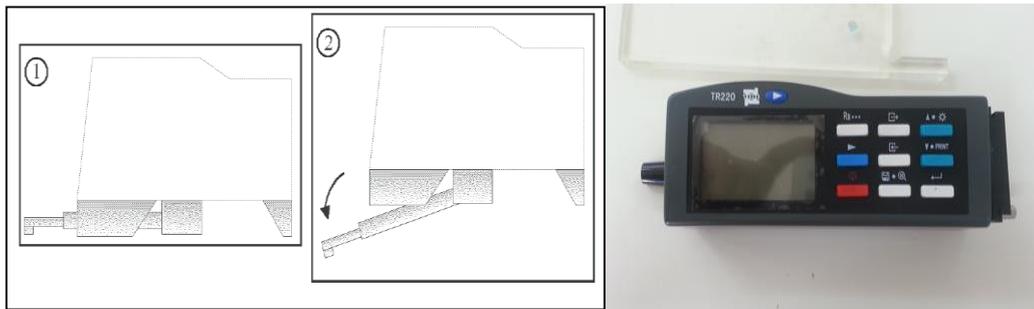
**Figure II.3:** La rugosité moyenne Rz Norme DIN 4768 [23].

2. Norme ISO 4287/1 : La hauteur des irrégularités d'après dix points Rz est la distance moyenne entre les cinq points les plus hauts des saillies et les cinq points les plus bas des creux, se trouvant dans les limites de la longueur de base, mesurée à partir d'une ligne parallèle à la ligne moyenne et ne coupant pas le profil [23]:

$$Rz = \frac{(R_1 + R_3 + \dots R_9) - (R_2 + R_4 + \dots R_{10})}{5} \quad \text{Equation II.3}$$



**Figure II.4:** La rugosité moyenne Rz Norme ISO 4287/1 [23].



**Figure II.5:** rugosimètre TR220 et le principe de fonctionnement

Les différents échantillons ont été évalués sur le système TR 220 à des conditions regroupé dans le tableau suivant :

**Tableau II.1.** Récapitulation des conditions de travail

Paramètres de mesures	Champs de mesures	Course du palpeur total	Vitesse de course du palpeur	Température du travail
Ra, Rz	*Ra: 0.05 à 15 $\mu\text{m}$ *Rz: 0.2 à 60 $\mu\text{m}$	6 mm	1.0 mm/sec	0°C à 40°C

## II.2.2. Tribomètre

L'équipement utilisé pour détermination le coefficient de frottement est un tribomètre Bille-Disque et Pion-Disque « modèle TRB6-S-DE-0000, Marque CSM Instrument » dans laboratoire d'ENSMM-Annaba, il sert à étudier la tenue à l'usure des surfaces. (Fig. II.4).

Ce dispositif possède deux mouvements possibles, un mouvement alternatif et un mouvement de rotation classique employé pour notre étude. Le bras supérieur (porte-bille) peut être motorisé par un système de positionnement vertical et un système Sur tribomètre, la force de frottement dynamique et le coefficient de frottement instantané ont été mesurés en fonction de la durée des tests [24]. Les propriétés tribologiques d'usure (mouvement rotatif) pour les différents échantillons ont été évaluées sur le système TRB6-S-DE-0000 à l'air, avec une température de 25-30 °C et un état non lubrifié. La bille d'acier 100C6 de 6 mm de diamètre, de dureté 832 Hv et de module

d'Young 0000a été choisie comme antagoniste pour éviter des réactions chimiques supplémentaires (Cf. Figure. II.2).

**Tableau II.2.** Récapitulation des conditions de travail

<b>Acquisition</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Rayon: 1 mm</li> <li>➤ Vitesse linéaire : 3,00 [cm/s]</li> <li>➤ Force normale : 3.00 ,6.00 et 9.00 [N]</li> <li>➤ Condit. Stop : 30 [m]</li> <li>➤ Taux d'acquisition : 31,0 [hz]</li> </ul>
<b>Partenaire statique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Substrat : 100C6</li> <li>➤ Dimension : 6,00 [mm]</li> <li>➤ Géométrie : Ball</li> </ul>
<b>Environnement</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Température : 25,00 °C</li> <li>➤ Atmosphère : Air</li> <li>➤ - Humidité : 50,00 [%]</li> </ul>

Cependant ce processus nous a permis de trouver empiriquement la valeur de coefficient de frottement  $\mu$ .



