



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
المدرسة الوطنية العليا للمناجم والمعادن - عمار العسكري - عنابة  
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET DE LA METALLURGIE  
AMAR LASKRI- ANNABA

Département Science et Génie des Matériaux

## Mémoire de Fin d'Etudes

*En vue de l'obtention du Diplôme de MASTER*

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Science et Génie des Matériaux

Spécialité : Ingénierie des Surfaces

Thème

Etude des propriétés tribologiques d'un alliage AS12 moulé  
Sous pression

Présenté par : **Yamina Hafsi**

Encadré par : **Dr, Yasmina Taibi**

Jury de Soutenance

**Mohamed Cherif Benoudia**

**Pr, ENSMM**

**Président**

**Louiza BENDJEDDOU**

**MCB, ENSMM**

**Examineur Principal**

**Septembre2021**

**Département : Sciences et génie des matériaux**

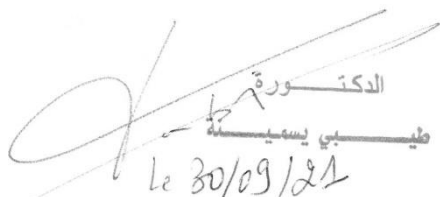
**AUTORISATION DE DEPOT FINAL DU  
MEMOIRE DE MASTER**

Je soussigné (e) Mr. **BENOUDIA Mohamed Cherif**

Président(e) du jury de soutenance de mémoire de Master, déclare avoir autorisé  
Melle **Hafsi Yamina** à déposer son mémoire de Master après avoir apporté les  
corrections signalées par les membres du jury.

**Avis du Promoteur :**

Favorable



الدكتورة  
حنيفة يسمي  
Le 30/09/21

**Avis de l'Examineur :**

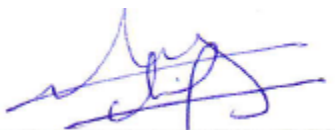
**30/09/2021**



**Président du Jury**

Le 30/09/2021

**Pr Mohamed Cherif BENOUDIA**



# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à ma famille*

*A mes amies*

*A tous ceux que j'aime...*

## ***Remerciements***

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance à mon encadreur Mme. Taibi Yasmina. Pour son orientation avisée, ses conseils précieux, sa disponibilité et son écoute.*

*Je veux dire merci pour l'équipe de laboratoire de l'ENSMM.*

*Je voudrais également remercier les membres du jury Mme BENJEDDOU.L et Mr BENOUDIA. MC pour avoir accepté d'évaluer cette recherche et pour toutes leurs remarques et Critiques.*

*Enfin, Je tiens à adresser un grand merci à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail et qui ont compris son intérêt en me consacrant un peu de leur temps précieux afin de mener à bien ce mémoire.*

*A l'ensemble de mes professeurs pour avoir transmis leur savoir*

*Durant toutes ses années.*

*Merci infiniment.*

## Résumé :

Dans ce travail nous nous intéressons à faire une étude comparative du comportement tribologique de l'alliage AlSi12 qui a été élaboré à différentes températures d'injection.

Notre étude a donc pour objectif de trouver les meilleures performances tribologiques tel que la résistance à l'usure.

Les résultats obtenus à partir de ces deux essais sont le coefficient de frottement et le taux d'usure, après une caractérisation de piste d'usure par profilomètre et MEB ont été réalisés, pour connaître le mécanisme et le type d'usure.

**Mots clés :** comportement tribologique, alliage AlSi12, résistance à l'usure.

## Abstract:

In this work we are interested in making a comparative study of the tribological behavior of AlSi12 alloy which has been developed at different injection temperatures.

Our study aims to find the best tribological performance such as wear resistance.

The results obtained from these two tests are the coefficient of friction and the rate of wear after a characterization of wear track by profilometer, SEM were conducted to know the mechanism and type of wear.

**Keywords:** tribological behavior, AlSi12 alloy, wear resistance

## ملخص:

في هذا العمل، نحن مهتمون بإجراء دراسة مقارنة للسلوك الترابيولوجي لسبائك الالومنيوم سيليسيوم 12 الذي تم تطويره عند درجات حرارة مختلفة. للحقن لذلك تهدف دراستنا إلى إيجاد أفضل أداء تريبولوجي مثل مقاومة التآكل و أفضل النتائج التي تم الحصول عليها من هذين الاختبارين هي معامل الاحتكاك ومعدل التآكل بعد توصيف مسار التآكل بواسطة مقياس بروفيلومتر تم إجراء المسح الإلكتروني لمعرفة آلية ونوع التآكل.

الكلمات المفتاحية : السلوك الترابيولوجي ونوع التآكل وسبائك الالومنيوم سيليسيوم 12

# Table de Matière

Table de Matière .....	iv
<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I. : Contexte générale .....</b>	<b>3</b>
Introduction .....	3
Etude bibliographique .....	3
Définition de la tribologie.....	3
Surfaces et topographies .....	5
Système tribologique.....	5
Paramètres de tribologie .....	6
Les paramètres qui influent sur le taux d'usure et le frottement .....	16
Paramètres fonctionnels.....	16
Procédure expérimental.....	17
Objectif .....	17
Matériaux d'étude .....	17
L'essai tribologique.....	19
Caractérisation de l'usure .....	21
<b>Chapitre II. : Résultats et discussion .....</b>	<b>25</b>
Introduction .....	25
Coefficient de frottement et taux d'usure .....	25
Caractérisation de la piste d'usure .....	28
Profil 2D,3D des échantillons étudiés .....	30
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>34</b>

## Listes des figures

Figure 1: Etendue des ordres de grandeur des discipline nécessaires à une bonne compréhension de la tribologie[3] .....	4
Figure 2:Présentation de quelques exemples de surfaces [5].....	5
Figure 3:Représentation schématique d'un tribosystème[2] .....	6
Figure 4: Contact entre deux surfaces rugueuses [7].....	7
Figure 5:Mécanismes d'usure [8] .....	8
Figure 6: Abrasion à deux corps.....	10
Figure 7 : Abrasion à trois corps fermées : (a) $D < D_{max \text{ grain}}$ et (b) $D > D_{max \text{ grain}}$ .....	10
Figure 8:Abrasion à trois corps ouvert. ....	11
Figure 9:Mécanisme de l'usure adhésive.....	13
Figure 10:Processus d'usure par fatigue.[3].....	14
Figure 11:photos de la troçonneuse (a)et les échantillons d'étude .....	18
Figure 12:Polisseuse .....	18
Figure 13:Rugosimètre tactile.....	19
Figure 14:Appareil de tribomètre TRB.....	20
Figure 15: Schéma de principe des analyses. ....	20
Figure 16:Appareillage d'un profilomètre 2D et 3D.....	22
Figure 17: Microscopie électronique à balayage MEB couplé avec EDS .....	23
Figure 18:Duromètre .....	24
Figure 19:Principe de la dureté Vickers.....	24
Figure 20:l'évolution du coefficient de frottement en fonction de la distance en mètre de l'échantillon 1, 2 et 3. ....	25
Figure 21:Coefficient de frottement des échantillons. ....	27
Figure 22:La dureté Vickers des échantillons. ....	27
Figure 23:Micrographies MEB des traces d'usure des échantillons 1, 2 et 3.....	29
Figure 24:Profil 2D ,3D des trois échantillons.....	31
Figure 25: Le taux d'usure des trois échantillons. ....	32

## Listes des tableaux

Tableau 1:Paramètres des essais tribologiques .....	21
Tableau 2:Coefficient de frottement, dureté Vickers et le taux d'usure pour les trois échantillons.....	28
Tableau 3:La largeur de la piste d'usure pour les trois échantillons .....	29

### Introduction Générale

L'endommagement de pièces mécaniques par usure représente plus de 50% des cas dans l'industrie. Les conséquences de cette dégradation peuvent prendre diverses formes.

L'utilisation des alliages d'aluminium a connu ces dernières années une expansion très importante. Leur légèreté couplée à des caractéristiques mécaniques élevées en ont fait des matériaux de choix pour les applications mécaniques. En particulier, la nécessité de réduire le poids des pièces ont mené les concepteurs à remplacer de plus en plus les matériaux lourds par les alliages d'aluminium.

Ces derniers occupent une place favorisée comme matrice de composites pour l'industrie du transport et les pièces travaillantes en mouvement. Cette place revient à son mélange agréable de propriétés, comme un faible poids, une résistance à la corrosion, un entretien facile du produit final, un rapport résistance / poids élevé, un faible coût et une résistance élevée à l'usure. En particulier, l'alliage d'aluminium AlSi12 est beaucoup plus utilisé en raison de ses propriétés supplémentaires comme la capacité de coulée et la résistance à la corrosion élevée.

Plusieurs avancées dans ce domaine ont été réalisées par le développement de différents processus permettant d'améliorer les propriétés des alliages d'aluminium.

Afin d'estimer la fiabilité des pièces en frottement et leur durée de vie, l'essai tribologique simulant ou se rapprochant de l'environnement du travail est une étape incontournable dans la réussite d'une étude.

Ce travail contribue à l'analyse du comportement tribologique des alliages d'aluminium AlSi12 à différentes températures d'injection.

Ce mémoire s'articulera autour de deux chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique sur les notions nécessaires de la tribologie d'une part et d'autre part une présentation de la technique expérimentale (test d'usure) ainsi que les méthodes de caractérisations exploitées.



## **Introduction Générale**

---

Le deuxième chapitre, regroupe et discute les résultats expérimentaux obtenus relatifs aux échantillons. Cette étude est clôturée avec une conclusion générale.

# Chapitre I

## Contexte générale

## **Chapitre I. : Contexte générale**

### **Introduction**

Le premier chapitre est divisé en deux parties : La première partie est une étude bibliographique permettant de présenter quelques notions sur la tribologie (définition, système tribologique, propriétés tribologiques , et l'influence des paramètres agissants sur l'usure et le frottement) d'une façon générale , ainsi qu'une présentation de comportement tribologique de l'alliage AlSi12. La deuxième partie, une étude des propriétés tribologiques de nos échantillons après chaque test d'usure a différentes températures. Cette étude est portée principalement sur l'étude des propriétés tribologiques de l'alliage AlSi12 et la détermination de ses caractéristiques tribologiques (coefficient de frottement et taux d'usure). L'état des surfaces usées est étudié par microscope électronique à balayage couplé à l'EDS. Les images métallographiques sont traitées et exploitées pour estimer le taux d'usure de chaque échantillon.