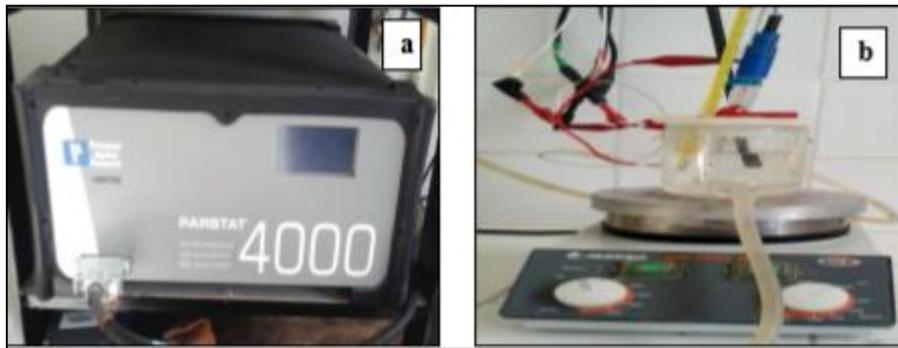
**Figure II.6:** tribomètre de type TRB6-S-DE-0000

Pour nos essais, les paramètres expérimentaux sont les suivants: des charges  $F_n$  de 3, 6 et 9 N, la vitesse est constante de 3 cm/s et la distance 30 m. Après les essais, la morphologie de chaque trace d'usure a été observée par microscopie optique (MO)

### II.2.3. Essai de corrosion électrochimique:

Les appareillages qui permettent d'étudier les processus électrochimiques ont une importance primordiale puisqu'elles sont capables de contrôler et mesurer les potentiels et/ou les courants électriques sur une interface électrochimique.

Nous avons effectué le travail sur une cellule électrochimique à trois électrodes: Electrode de travail, électrode de référence, contre électrode [22]. Or les essais se font dans un milieu artificiel dont la composition est mentionnée dans le **tableau II.3**. La cellule électrochimique à double paroi est maintenue, par l'intermédiaire d'un bain thermostaté, à une température constante et définie (37°C).



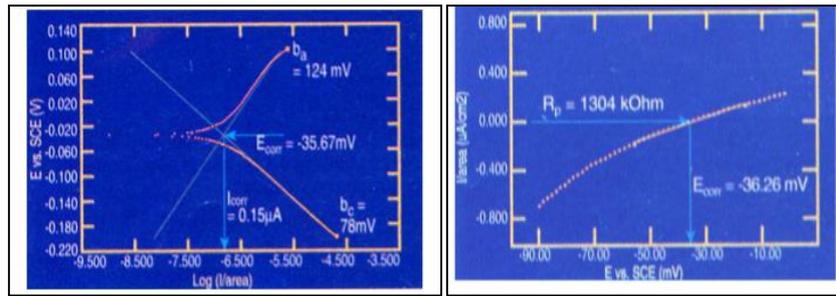
**Figure II.7.** Représentation schématique d'une cellule à trois électrodes

Pour étudier le comportement électrochimique des couches déposées nous avons effectué le processus ci-dessus afin de calculer:

- **Le taux de corrosion** qui est établi par des mesures de la masse d'échantillon avant l'exposition au liquide corrosif et après cette exposition. Le taux de corrosion s'exprime en [ $\mu\text{m}/\text{an}$ ].
- **Le courant de corrosion**, Il est déterminé graphiquement à partir de courbe  $\log i = f(E)$ , et exprimé en intensité, l'unité de mesure est l'A/cm<sup>2</sup>.