### **Etude bibliographique**

#### **Définition de la tribologie**

La tribologie (du grec « tribos », frottement) fut tout d'abord définie comme « la science des surfaces en contact animées d'un mouvement relatif » (G. Salomon, 1968). Plus récemment, Godet dira à son sujet : « Si la mécanique est la science du mouvement, la tribologie est la science qui contrôle le mouvement ». On retrouvera la tribologie dans les applications industrielles les plus pointues (adhérence du contact roue / rail, impact de tubes dans les centrales nucléaires) comme dans la vie de tous les jours (l'essuie-glace qui laisse une pellicule d'eau non homogène sur le pare-brise d'une voiture, la craie qui crisse sur un tableau, etc.). Ce qui explique combien l'histoire de l'humanité et celle de la tribologie sont liées. La maîtrise du feu (vers 200000 av. JC) a été réalisée par la rotation d'une baguette de bois dure dans un morceau de bois tendre. L'industrie de la pierre polie s'est développée en contrôlant le frottement et l'abrasion. Les plus anciennes civilisations, de la Mésopotamie jusqu'en Chine, se posaient déjà la question de, par exemple, déplacer des objets lourds d'un point à un autre avec le moins d'efforts possible. On citera à ce propos un fameux bas-

relief d'une grotte de El-Bersheh, datant de l'Egypte des pharaons (1880 avant J.C.), montrant le rôle clef du tribologue de l'époque qui verse un lubrifiant lors du passage d'un convoi traînant un colosse de pierre [1].

La tribologie s'est tout d'abord intéressée principalement au volume des matériaux en contact, par la détermination des lois de comportement de frottement et d'usure (approche mécanique). Puis, la tribologie des surfaces a fait son apparition associée à la physico-chimie des surfaces (approche matériaux), pour enfin arriver à la tribologie des interfaces (figure 1) (approche complémentaire mécanique/matériaux). Cette dernière notion a permis une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et d'usure [2].

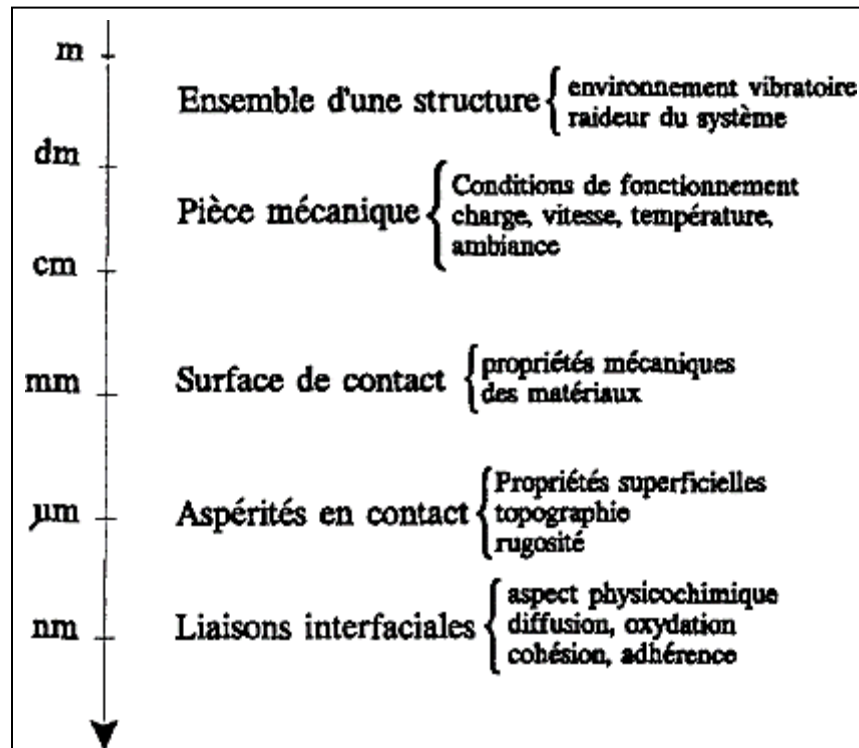


Figure 1: Etendue des ordres de grandeur des disciplines nécessaires à une bonne compréhension de la tribologie[3].

### Surfaces et topographies

La notion de surface est définie par l'ensemble des propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux en présence mais aussi par les caractéristiques géométriques du contact. La topographie est une caractéristique géométrique de grande importance. La rugosité joue un rôle essentiel puisqu'elle détermine l'aire effective de contact et donc la distribution des pressions superficielles [4].

Une surface solide est l'interface entre un solide et un deuxième milieu qui peut être un autre solide, un gaz (l'atmosphère par exemple) ou un liquide (un lubrifiant par exemple) (figure 2).

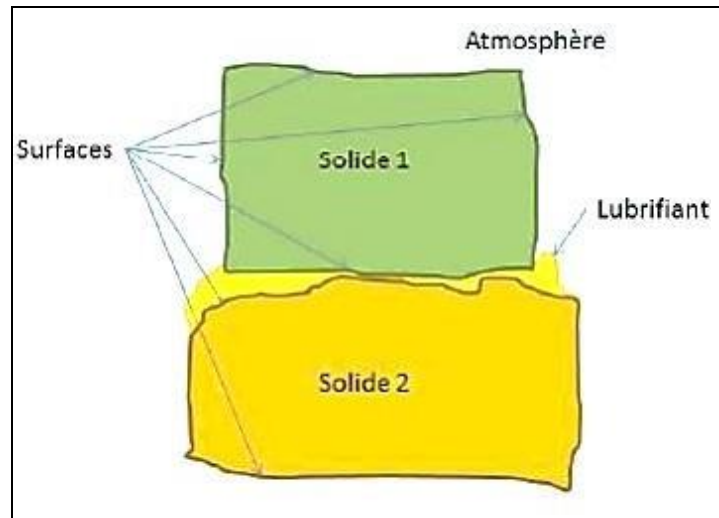


Figure 2:Présentation de quelques exemples de surfaces [5].

### Système tribologique

Un système tribologique (figure3) comprend quatre éléments :

- Les deux pièces en contact (A et B) (matériaux, forme géométrique, rugosité...).
- Le troisième corps (I) (lubrifiant, débris d'usure, dépôt, polluant...). Ce troisième corps sépare partiellement ou totalement les deux matériaux en contact et possède des propriétés différentes de celles des premiers corps.

- L'environnement (E) (température, humidité...). Avec des sollicitations exercées sur les deux pièces en contact : contraintes de contact, vitesse de glissement ou d'impact...

Ces quatre éléments donnent des réponses résultant des interactions [6].

L'objectif des essais tribologiques est d'entendre les réponses de ce système (force de frottement, usure, bruits et vibrations, échauffement...) en fonction des sollicitations données (pression de contact, vitesse de glissement, température...).

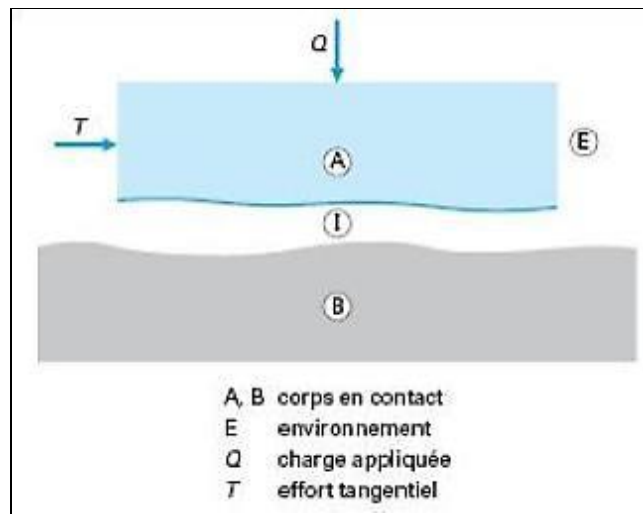


Figure 3: Représentation schématique d'un tribosystème[2].

### Paramètres de tribologie

#### Frottement

Qui se traduit par un effort tangentiel qui s'oppose au déplacement. Cet effort contribue à des pertes d'énergie et par ce biais affecte le rendement des machines. Il peut aussi être utile et donc amplifié, quand il s'agit de dissiper rapidement de l'énergie (freinage) [3].

#### Définition

Le frottement (ou friction) est une interaction, qui s'oppose au mouvement relatif entre deux systèmes en contact (figure 4). Le frottement peut être étudié au même titre que les autres types de force ou de couple.

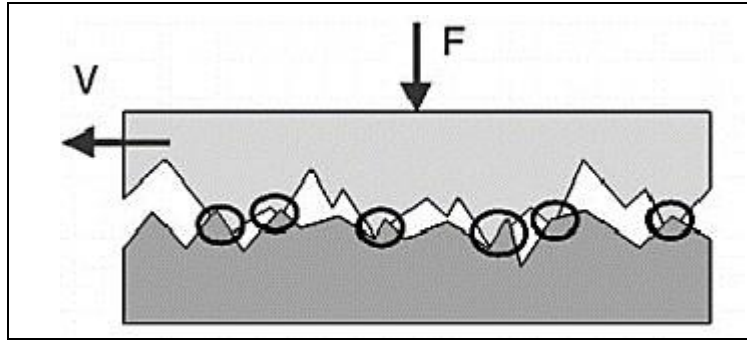


Figure 4: Contact entre deux surfaces rugueuses [7].

### Force et coefficient de frottement

Lorsque deux corps en contact sont en mouvement relatif, il existe une force de frottement qui s'oppose au glissement. Le coefficient de frottement  $\mu$  est défini comme étant le rapport de la force tangentielle notée  $F_t$  sur la force normale supportée par le contact  $F_n$  :

$$\mu = F_t / F_n(1)$$

Lors de l'essai de frottement, la force tangentielle de frottement,  $F_t$ , entraîne un déplacement latéral du bras élastique supportant la tige porte-bille. Un capteur inductif enregistre la déformation élastique du bras, de laquelle est déduite la valeur de  $F_t$ . La charge normale,  $F_n$ , étant connue, la valeur du coefficient de frottement,  $\mu$ , est calculée par le logiciel d'acquisition et de traitement des données, d'après sa définition, cette valeur est ensuite enregistrée en fonction du nombre de tours (temps) [4].

### Usure

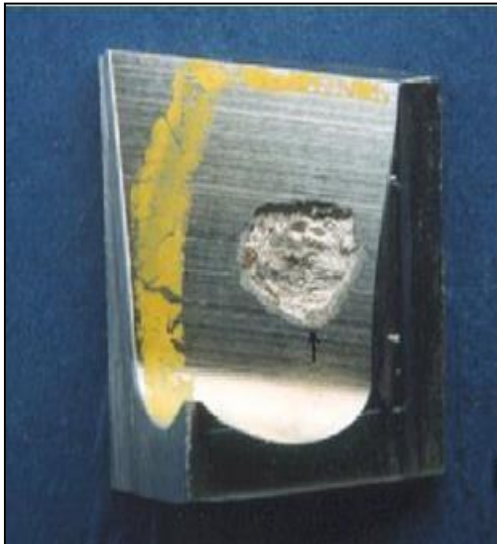
L'usure (figure 5) d'un solide est généralement défini comme une perte de matière, un mouvement de matière ou une transformation de matière en surface du solide sous l'effet d'une interaction avec un autre milieu (solide dans notre cas, mais ça peut également être un fluide) [8].



adhésion



abrasion



(c) Fatigue superficielle



corrosion

*Figure 5: Mécanismes d'usure [8].*

**Mécanismes d'usure L'usure  
par abrasion :**



L'usure abrasive est généralement engendrée soit par des particules préexistantes (matériaux granulaires), soit par des débris écrouis (ou protubérances) emprisonnés à l'interface du contact. On distingue ainsi suivant l'application, différents types de configuration, de sollicitation et de milieu. L'étude de ces différents paramètres et leurs influences est apparue intéressante pour comprendre et maîtriser l'usure abrasive [9].

### *Configurations de contacts :*

Les contacts réels sont généralement complexes. Selon la configuration mécanique on distingue :

- L'abrasion à deux corps,
- L'abrasion à trois corps fermées,
- L'abrasion à trois corps ouvertes.

**Usure abrasive à deux corps :** L'usure abrasive à deux corps (Figure 6) est un processus d'usure par déplacement et/ou enlèvement de matière de la surface frottante d'une pièce mécanique sous l'action d'aspérités dures fixes.

Une aspérité de la surface la plus dure raye la surface la plus tendre.

L'abrasion à deux corps concerne certains secteurs, gros consommateur d'énergie et de matières ou encore les techniques d'enlèvement de matière volontaire, que l'on veut maîtriser. Pour ces raisons alliées à une mise en oeuvre expérimentale ou une modélisation mathématique plus simple, les problèmes d'abrasion à deux corps ont fait l'objet d'études nombreuses et approfondies.

Elle est surtout connue pour ses aspects négatifs. Elle présente toutefois un aspect positif recherché dans de nombreux procédés d'usinage (machine à outil, polissage).

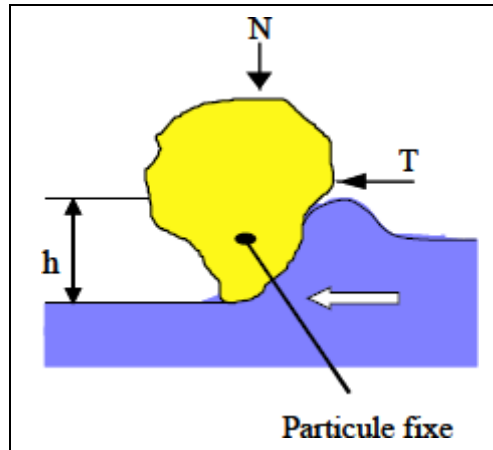


Figure 6: Abrasion à deux corps

**Abrasion à trois corps fermée :** L'usure abrasive à trois corps fermées est générée lorsqu'on frotte deux surfaces avec interposition d'abrasifs libres (Figure 7). Dans les configurations d'abrasion à trois corps, il faut distinguer deux cas :

- La distance entre les surfaces est du même ordre de grandeur que la dimension des grain abrasifs ( $D \leq D_{\max \text{ grain}}$ ).
- La distance entre les surfaces est supérieure à la dimension des grains ( $D > D_{\max \text{ grain}}$ ).

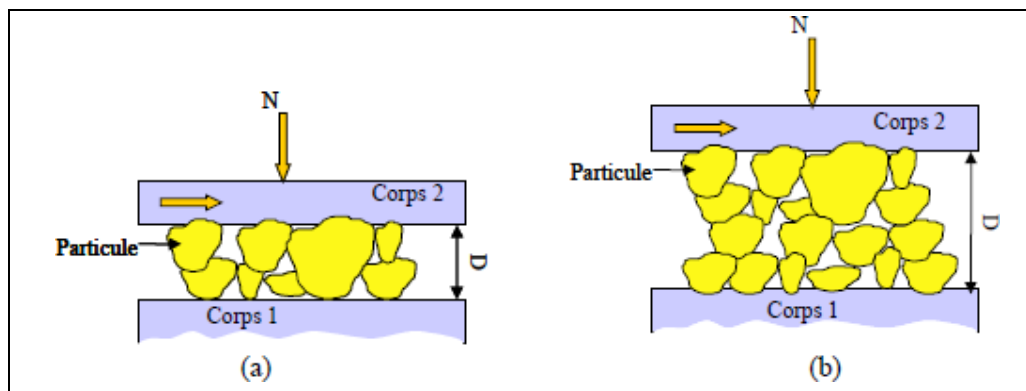


Figure 7 : Abrasion à trois corps fermée : (a)  $D \leq D_{\max \text{ grain}}$  et (b)  $D > D_{\max \text{ grain}}$

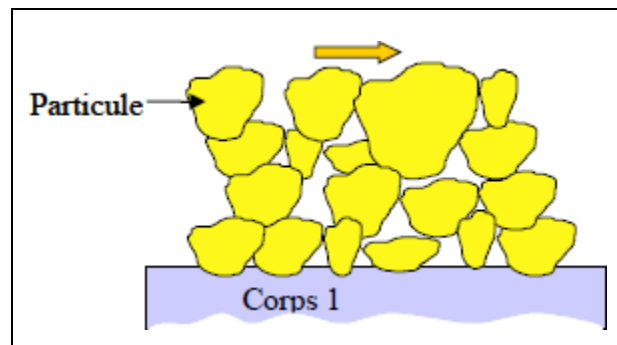
Dans le premier cas  $D \leq D_{\max \text{ grain}}$ , les deux surfaces sont également exposées à l'abrasion et le comportement de chaque surface réagit sur l'autre. L'incrustation de particules dures dans une surface tendre ou leur imbrication dans une surface dure écaillée peut transformer le processus en

une abrasion à deux corps. Le phénomène de broyage peut être aussi observé avec ses effets secondaires sur la sollicitation : élimination des arêtes vives, ou au contraire, formation de nouvelles arêtes actives selon la sollicitation et le mode de fragmentation du grain. Dans cette configuration, les deux surfaces subissent immédiatement les chocs éventuels, qui peuvent les détériorer de façon importante, si le granulats est dur et peu fragile.

Dans le second cas où  $D > D_{\max}$  grain, les propriétés mécaniques d'une surface n'ont plus d'incidence directe sur l'autre, l'abrasion ne peut être localisée que sur une seule des surfaces. Le comportement rhéologique du corps à l'interface devient alors prépondérant.

### Abrasion à trois corps ouverte

Dans le cas de l'abrasion à trois corps, si une seule surface intervient dans le processus de frottement, on parle d'usure abrasive à trois corps ouverte (Figure 8). Ce type de configuration est souvent rencontré dans le cas de matériaux granulaires en contact avec un solide.



*Figure 8: Abrasion à trois corps ouverte.*

### Paramètres du processus d'abrasion :

Les acteurs des processus d'abrasion sont essentiellement :

- Le corps abrasif : l'usure abrasive dépend fortement de la dureté, de la géométrie, de la résistance à l'usure et du mode de fragmentation des abrasifs. En effet, la dureté est importante puisqu'elle détermine l'aptitude physique du grain à rayer un matériau plus

tendre. En revanche, la forme du grain a une influence évidente sur son agressivité en combinaison avec sa dureté. Mais également sa résistance à la rupture qui pourra favoriser l'arrondissement du grain ou au contraire la création de nouvelles arêtes vives selon le mode de fragmentation.

- L'environnement : l'environnement comprend essentiellement l'humidité et la corrosivité du milieu. Les effets de l'humidité sont négligeables, dès que la vitesse d'usure est importante, et concerne un volume du matériau supérieur à celui qui est susceptible d'être modifié, par une oxydation ou un échauffement superficiel. En revanche, si l'intensité de l'usure est faible (abrasion sous faibles charges ou avec des grains fins ou sphériques), les propriétés du milieu et de la couche superficielle sont très influentes,

En milieu chimiquement très agressif, la corrosion peut se superposer à l'abrasion, dont les effets de coupe sont susceptibles de détruire la couche passive éventuelle, la vitesse d'usure dépend alors de la rapidité de passivation du métal dans le milieu et de l'intensité d'abrasion [10].

- La température : la température peut influencer la résistance à l'usure abrasive, et suivant ses effets, une diminution ou augmentation de la résistance. Une température élevée favorisera l'oxydation ou la corrosion, dans certains cas, une couche d'oxyde bien adhérente au métal de base peut le protéger de l'abrasion.

### **Usure adhésive :**

L'usure adhésive fait appel à des notions de physico-chimie. Il y a formation de liaisons (intermoléculaires, interatomiques) à l'interface. On parle d'usure douce lorsqu'on a cisaillement de ces liaisons. L'usure sévère (aussi appelée « grippage ») apparaît lorsqu'il y a arrachement de matière de l'une des surfaces (figure 9). D'où la formation d'un « film de transfert », collée à la surface antagoniste [1].

L'usure par adhérence intervient entre deux surfaces métalliques en mouvement, où le frottement engendré détache de microscopiques fragments de matière, qui agissent comme abrasif (exemple : les paliers lisses [11]).