On peut le mesurer à l'aide d'une cellule électrochimique (*cf. figure II.7*) équipée avec une électrode de référence (calomel ou hydrogène) et une électrode de travail qui polarise l'échantillon testé. Ces électrodes sont polarisées par un potentiostat. Le principe de manipulation consiste à balayer le potentiel de l'électrode de travail de -30 mV jusqu'à +30mV et à enregistrer le courant de corrosion. Une bonne résistance à la corrosion caractérise les matériaux à petit courant de corrosion.

- **Résistance de polarisation**, aucune condition cinétique particulière n'est requise pour déterminer la résistance de polarisation qui est déterminée à partir de la courbe  $E=f(i)$  au voisinage immédiat du potentiel de corrosion de l'échantillon à  $\pm 50\text{mV}$  (*cf. figure II.7*). La résistance de polarisation est la pente  $\Delta E/\Delta i$  de la courbe de polarisation, l'unité de mesure est  $\Omega/\text{cm}^2$ .



**Figure II.8** Détermination de l'intensité du courant et la résistance de polarisation. [25]

**Electrolyte:** c'est une solution contenant des espèces chimiques ioniques (solutés) et/ou des gaz dissous, tels que l'oxygène. Il est donc conducteur de l'électricité. On appelle espèces électrochimiquement actives, des ions ou des molécules qui peuvent être réduits par des électrons [22]. Dans notre cas, nous avons choisi un électrolyte qui va simuler le milieu physiologique à savoir la solution de Ringer avec la composition et les caractéristiques suivantes: PH= 7.

**Tableau II.3:** Composition chimique de la solution de Ringer.

Composants	Quantités (g/l)
NaCl	8.50
KCl	0.25
CaCl <sub>2</sub> 2H <sub>2</sub> O	0.22
NaHCO <sub>3</sub>	0.15

Nous avons effectué des tests électrochimiques sur un acier inoxydable 316L et alliage de Titane TA6V4 par un appareillage électrochimique (PARSTAT 4000), constitué d'un POTENTIOSTAT GALVANOSTAT enchainé à un microordinateur au niveau de CDTA.

## II.2.4. Microscopie optique

Le microscope optique est connu depuis des siècles et son principe est décrit dans plusieurs manuels.



**Figure II.9:**Microscope optique

Le microscope est utilisé pour observer les surfaces des échantillons usés à l'aide d'un tribomètre dans les conditions indiquées précédemment.

# **Chapitre III :**

## **Résultats et discussions**

### III.1. Propriétés de surface

L'optimisation des propriétés tribologiques et la résistance à la corrosion des surfaces, est une voie de recherche vaste et importante, compte tenu de leur application potentielle dans différents domaines biomédicaux. Résistance à l'usure et à la corrosion sont les deux premières caractéristiques principales des surfaces qu'il faut optimiser pour espérer améliorer l'intégration des implants.

C'est pour cela dans ce chapitre nous avons étudiés les propriétés de surface; rugosités, propriétés tribologiques et électrochimiques

#### III.1.1. Rugosités

**Tableau III.1.** Les paramètres de rugosités.

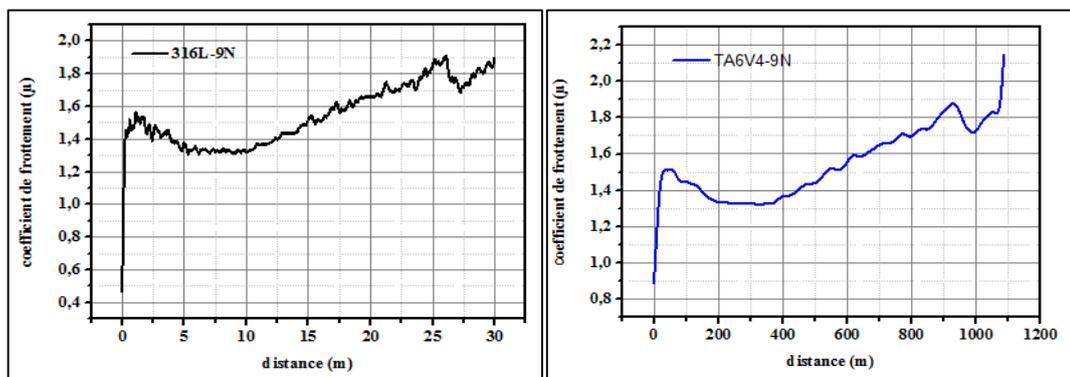
	<b>Ra</b>	<b>Rq</b>
<b>Acier 316L</b>	0.229	0.275
<b>TA6V4</b>	0.370	0.423

D'après tableau III.1 qui donne la moyenne de la rugosité Ra et Rq, on remarque que l'acier 316L a un coefficient de rugosité Ra plus faible que TA6V4 qui n'a présenté pas des aspérités beaucoup à sa surface. On révèle que la rugosité de l'acier 316L faible que TA6V4. Les contacts mécaniques pour mettre en évidence la déformation plastique ou pour comprendre les problèmes de frottement, on doit prendre en considération la rugosité. Il en est de même lorsqu'on s'intéresse aux contacts électriques.

### III.2. Propriétés tribologiques et micrographique

Les essais tribologiques ont été effectués sur un tribomètre rotatif bille-plan de CSM.

#### III.2.1. coefficient de frottement



**Figure III.1.** Courbes d'évolution de coefficient du frottement en fonction de la distance.

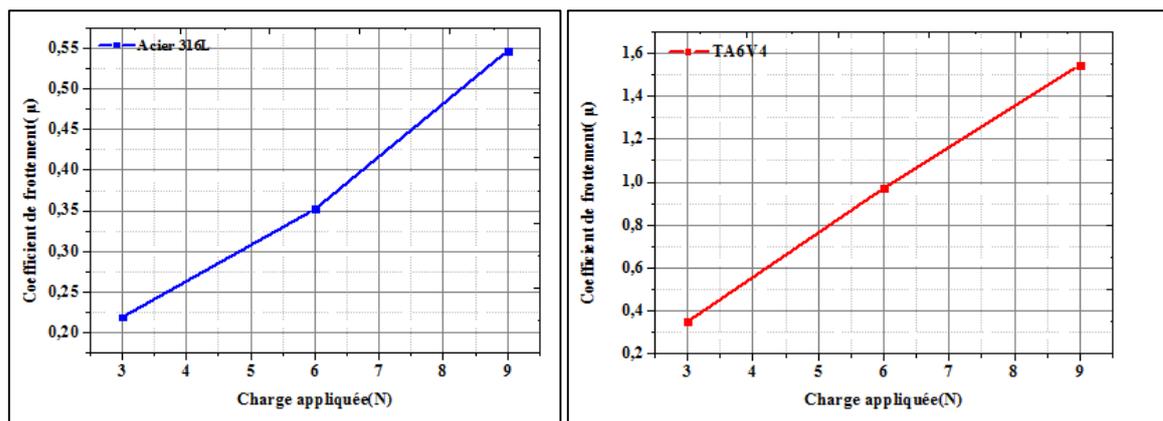
D'après les courbes au-dessus on observe l'augmentation du coefficient de frottement en fonction de la distance parcourue jusqu'à une certaine valeur puis il stabilise progressivement. La stabilité du a la formation de troisième corps au cours de phénomène d'usure qui apparait pendant l'essai de tribologie.

Les particules (troisième corps) produites à la dégradation du surface sont incrustées dans cette dernière, ce qui résultent l'usure à deux corps (particules, bille abrasive). Ces particules sont oxydés rapidement grâce à leurs finesses, par conséquent le troisième corps c'est un oxyde ayant une dureté élevée qui affermit la constance de coefficient de frottement.