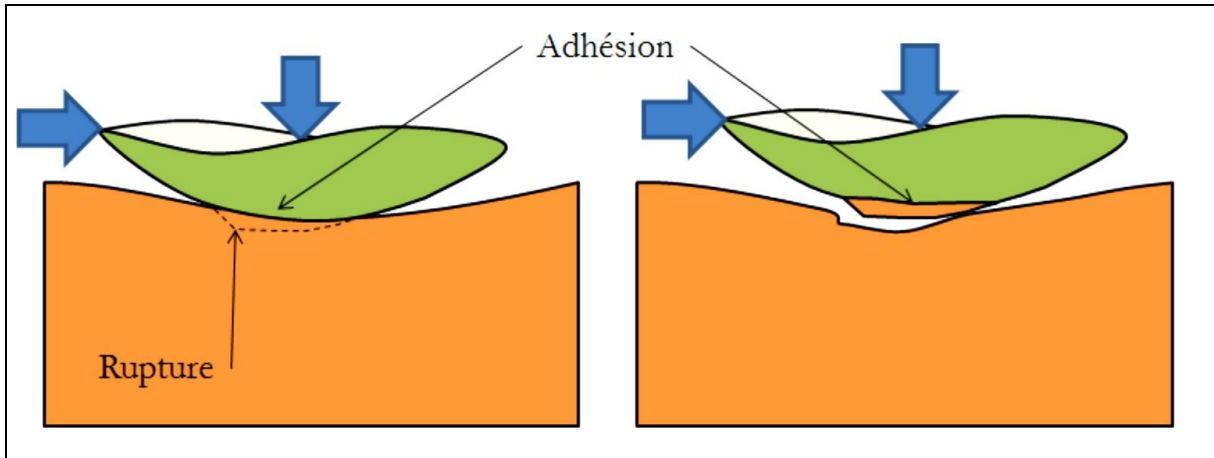


Figure 9: Mécanisme de l'usure adhésive.

### Usure par fatigue :

Il y a formation de fissures dans les matériaux en présence, sous l'effet de gradients de contraintes cycliques. Les fissures se propagent vers la surface et il y a détachement de « grosses » particules dont la taille peut atteindre le millimètre. On parlera particulièrement d'égrènement lorsqu'il y a formation de trous correspondant à la microstructure initiale des matériaux. Il y a « déchaussement » au niveau des joints de grains d'un métal par exemple. On parle de délamination lorsque les déformations plastiques répétées des premiers corps conduisent à des fissures en sous-surface, parallèles à la surface. Il y a propagation des fissures (figure 10) le long du plan de cisaillement maximum [1].

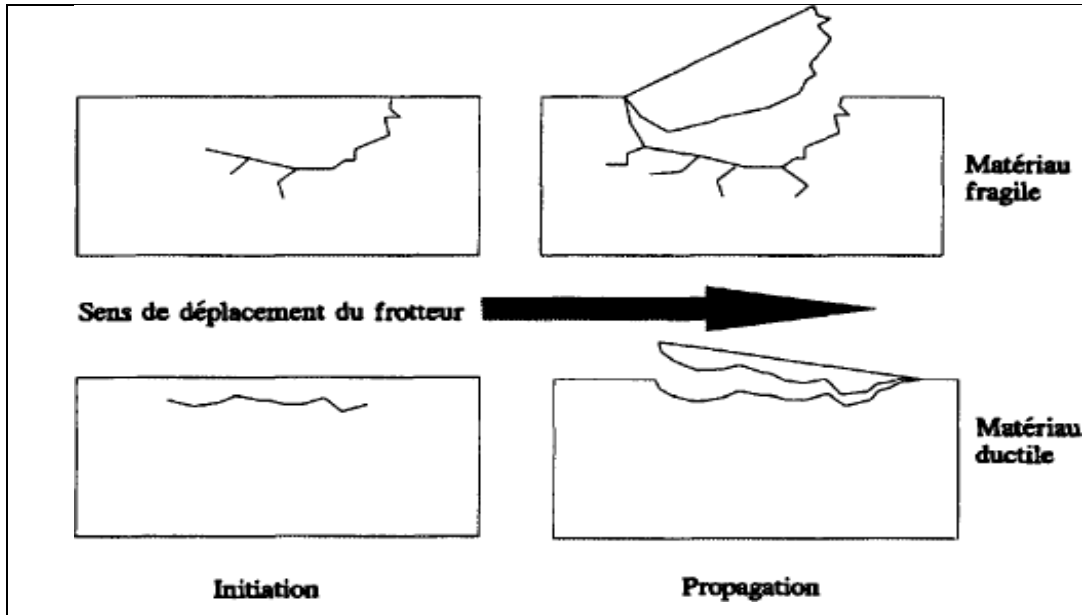


Figure 10: Processus d'usure par fatigue.[3].

### Usure corrosive :

L'endommagement est ici dominé par des réactions chimiques, et les produits de corrosion sont enlevés par action mécanique. Il y a formation de films interfaciaux compactés. [1]

### Lois d'usure

Si l'usure est un phénomène bien identifié, elle n'a en revanche pas d'unité légale puisque ce n'est pas une grandeur physique, mais un phénomène. Elle représente la dégradation d'un contact, entraînant, dans un certain nombre de cas, une perte de fonction. Une étude, datant du XVIIe siècle, sur l'usure des pièces de monnaies écossaises [12] établit une équivalence directe entre perte de masse et perte de fonction. Mais à partir de cette date, très peu de réflexions globales ont été menées sur l'usure, jusqu'au milieu du XXe siècle, date à laquelle Archard [13] proposa une loi d'usure (portant son nom).

Plusieurs formes de la loi d'Archard peuvent être évoquées. La première (originale, issue de l'expérimentation), indique que le volume usé  $V_u$  (c'est à dire le volume perdu par un matériau qui glisse sur un autre) est proportionnel au produit de la distance parcourue  $L$  et de la force normale

$F_n$  appliquée au contact :  $V_u = a.F_n .L$  Une seconde forme fait intervenir la nature du matériau le plus mou par l'intermédiaire de sa contrainte d'écoulement  $\sigma_y$  et la surface  $S$  du contact :  $y_n u F .S V b. \sigma = 19$  Une forme dérivée de la première loi fait intervenir l'énergie dissipée dans le contact par le biais du produit  $PV$  (pression x vitesse de glissement), proportionnel à la vitesse d'usure  $dh/dt$  ( $h$  étant la profondeur de la piste d'usure).  $c.P.V dt dh =$  où  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont des coefficients de calage. Mais cette loi plus générale, essentiellement théorique, s'applique difficilement à la réalité des contacts dans leur diversité. La loi d'Archard sera par la suite adaptée de diverses façons par différents expérimentateurs pour coller aux expériences particulières qui les concernent. Meng et Ludema [14] citent plus d'une centaine de lois d'usure dont une grande partie sont adaptées de la loi d'Archard. On peut être frappé par la grande variété de ces lois, mais aussi par le nombre de variables en présence : on en recense près de 600, dont une centaine apparaissent comme des paramètres réellement indépendants. Certains même, comme le module d'Young d'un matériau, apparaissent d'une loi à l'autre tantôt au numérateur tantôt au dénominateur. Après un test d'usure, il est toujours possible de trouver une fonction qui corrèle plusieurs paramètres. Mais les paramètres utilisés sont fonction des moyens d'investigations disponibles et de la culture des chercheurs.

la définition d'une surface de contact n'a pas de sens tant que l'on ne différencie pas une surface apparente (au sens de Hertz [15]) et une surface réelle (puisque ce sont souvent les débris d'usure qui supportent effectivement la charge), l'évaluation du « volume usé » pour caractériser l'usure est entièrement dépendante de la façon dont on nettoie la piste de frottement après un essai, etc. Ce qui peut expliquer que la tribométrie ait donné lieu à des corrélations entre paramètres qui ne sont « ni généralisables ni prédictives » [16]. Pour Meng et Ludema, ces lois apparaissent « si confuses que peu de concepteurs peuvent utiliser l'une ou l'autre [...] avec confiance » [14]. Parmi celles-ci, on distinguera les lois théoriques (dérivées directement de la mécanique des contacts et de la loi d'Archard) et les lois empiriques (comme celle de Barwell [17] qui sont bien plus précises que les équations théoriques pour un type de test donné, mais qui sont valables seulement pour ce type de test [1]).

## **Les paramètres qui influent sur le taux d'usure et le frottement**

### **La force de contact**

- Les conditions opératoires : la charge, la température, la vitesse, la pression.
- L'aire de contact.
- L'état physico-chimique des surfaces frottantes (la rugosité, les couches d'oxydes).
- Les propriétés mécaniques des matériaux (dureté).
- L'absence ou la présence d'un lubrifiant [18].

### **Paramètres fonctionnels**

Pour caractériser une situation tribologique, il importe dans un premier temps, d'identifier les différents contacts et d'extraire les variables opérationnelles qui définissent le fonctionnement de chaque contact.

### **Mode de contact**

Il s'agit de définir la nature et la géométrie du contact. Ces informations participeront à l'évaluation du champ de contraintes imposé au contact. Par nature du contact on entend la définition générale de ce qui constitue le contact : solide/solide, liquide/solide, liquide + particules/solide, liquide + vapeur/solide...La géométrie du contact caractérise la forme des surfaces qui limitent les solides au voisinage de la zone de contact. On définit trois types de contacts :

- Les contacts de type ponctuel.
- Les contacts linéiques.
- Les contacts surfaciques.

### **La charge du contact**

Il s'agit de déterminer le torseur dynamique, c'est-à-dire l'ensemble des forces et moments auquel est soumis le contact. La charge et la manière dont elle est appliquée permettent d'évaluer la nature et le niveau des contraintes auxquelles les couches superficielles sont soumises. La



connaissance du champ de contrainte en profondeur est nécessaire pour justifier quantitativement la nature, la qualité et l'épaisseur des traitements ou revêtements de surface pour évaluer les risques de fatigue de contact.

### **La vitesse du contact**

Ce paramètre consiste à préciser les différents éléments du torseur cinématique (ensemble des vitesses et moments cinétiques) appliqué au contact, c'est -à-dire la nature et la cinématique du mouvement. Suivant l'orientation des composantes de ce torseur au niveau du contact, le déplacement pourra s'effectuer en roulement, glissement ou pivotement. La vitesse contribue à l'énergie dissipée dans le contact. Elle est aussi l'un des facteurs intervenant dans l'évaluation de la durée de vie des surfaces, combinée au temps de fonctionnement, elle permet le calcul de la distance à parcourir [18].