**Tableau III.2.** Les coefficients de frottements en fonction de la charge appliquée.

ACIER 316L			
La charge	3	6	9
Coef de frottement ( $\mu$ )	0.219	0.352	0.547
TA6V4			
La charge	3	6	9
Coef de frottement ( $\mu$ )	0.349	0.972	1.546

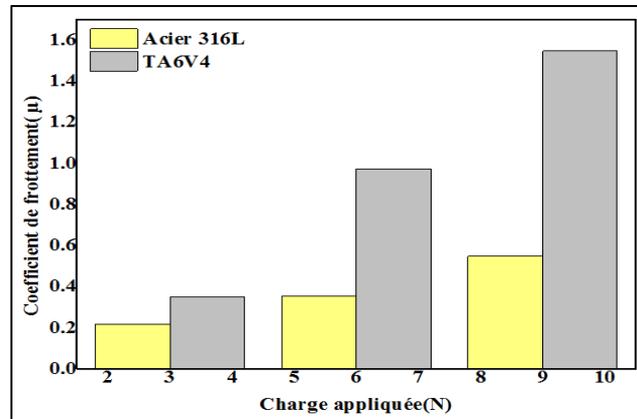
Nous avons fait varier la vitesse la charge (3, 6, 9N) ; la distance de glissement a été fixée à 30m. Les courbes des essais de frottement (*cf. tableau III.2*) montrent que l'évolution du coefficient de frottement est proportionnelle à la charge appliquée et AISI 316 L a en général un coefficient de frottement supérieur que TA6V4.



**Figure III.2.** Courbes des coefficients de frottements en fonction de la charge appliquée.

Il existe une relation directe entre la charge appliquée et le coefficient de frottement (*cf. figure III.2*). Cette corrélation dû à la croissance de l'aire de contact bille /échantillon ; cette dernière est causé par la déformation plastique de la surface et la présence des aspérités (rugosité).

Le rôle de la surface de contact et son évolution avec la charge (déformation élastoplastique) ainsi que sur la notion d'adhérence (forces d'adhérence, rôle de l'état physico- chimique de la surface) ayant une relation direct avec le coefficient de frottement.



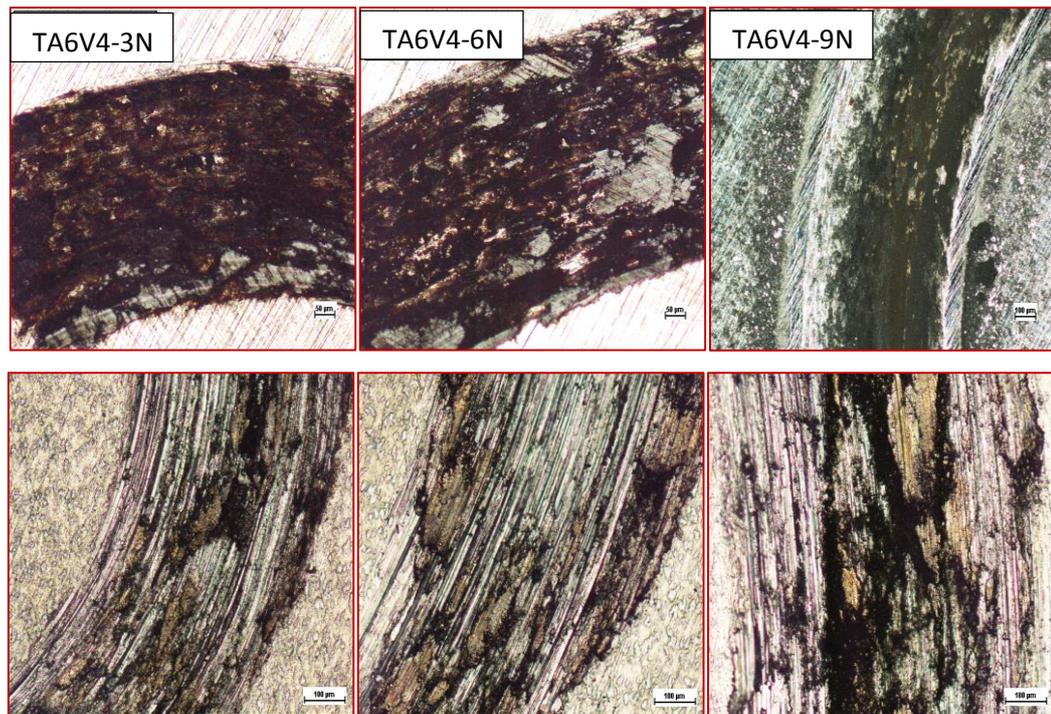
**Figure III.3** variation du coefficient de frottement en fonction de la charge.

Selon la figure III.3 on remarque que le coefficient de frottement de TA6V4 est supérieur à celle de l'acier 316L quelque soit la charge appliquée ; parceque le TA6V4 a une rugosité élevé par rapport l'AISI 316L (voir **tableau III.1**). L'observation par microscopie optique montre qu'il y a des sillons d'usure abrasive dans l'alliage TA6V4 néanmoins elles n'apparaissent plus dans l'AISI 316L. Cette observation nous permet de conclure que le TA6V4 est plus tendre que l'AISI 316 L donc ayant un coefficient de frottement élevé.

### III.2.2. Observation microscopique

La caractérisation par M O (**Figure III.4.**) montre la présence des sillons de labourage correspondant à un même mécanisme d'usure abrasive, ce qui est confirmé par la mesure de la perte de masse, l'usure étant plus importante pour AISI 316L, Il existe une relation directe entre la charge appliquée et la ténacité de la surface usée.

On observe la formation d'un sillon plastique avec enlèvement de matière sous forme de microcopeaux primaires. La formation de ce sillon est accompagnée par la formation de deux rives ou bourrelets latéraux dont le détachement peut former des microcopeaux secondaires. Quand le matériau est ductile il y a prédominance de la déformation.



**Figure III.4.** Morphologie des surfaces obtenues par microscopie optique après les essais de tribologie.

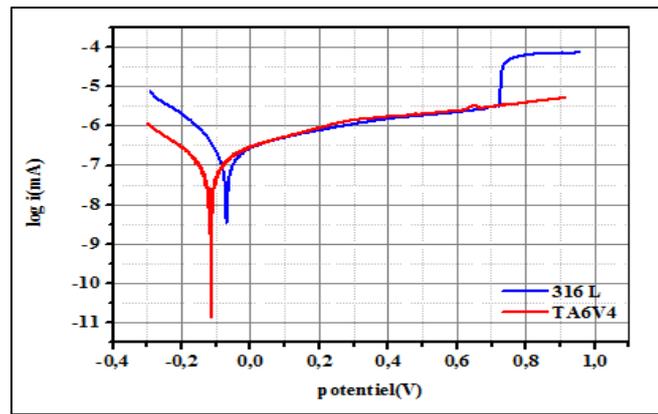
### III.3. Propriétés électrochimiques

Afin de calculer les paramètres électrochimiques, nous traçons la courbe  $E=f(\log(I))$  dans un repère semi-logarithmique, nous mettons en évidence des droites correspondant à  $\eta_a$  et  $\eta_c$  dont les pentes sont  $\beta_a$  et  $\beta_c$ . En descendant le demi plan  $(E, I_c)$  sur le demi plan  $(E, I_a)$ , et nous obtenons l'intersection des droites Tafel donnant  $I_{corr}$  et  $E_{corr}$  tous ces paramètres sont regroupés dans le tableau suivant :

**Tableau III.3.** Tableau récapitulatif des paramètres de corrosion

Echantillons	$E_{corr}$ (mV)	$I_{corr}$ (nA)	$\beta_a$ (mV)	$\beta_c$ (mV)	Taux de corrosion (mm/an)
Acier 316L	-311.613	80.490	833.124	155.812	2.114
TA6V4	-83.272	39.338	100	100	0.168