### **Procédure expérimental**

#### **Objectif**

Dans cette étude et afin d'évaluer l'effet de charge/température d'injection sur le comportement tribologique du matériaux AlSi12 nous avons effectué des tests d'usure sous les mêmes conditions empiriques.

#### **Matériaux d'étude**

L'aluminium et ses alliages occupent une place favorisée comme matrice de composites pour l'industrie du transport et les pièces travaillantes en mouvement. Cette place revient à son mélange agréable de propriétés, comme un faible poids, une résistance à la corrosion, un entretien facile du produit final, un rapport résistance / poids élevé, un faible coût et une résistance élevée à l'usure. En particulier, l'alliage d'aluminium AlSi12 est beaucoup plus utilisé en raison de ses propriétés supplémentaires comme la capacité de coulée et la résistance à la corrosion élevée.

#### **Préparation des échantillons**

La préparation d'échantillon destiné à notre étude subit d'abord une découpe par une tronçonneuse de type Mecatone T210 (figure11).



(a) Troçonneuse



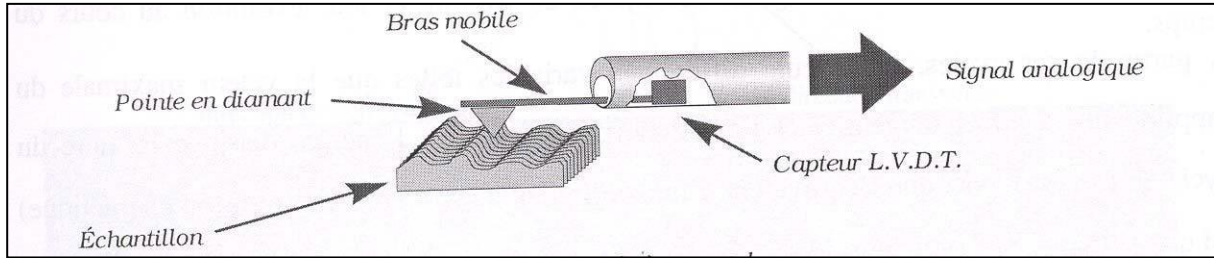
(b) Echantillons d'étude

*Figure 11: photos de la troçonneuse (a) et les échantillons d'étude.*

La préparation de la surface consiste à réaliser un polissage au moyen des papiers abrasifs de granulométrie 800 jusqu'à 4000, en utilisant une polisseuse (figure 12), jusqu'à l'obtention de l'aspect miroir. Finalement, les échantillons (figure 11.b) sont nettoyés par l'alcool puis séchés à l'air, puis on fait la vérification de la rugosité qui doit être  $R_a < 1 \mu\text{m}$  en utilisant un rugosimètre tactile (figure 13).



*Figure 12: Polisseuse*



**Figure 13:Rugosimètre tactile.**

## **L'essai tribologique**

### **Dispositif expérimental Le tribomètre :**

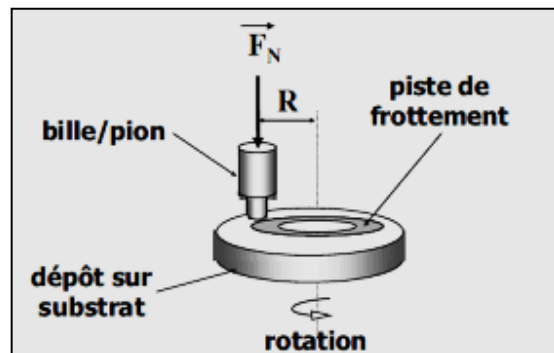
Les essais de frottement ont été réalisés sur un tribomètre de type Bille-Disque et Pion-Disque « modèle TRB6-S-DE-0000, Marque CSM Instrument » dans laboratoire d'ENSMM-Annaba. Il est destiné à étudier la tenue à l'usure des surfaces soumis aux frottements, ce dispositif possède deux mouvements possibles, un mouvement alternatif et un mouvement de rotation (figure). 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. Les propriétés tribologiques d'usure (mouvement rotatif) , pour les différents échantillons ont été évaluées sur le système TRB6-S-DE-0000 à l'air libre, avec une température de 30-35 °C sans lubrifiant. La bille d'acier 100C6 dont les caractéristiques sont : diamètre de 6 mm, dureté 832 Hv a été choisie comme antagoniste, pour éviter des réactions chimiques supplémentaires.



*Figure 14:Appareil de tribomètre TRB.*

**Le principe :**

Un tribomètre (figure 15) est un instrument qui permet de mesurer des paramètres tribologiques, telles que le frottement et l'usure, de manière contrôlée et reproductible. Son concept est basé sur la reproduction simplifiée d'un contact et l'interaction de deux surfaces dont les caractéristiques sont représentatives de systèmes plus complexes [19].



*Figure 15: Schéma de principe des analyses.*

**Les étapes de manipulation :**

On place l'échantillon sur le tribomètre et on fixe la bille puis on introduit les paramètres nécessaires : charge, vitesse et distance.

Les paramètres opératoires des essais tribologiques effectués sur les dépôts sont précisés dans le tableau 1 :

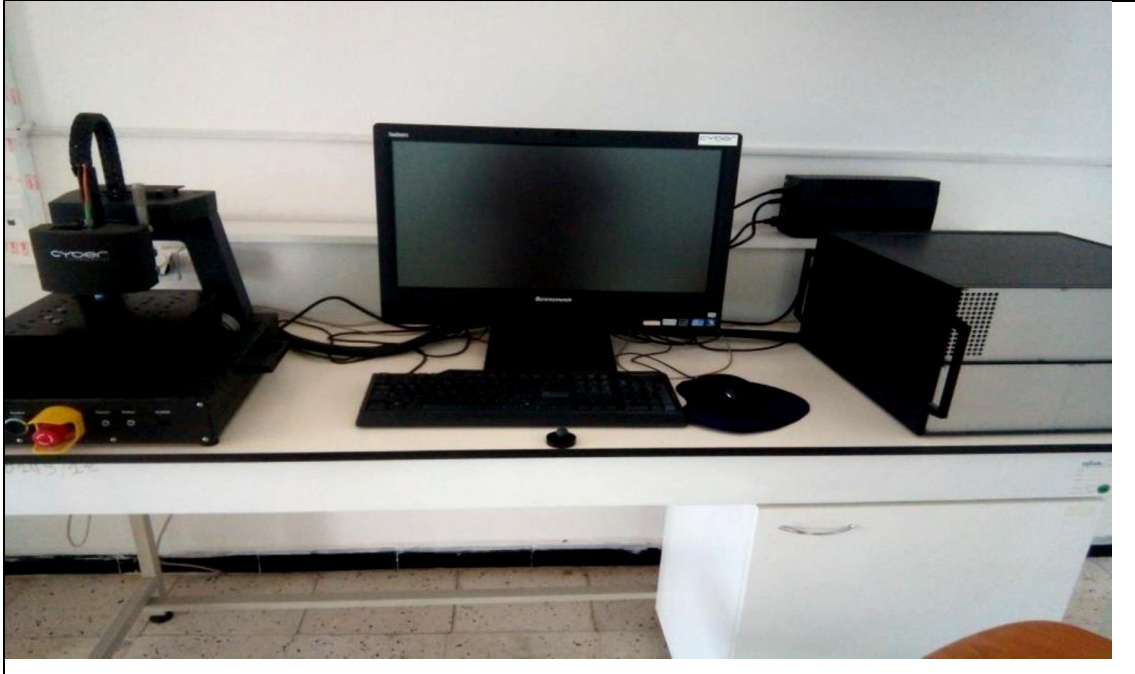
*Tableau 1: Paramètres des essais tribologiques*

Paramètres	Echantillon 1 , 2 , 3
Bille	Acier 100C6
Force normale	10 N
Vitesse linéaire	2,00 cm/s
Distance	50,00 m
Rayon	2,40 mm
Température	Ambiante (25°C)
Atmosphère	Air atmosphérique

### **Caractérisation de l'usure**

#### **Par profilomètre 2D et 3D**

Les dimensions des traces d'usures ont été déterminées quantitativement par une technique d'acquisition de la topologie de surface sans contact afin de préserver la surface usée et obtenir une bonne résolution. L'équipement est un profilomètre de type **CT 100** (Figure 16) utilisant le logiciel **SCAN SUITE 8**.



*Figure 16:Appareillage d'un profilomètre 2D et 3D.*

Une fois la topologie enregistrée, des représentations 2D et 3D sont possibles.

On peut ensuite extraire les dimensions 2D ou 3D de la trace d'usure. La hauteur et la largeur de la trace d'usure, sont mesurées à partir de profils 2D, et la moyenne des deux donne un diamètre équivalent associé à cette trace. Dans le cas 3D, le volume est calculé, par le logiciel utilisant la méthode des moindres carrés dans une surface définie par l'opérateur encadrant la trace d'usure.

### **MEB couplé avec EDS**

Le microscope électronique à balayage (MEB) permet de caractériser la microstructure d'un matériau. Il est couplé à une microsonde EDS (X-ray energy dispersive spectrometry) qui donne accès en complément à la composition chimique par analyse élémentaire.

En effet cet instrument repose sur l'interaction des électrons avec la matière. Le microscope électronique à balayage possède deux types de détecteurs : Un détecteur d'électrons rétrodiffusés et un détecteur d'électrons secondaires qui permet respectivement d'obtenir des informations sur la

## **Etude des propriétés tribologiques d'un alliage AS12 moulé sous pression**

---

composition et sur la topographie des échantillons analysés. L'analyse topographique et les informations concernant les échantillons seront fournies grâce aux électrons secondaires et des électrons rétrodiffusés.

Les observations ont été réalisées à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) de référence JSM5800LV, JEOL, Japon représenté sur la figure 17 dans le but d'avoir une meilleure approche de caractérisation microstructurale des échantillons notamment les types d'usure.



*Figure 17: Microscopie électronique à balayage MEB couplé avec EDS*

### **La microdureté :**

Les essais de dureté ont été réalisés en utilisant un duromètre de type INNOVA TEST Vickers (figure 18) qui consiste à appliquer sur la surface de l'échantillon « plane et polie » une force constante de 200 gf (dans notre essai) à l'aide d'un pénétrateur de forme pyramide en diamant à base carrée. L'empreinte présente donc la forme d'un carré et d'angle au sommet entre faces égal à  $136^\circ$  (figure 19).

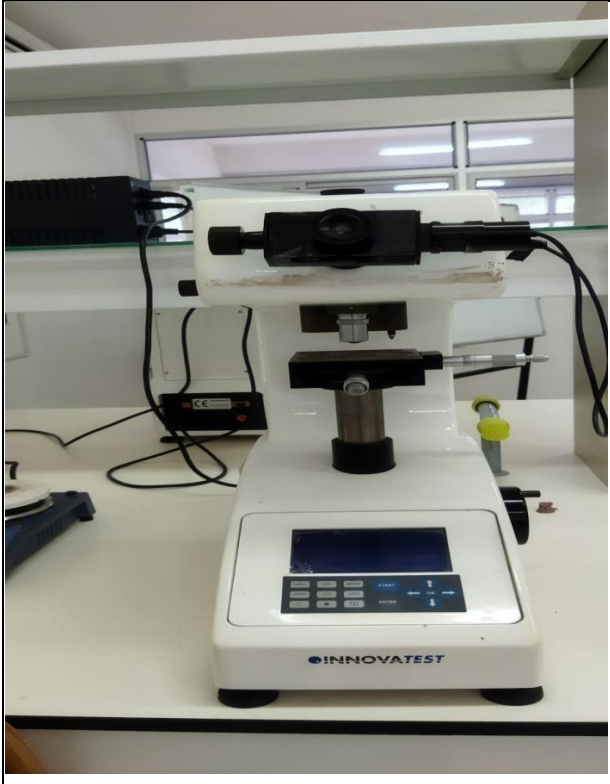


Figure 18: Duromètre

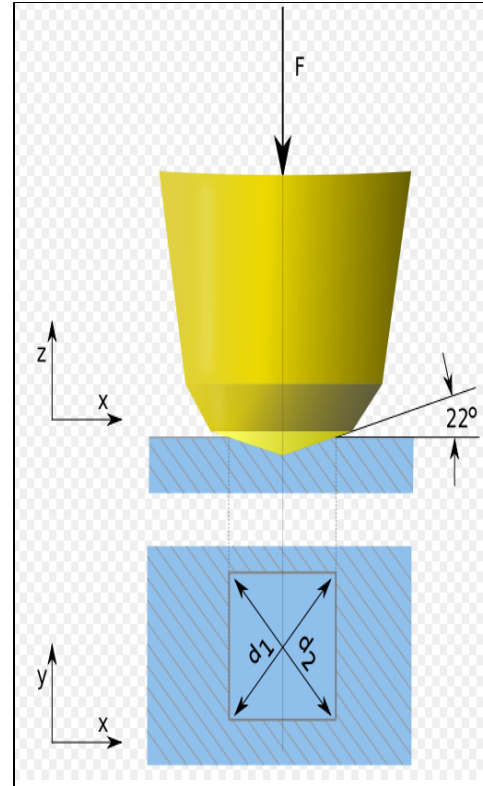


Figure 19: Principe de la dureté Vickers



# Chapitre II

## Résultats et discussion

## Chapitre II. : Résultats et discussion

### Introduction

Ce chapitre sera consacré à la présentation des principaux résultats obtenus des tests tribologique et la caractérisation de la piste d'usure pour connaitre leurs mécanismes. L'alliage AlSi12 coulé sous pression est mis sous une grande charge de l'ordre de 10N à trois températures différentes d'injection 580°C, 650°C et 700°C. Pendant notre étude, les échantillons d'alliage AlSi12 coulés à ces trois températures sont appelés 1, 2, et 3 respectivement pour plus de simplification.

### Coefficient de frottement et taux d'usure

L'évolution de coefficient de frottement en fonction du temps ou la distance et l'estimation de taux d'usure ont été obtenus à l'aide d'un logiciel des traitements des données associées au tribomètre.

La Figure 20 montre l'évolution du coefficient de frottement (CDF) en fonction de la distance de glissement pour les échantillons 1, 2 et 3. Au cours de l'essai, ces courbes de frottement mettent en évidence des comportements en frottement globalement similaire.

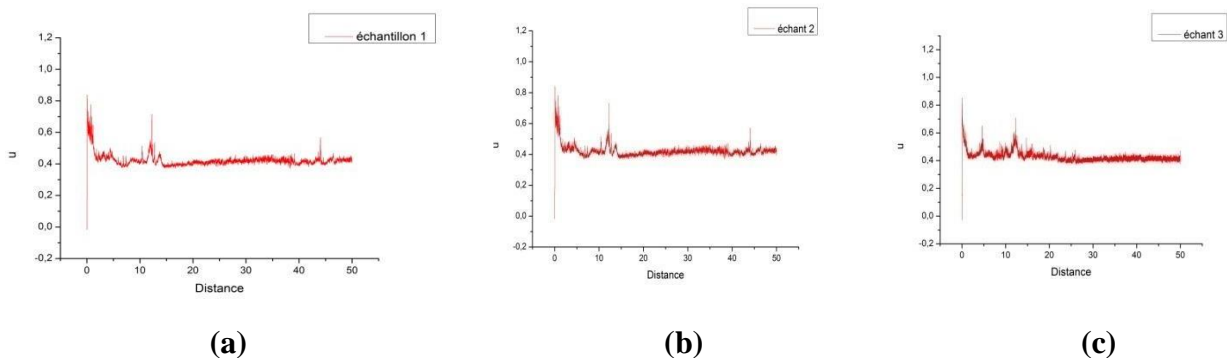


Figure 20: l'évolution du coefficient de frottement en fonction de la distance en mètre de l'échantillon 1, 2 et 3.

#### Pour l'échantillon 1 et 2 :

Une forte fluctuation de coefficient de frottement s'apparait au début de l'essai jusqu'à 3m de frottement causé par l'endommagement de matière. Puis il diminue légèrement à cause d'élimination des débris d'usure de la piste par l'effet de charge et du mouvement et puis une autre

fluctuation apparaît à 12 m. Puis la valeur de coefficient de frottement se stabilise jusqu'à 44m de frottement. C'est la période de stabilisation où le système tribologique atteint son équilibre et le coefficient de frottement tend à une valeur moyenne appelée coefficient de frottement dynamique moyen.

### **Pour l'échantillon 3 :**

Dans la première période de l'essai, on observe une augmentation linéaire rapide du coefficient de frottement d'une valeur nulle à une valeur de 0.8 lors des 3 premiers mètres et puis d'autres fluctuations plus légères que la première, ceci est due à l'endommagement de la surface et l'enlèvement de matière de surface sous forme des débris. Puis au bout de 15 m, il atteint un palier qui peut aller jusqu'à la fin de l'essai c.-à-d. jusqu'à 50 m. c'est la période de stabilisation ou le système tribologique atteint son équilibre et le coefficient de frottement tend à une valeur moyenne appelée coefficient de frottement dynamique moyen ce qui est symptomatique d'un état relativement stable. Cela est expliqué par la déformation plastique des aspérités et l'augmentation de la surface de contact lorsque la bille en acier glisse sur la surface.

### **Comparaison des résultats :**

Des diagrammes comparatifs sont donnés sur les figures 21, et 22 qui représente l'estimation du coefficient de frottement, et de la dureté Vickers des échantillons coulés aux différentes températures.

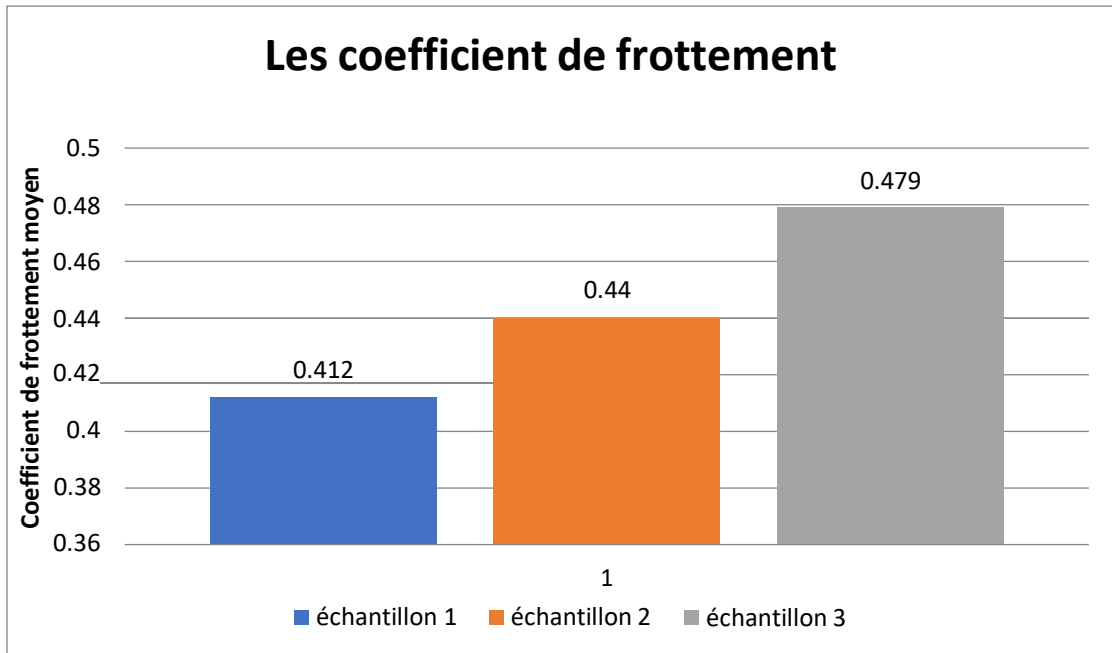


Figure 21: Coefficient de frottement des échantillons.