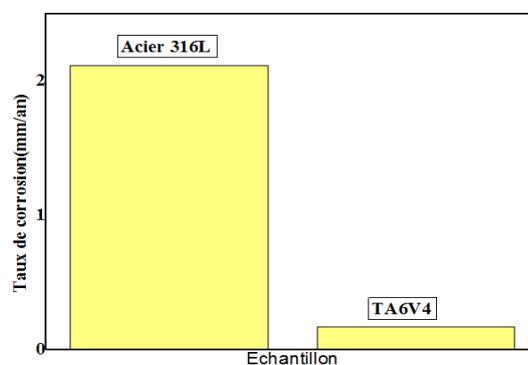
La **Figure III.5** présente les courbes de polarisation potentiodynamique  $\log I=f(E)$ , relatives aux échantillons étudiés; l'acier 316L et TA6V4. L'examen de ces courbes de polarisation  $\log I=f(E)$  de la figure ci-dessous montre l'évolution du courant en fonction du potentiel.



**Figure III.5.** Courbes de polarisation de l'acier inoxydable 316L et l'alliage TA6V4.

Les courbes de polarisation montrent clairement, qu'il y a par rapport à l'acier, une hystérésis positive, signe que le TA6V4. Cet hystérésis correspond aux densités de courant les plus faibles accompagnées d'une variation cathodique de leur potentiel de corrosion. Nous remarquons qu'il y a un accroissement de potentiel de corrosion au fur et à mesure de -311.6131 pour l'acier jusqu'à -83.272 pour l'alliage de titane; La raison de ce décalage positif est due à la présence de la couche de passivation  $TiO_2$  formée qui diminue l'effet corrosif, or la résistance à la corrosion est élevée à celle de l'acier inoxydable.

### III.3.1. Taux de corrosion



**Figure III.6.** Histogramme illustrant le taux de corrosion de TA6V4 et 316L.

Vu que le taux de corrosion de AISI 316L est de l'ordre de 0.498 mm/an, mais pour le TA6V4 est de 0.168 mm/an. En effet l'alliage de titane est plus résistant que celui de l'acier 316L, cette différenciation est engendrée par la formation d'une couche passive de  $TiO_2$  qui est plus inerte par rapport à la couche de passivation de l'acier inoxydable 316L  $Cr_3O_2$ , la densité importante et l'épaisseur de la couche obtenue et les liaisons fortes. La diminution remarquable du taux de corrosion des échantillons TA6V4 provoque un abaissement des densités de courant. Or la diminution du taux de corrosion est traduite par la forte présence de la couche passive.

## Conclusion

Les objectifs généraux de ce travail ont été la caractérisation des matériaux AISI 316L et l'alliage à base de Titane (TA6V4) sous différents aspects (mécanique, tribologique et électrochimique) ; afin de comparer les résultats obtenues.

Les résultats relatifs aux performances vis-à-vis la rugosité de l'acier 316L et TA6V4 montre que l'aspect topographique de la surface ayant une influence primordiale sur les autres propriétés tel que la tribologie et la corrosion.

Notre étude prouve que les contacts mécaniques qui mettent en évidence la déformation plastique ou comprennent les problèmes de frottement, doit prendre en compte la rugosité.

Les résultats enregistrés lors des essais d'usure montrent clairement que les charges normales progressives ont une impacte sur le type d'usure.

L'observation par microscopie optique montre l'existence d'un sillon plastique avec enlèvement de matière sous forme de microcopeaux primaires. La formation de ce sillon est accompagnée par la formation de deux rives ou bourrelets latéraux dont le détachement peut former des microcopeaux secondaires. Quand le matériau est ductile il y a prédominance de la déformation. L'usure étant plus importante pour l'alliage TA6V4. Il existe une relation directe entre la charge appliquée et la ténacité de la surface usée.

Nous remarquons qu'il y a une claire différence entre le potentiel de corrosion de l'acier AISI 316L (-311.613 mv) et de l'alliage de Titane (-83.272 mv); La raison de cette différence est due à la présence de la couche de passivation  $TiO_2$  formée qui diminue l'effet corrosif et assure la tenue à la corrosion.