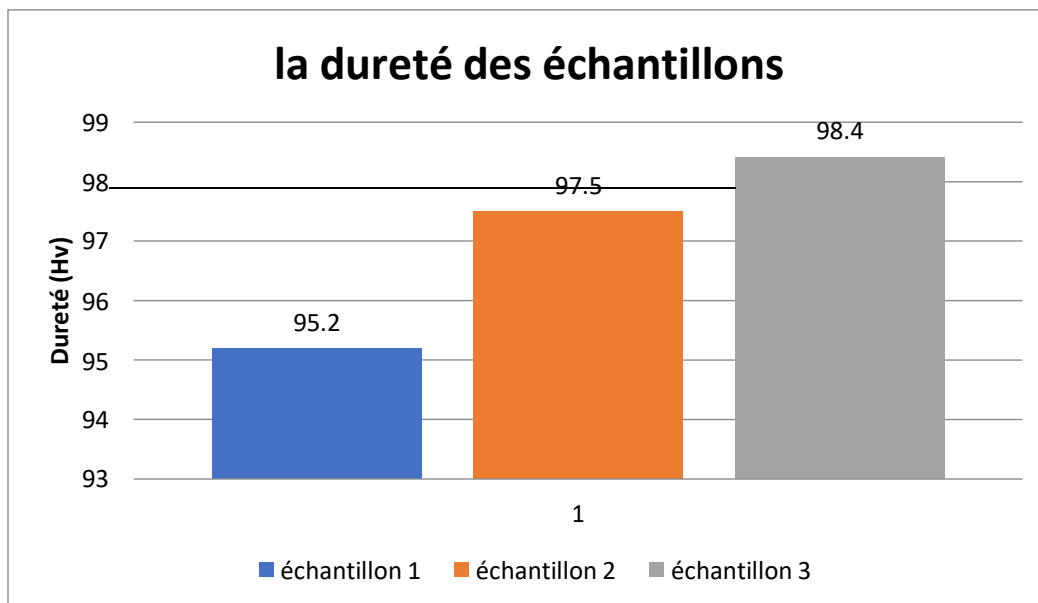


Figure 22: La dureté Vickers des échantillons.

La figure 21 montre l'évolution du coefficient de frottement des trois échantillons 1, 2, et 3, dans laquelle, on observe que l'échantillon 1 à un coefficient de frottement plus grand que celui de l'échantillon 2 et 3 et l'échantillon 2 a un coefficient de frottement plus grand que l'échantillon 3.

Ceci est expliqué par la différence de dureté et l'augmentation des aspérités en contact de deux corps (entre la bille est la surface de l'échantillon), c'est-à-dire l'augmentation de la surface réelle. Une dureté importante se traduit souvent par un coefficient de frottement plus élevé.

Les résultats comparatifs des trois échantillons avec le taux d'usure calculés par le tribomètre selon une fonction théorique bien déterminée, sont résumés dans le tableau 2au-dessous

*Tableau 2: Coefficient de frottement, dureté Vickers et le taux d'usure pour les trois échantillons.*

	<b>Echantillon 1</b>	<b>Echantillon 2</b>	<b>Echantillon 3</b>
<b>Le coefficient de frottement moyen</b>	<b>0.412</b>	<b>0.440</b>	<b>0.479</b>
<b>Dureté (HV)</b>	<b>95.2</b>	<b>97.5</b>	<b>98.4</b>
<b>Le taux d'usure (mm<sup>3</sup>/Nm<sup>-1</sup>)</b>	<b>1.338*10<sup>-3</sup></b>	<b>1.14*10<sup>-3</sup></b>	<b>2.534*10<sup>-3</sup></b>

A partir des calculs représentés sur le tableau, nous pouvons confirmer que la dureté de l'alliage est expliquée par la grande température d'injection, ce qui n'entraîne pas l'amélioration du comportement tribologique sous charge.

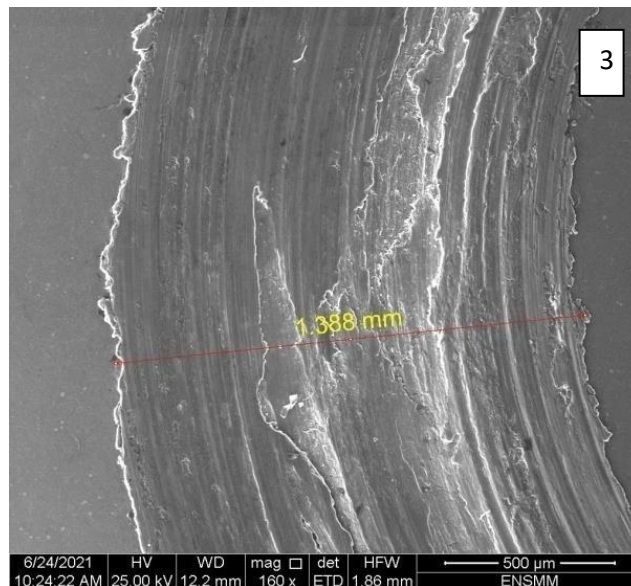
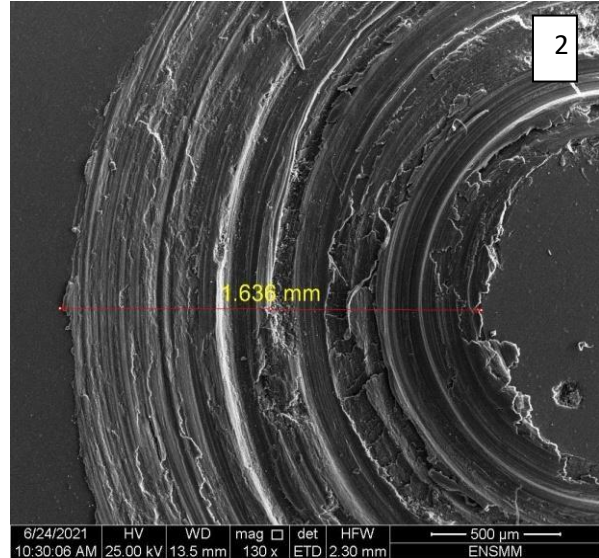
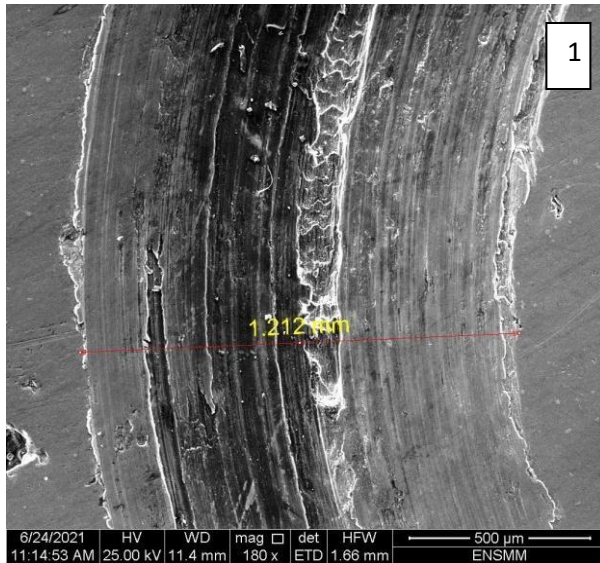
### **Caractérisation de la piste d'usure**

Les mécanismes d'usure peuvent dépendre à la fois des conditions d'essai et des matériaux utilisés. Afin d'apporter des informations supplémentaires, une analyse microscopique (MEB) a été réalisée sur les faciès des échantillons.

Les Micrographies MEB qui sont données à la figure 23 montrent tous des sillons d'usure, qui ont des tailles et des aspects différents. La largeur de la piste d'usure pour les trois échantillons est récoltée au tableau N°3 suivants.

*Tableau 3: La largeur de la piste d'usure pour les trois échantillons.*

Echantillon	T1	T2	T3
Charge	10N	10N	10N
Moyenne de largeur des traces d'usure (µm)	1182,83667	1431,9633	1226,15667



*Figure 23: Micrographies MEB des traces d'usure des échantillons 1, 2 et 3.*

Les observations au microscope électronique à balayage ont été faites sur la surface après l'essai de tribologie à partir d'une charge de 10 N et sur une distance de 50m des échantillons étudiés. Les surfaces usées de l'alliage AS12 coulé sous pression à des températures différentes montrent des déformations plastiques sévères. Nous observons des sillons d'usure abrasive orientés dans le sens du parcours avec longueurs variables ; l'échantillon 3 illustre qu'il est fortement perturbé par la présence à la fois de creux et de bosses, ce qui reflète une déformation plastique très grande qui correspond à un arrachement de matière.

### **Profil 2D,3D des échantillons étudiés**

Pour l'estimation des dimensions de la trace d'usure, on utilise la méthode de profilomètre 2D et pour avoir la topographie, on utilise généralement un profilomètre 3D. Les profils 2D ,3D de nos échantillons1, 2, et 3 sont représentés en dessous respectivement :

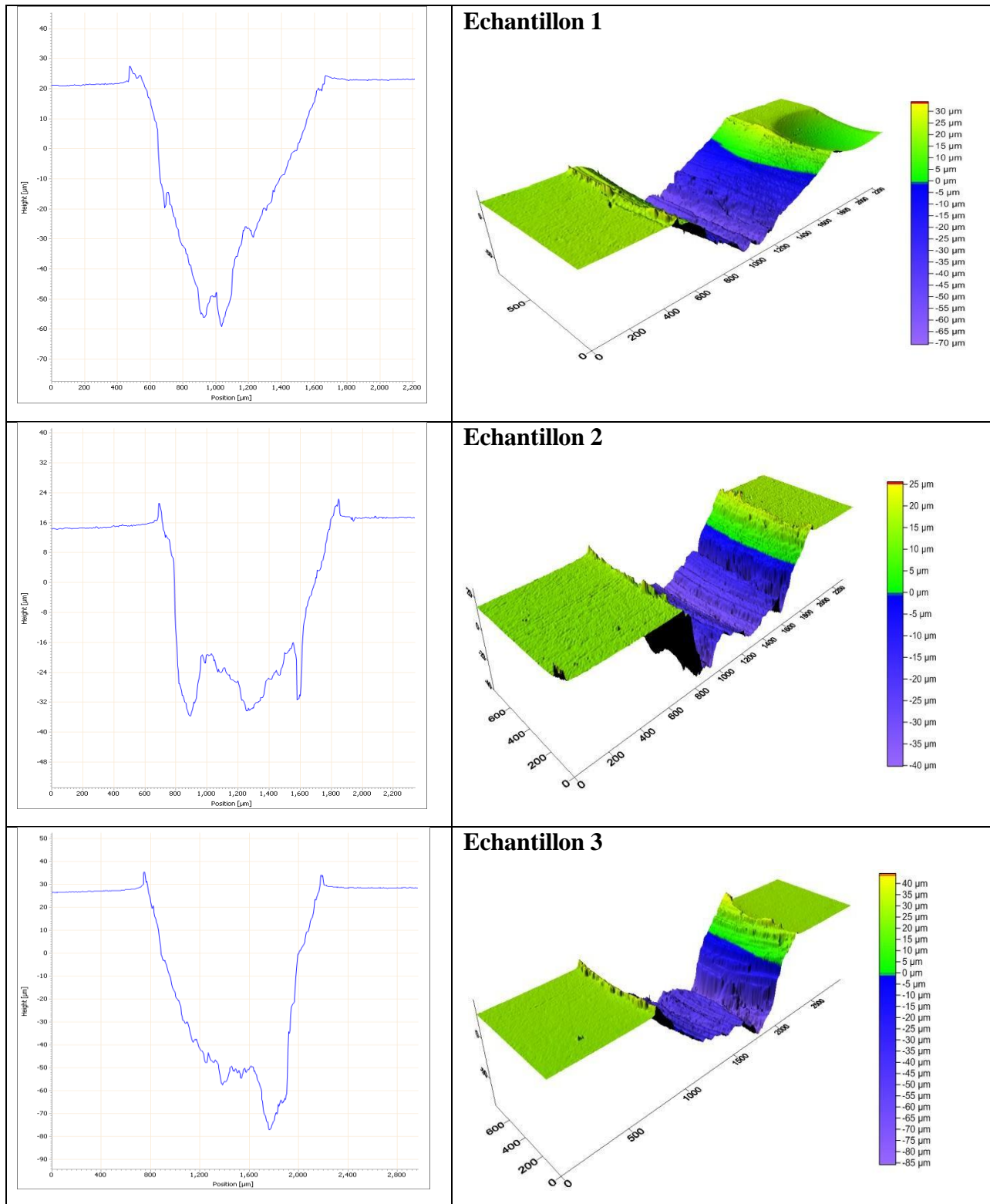


Figure 24: Profil 2D ,3D des trois échantillons.



Nous avons procédé à partir de ces profils 2D à estimer le taux d'usure pour chaque échantillon et qui est présenté dans la figure 25 suivante :

Le volume usé des trois échantillons 1, 2, et 3 est calculé à partir du profil 2D de chaque échantillon. La profondeur d'usure des échantillons 1, 2 et 3 est mesurée approximativement et de l'ordre  $70\mu\text{m}$ ,  $48\mu\text{m}$ ,  $80\mu\text{m}$  alors que les aires négatives sont et de l'ordre de  $38865.79\mu\text{m}^2$ ,  $37905.13\mu\text{m}^2$ , et  $57118.94\mu\text{m}^2$ . Les taux d'usure en se basant sur le profil 2D sont calculés à partir de la loi d'Archard [13] et sont respectivement :  $0.001172\text{ mm}^3/\text{N.m}$ ,  $0.001143\text{ mm}^3/\text{N.m}$ , et  $0.001722\text{ mm}^3/\text{N.m}$ .

Ceci montre évidemment que les mesures d'usure de l'alliage AS12 fait par le logiciel du tribomètre n'enregistrent pas un grand écart par rapport à ceux calculés à partir des profils 2D.

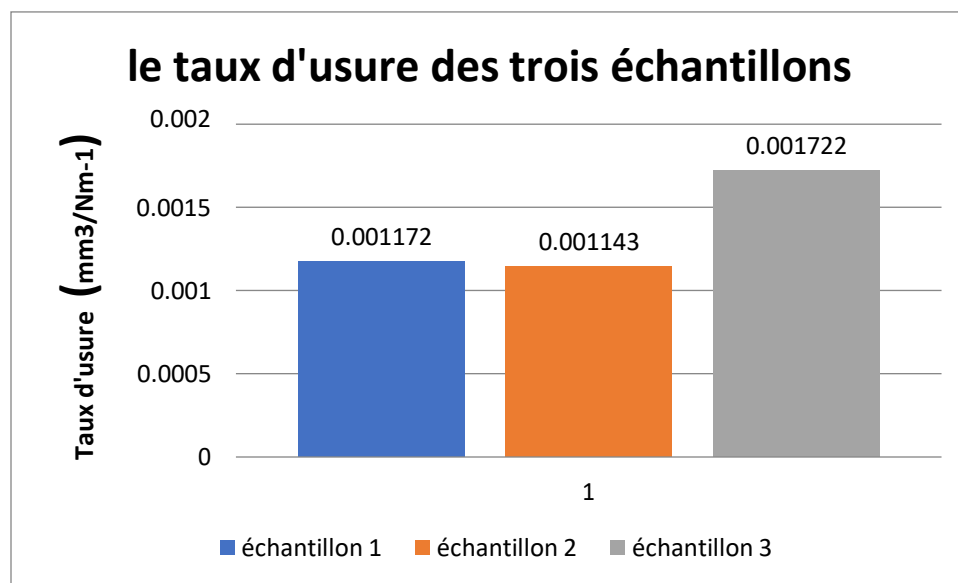


Figure 25: Le taux d'usure des trois échantillons.

D'après les résultats montrés sur la figure 25, on remarque que l'échantillon 3 a subi une usure plus agressive et une dégradation importante que l'échantillon 1 et 2. On peut aussi voir que la trace d'usure est bien large et plus profonde (d'après le profil 2D) pour l'échantillon 3 et puis 2 et enfin l'échantillon 1. Donc l'échantillon 3 a subi une perte volumique plus grande, ce qui explique le taux d'usure grand de cet échantillon par rapport aux échantillons 2 et puis 1.

Donc, on peut conclure que l'échantillon 3 (température d'injection la plus élevée) présente une moindre résistance à l'usure sous une grande charge associable à sa micro dureté supérieure.

Archard, dans son travail sur l'usure, à assumer que la croissance de la dureté augmente la résistance à l'usure, mais cette suggestion n'est pas valide tout le temps. Donc, cette suggestion de la quantité proportionnelle, par rapport à la charge appliquée et le taux d'usure, ne se trouve pas en concordance à chaque fois dans le phénomène de l'usure par glissement [20].

### Conclusion Générale

La demande industrielle pour l'amélioration de la résistance aux frottements et à l'usure de pièces, tant mécaniques que de structure, est en constante croissance depuis plus de 20 ans. Elle se justifie notamment par la volonté de réduire les pertes considérables liées aux phénomènes de frottement/usure.

Ce travail est consacré à une étude comparative du comportement tribologique de l'alliage AlSi12 à températures d'injection différentes mis sous une charge de 10 N pour permettre d'évaluer leur influence sur les propriétés tribologiques tels que la résistance à l'usure, et le frottement :

A travers cette étude, plusieurs points sont à dégager :

- Le coefficient de frottement augmente avec l'augmentation de la dureté.
- La résistance à l'usure de l'alliage AlSi 12 coulé à une température d'injection de l'ordre de 650 C° est meilleure que celles coulées à température de 580 C°, et 700 C° (échantillon 1,3) respectivement. Ce résultat est la conséquence directe du changement microstructurale.
- Une analyse des traces d'usure nous a montré que le type d'usure dominant est une usure abrasive.

### Références

- [1] Fillot ,N .(2004). Etude mécanique de l'usure « Modélisation par éléments discrets des débits de troisième corps solide » ( Thèse de doctorat , L'Institut National des Sciences Appliquées , Lyon ).
- [2] Delqué, M. (2007). Influence de la microstructure sur le comportement tribologique de dépôts composites projetés plasma (Thèse de doctorat).
- [3] Cachon .L.(1995).Etude tribologique de revêtements durs sans cobalt destinés aux organes d'isolement du circuit primaire des REP (Thèse de doctorat ,Université Bordeaux I,Bordeaux)
- [4] Bouhelal, N. (2016). Etude des propriétés tribologiques des cermets à base de WC infiltrés par un alliage de cuivre (Thèse de doctorat).
- [5] Brunetière, N. (2016). Introduction à la tribologie. Institut Pprime-futuroscope.
- [6] Yan-Ming, C. H. E. N., & RICHARD, C. (2011). Tribomètres et essais tribologiques.
- [7] <https://elearning.univ-bejaia.dz/>
- [8] Brunetiere.N.(2016).Introduction à la tribologie(Institut Pprime-Futuroscope)
- [9] Mezlini .S.(2003).Etude de l'usure par abrasion d'alliages d'aluminium(Thèse de doctorat ,Ecole Centrale ,Lyon).
- [10] Avery, H. S.(1977). Classification and precision of abrasion tests, Wear of Materials (ASME).
- [11] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Usure\\_des\\_surfaces](https://fr.wikipedia.org/wiki/Usure_des_surfaces)
- [12] Dowson.D.(1998).History of tribology,2nd edition,Londres et Bury St Edmonds, Professional Engineering Publishing,UK.
- [13] Archard.J,F.(1953).Contact and rubbing of flat surfaces.J.Appl.Phys.
- [14] Mengh.C., LUDEMA K.C.(1995). Wear models and predictive equations: their form and content. Wear.

## Références

---

- [15] Johnson K.L.(1985). Contact Mechanics. Cambridge : Cambridge University Press.
- [16] Berthier.Y.(2004). Third Body reality. Consequences and use of the third body to solve the friction and wear problem. In : Stachowiak G. Wear, Material, Mechanisms and Practice.
- [17] Barwell. F.T.(1957) Wear of metals. Wear.
- [18] Ammam, D., &Hamidi, Y. (2015). Conception d'un dispositif de type abrasimètre par la méthode de l'analyse de la valeur (Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri Tizi- Ouzou)
- [19] Palvik.A.(2020). Etude de l'influence d'un traitement DUPLEX sur les propriétés tribologiques d'un acier AISI 316LM(Thèse de doctorat,Université de Lorraine)
- [20] Subramanian. C.(1992). Some considerations towards the design of a wear resistant aluminum alloy,wear 155.