**Références Bibliographies**

- [1] G. Manivasagam, D. Dhinasekaran, A. Rajamanickam, Biomedical Implants: Corrosion and its Prevention - A Review, Recent Patents on Corrosion Science; (2010).
- [2] M. Long, H.J. Rack, Titanium alloys in total joint replacement—a materials science perspective, Biomaterials, 19 (1998).
- [3] D.W. Hoepfner, V. Chandrasekaran, Fretting in orthopaedic implants: A review, Wear, (1994).
- [4] P. Parida, A. Behera, S. Mishra, Classification of Biomaterials used in Medicine, International Journal of Advances in Applied Science; (2012).
- [5] P. Compain, Thèse doctorat, Université de Henri Poincaré - Nancy 1 : comportement des matériaux prothétiques dentaires en solution saline - approche expérimentale, (2010).
- [6] S.H.Tuna, N.Ö.Pekmez, F.Keyf, F. Canlı. Dental materials 25, (2009).
- [7] Giusti, J., Contraintes et déformations résiduelles d'origine thermique ; application au soudage et à la trempe des aciers, Thèse de Docteur-ès Sciences, Univ. Paris VI, 1981.
- [8] Lionel Depradeux; simulation numérique du soudage – acier 316l validation sur cas tests de complexité croissante ; le 1 Mars 2004.
- [9] Ghislain Roméo; comportement tribologique d'un alliage de titane traité et / ou revêtu en fretting a de battement libre ; le 11 mai 2007
- [10] Fridrici V; Fouvry S; Kapsa Ph; Fretting wear behavior of a Cu-Ni-In plasma coating; Surf. Coat. Technol; (2003), pp. 429-434.
- [11] Frédéric Dartigues ; La précipitation à la solidification du monoborure de titane dans l'alliage de titane (Ti-6Al-4V) peut-elle modifier sa microstructure et son comportement mécanique ? ; Le 14 octobre 2004
- [12] Hayat Berkane ; élaboration et caractérisation de revêtements durs Ti-Al, Al-Al-N et Al-Cr-N ;
- [13] Benkhadra Dalal; Comportement physico -chimique des inserts dentaires ;
- [14] Vincent dalbert ; Etude du comportement en tribocorrosion d'aciers inoxydables en milieux aqueux : évaluation de la synergie entre sollicitations mécaniques superficielles et réactions électrochimiques de surface, effet de la microstructure ; le 23 juin 2014.

- [15] A. Cornet et J.-P. Deville ; physique et ingénierie de surface ; chap 01 Propriétés physico-chimiques des surfaces ; EDP Sciences 1998
- [16] Noël Brunetière ; Introduction à la tribologie ; Institut Pprime – Futuroscope 2015
- [17]. I. M. HUTCHINGS, Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials. Elsevier, London.
- [18]. ASM INTERNATIONAL, Metals Handbook: Friction, Lubrication and Wear technology Volume 18, (1992).
- [19] A. Cornet et J.-P. Deville ; physique et ingénierie de surface ; chap 03 Tribologie : frottement et usure des surfaces ; EDP Sciences 1998
- [20] W. Baeckmann, W. Schwenk, W. Prinz, Cathodique corrosion protection, Theory and practice of Electrochemical protection processes, Corrosion and Electrochemical Corrosion Protection, Elsevier Science (USA), 22 (1997).
- [21] W. Stephentait, An introduction to electrochemical corrosion testing for practicing engineers and scientists, pairOD act publications, 2,18, 44 (1994).
- [22] Mahmoudi Sana; Etude comparative entre deux métaux passifs en milieux neutre, alcalin et acide: un acier inoxydable 304L et un alliage de titane Ti6Al4V
- [23]. Marie-Line Zani; La mesure de rugosité? Quelques normes... et plusieurs dizaines de paramètres ; Octobre 2003.
- [24]. Brahim Tlili ; Caractérisation de films durs multicouches élaborés par pulvérisation magnétron. Influence des conditions d'élaboration sur leurs propriétés ; 6 Mar 2011.
- [25]. B, Crosogeat, P. Colon ; La corrosion ; société francophone de biomatériaux dentaires ;2009-2010.