



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE 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 de l'influence de la température
d'injection sur les propriétés tribologiques
d'un alliage AlSi12**

Présenté par : **MEFTAH Souad**

Encadré par : **Dr. TAIBI Yasmina**

Jury de Soutenance

BENOUDIA Mohamed Cherif

Pr, ENSMM

Président

BENDJEDDOU Louiza

MCB, ENSMM

Examinatrice

Juin 2021



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie

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. **MEFTAH Souad** à déposer son mémoire de Master après avoir apporté
les corrections signalées par les membres du jury.

Avis du Promoteur :
Favorable

Avis de l'Examineur :

30/09/2021

Président du Jury
Pr Mohamed Cherif BENOUDIA



Dédicace

À celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne

éducation et ses dévouements

À ma chère mère

À celui qui s'est consacré pour m'assurer les bonnes conditions,

je dédie ce modeste travail

À mon cher père

À ma petite famille qui m'a toujours soutenue

À tous mes collègues et amis

Souad

Remerciements

Je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de Dr. TAIBI Yasmina, je la remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant ma préparation de ce petit mémoire.

Je tiens à remercier les membres de jury, monsieur BENOUDIA Mohamed Cherif pour avoir accepté d'être le président de mon jury, et à la vénérable Mme BENDJEDOU Louiza pour avoir accepté d'examiner mon mémoire.

Un grand merci à l'équipe de laboratoire SGM de l'ENSMM, à la généreuse Mme Zeddouri Hakima qui n'a jamais hésité à donner de l'aide, aux sympathiques Mme Lynda, Wafa, et messieurs Hichem et Moustafa. J'avais vraiment l'honneur de travailler avec vous.

J'adresse mes remerciements à tous les enseignants que j'ai connus pendant mon cursus.

Enfin je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Résumé :

L'alliage AlSi12 qui fait l'objet de cette étude, est très employé dans des diverses applications de l'industrie automobile. La microstructure et les propriétés de cet alliage sont définis par plusieurs facteurs parmi lesquels le mode de coulée. Notre contribution alors a comme but principal de trouver un bon compromis entre le comportement tribologique et la température d'injection de moulage sous pression à chambre froide de l'alliage AS12.

On a soumis les échantillons coulés sous pression à trois températures d'injection différentes aux essais normalisés pour une étude sur les propriétés mécaniques (dureté HB) et les propriétés tribologiques d'alliage Al-Si eutectique par tribomètre. Enfin, les analyses par microscopie optique et électronique à balayage des échantillons ont été étudiées pour confirmer les résultats obtenus.

Mots-clés : AS12, MEB, usure, coefficient de frottement, température d'injection.

Abstract:

The AlSi12 alloy which is the subject of this study is widely used in various applications in the automotive industry. The microstructure and properties of this alloy are defined by several factors among which the casting mode. Our contribution then has as main goal to find a good compromise between the tribological behavior and the cold chamber die casting temperature of the AS12 alloy.

The die-cast samples at three different injection temperatures were subjected to standard tests for a study of mechanical properties (HB hardness) and tribological properties of eutectic Al-Si alloy by tribometer. Finally, optical and scanning electron microscopy analyses of the studied samples to confirm the obtained results.

Keywords: AS12, SEM, wear, friction coefficient, injection temperature.

الملخص :

تستخدم سبيكة AS12 التي هي موضوع هذه الدراسة ، على نطاق واسع في العديد من التطبيقات صناعة السيارات ويتم تحديد البنية المجهرية و خصائص هذه السبيكة بعدة عوامل ، بما في ذلك طريقة الصب. الهدف الرئيسي لإسهاماتنا إذن هو إيجاد حل وسط جيد بين السلوك الترابيولوجي ودرجة حرارة الحقن لقلب الصب بالغرفة الباردة للسبائك AS12. تم إخضاع العينات المصبوبة في ثلاث درجات حرارة مختلفة لاختبارات معيارية لدراسة الخواص الميكانيكية (صلابة HB) و الخصائص الترابيولوجية لسبائك AS12 بواسطة جهاز قياس الترابيوميتتر. أخيرًا تم إجراء التحاليل بواسطة المجهر الضوئي والمسح الإلكتروني للعينات المدروسة لتأكيد النتائج التي تم الحصول عليها.

الكلمات المفتاحية: AS12، MEB، البلى ، معامل الاحتكاك ، درجة حرارة الحقن.

Tables des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Partie théorique.....	2
I- Généralités sur les alliages d'aluminium-silicium (A-S) moulé sous pression	2
I-1 Diagramme de phase binaire aluminium-silicium.....	2
I-2 Propriétés de l'alliage AS12.....	3
II- Propriétés tribologiques.....	4
II-1- Frottement et usure.....	4
II-1-1- Frottement solide	4
II-1-2- Usure.....	5
a- Usure abrasive.....	5
b- L'usure adhésive.....	7
III- Approche quantitative de l'usure.....	8
III-1- Loi d'Archard.....	9
Chapitre II : Matériaux étudiés et techniques expérimentales.....	11
I- L'objectif	11
II- Matériaux étudiés.....	11
III- Techniques de caractérisation	11
III-1- Caractérisation mécanique.....	11
III-1-1 Essai de dureté.....	11
III-1-2 Essai de rugosité.....	12
III-2- Essai tribologique.....	13
III-3- Microscopie optique.....	15
III-3-1- Préparation des échantillons.....	15
a. Découpage	15
b. Polissage.....	15
III-4- Microscopie électronique à balayage	17
Chapitre III : Résultats et discussions.....	19

I- Etude mécanique.....	19
I-1- Dureté brinell.....	19
I-2- Rugosité.....	20
II- Etude tribologique.....	20
II-1- Coefficient de frottement.....	20
II-2- Analyse des échantillons après le test tribologique.....	23
II-3- Analyse de traces d'usure par Microscopie optique OM.....	25
II-3-1- Estimation de la perte de masse.....	27
II-3-2- Le taux d'usure.....	27
III- Débris.....	28
Conclusion générale.....	30
Références bibliographiques.....	31

Liste des figures

Chapitre I : Partie théorique

Figure I.1 : Diagramme d'équilibre Al-Si.....	3
Figure I.2 : Schéma du processus de frottement.....	4
Figure I.3 : Schémas représentatifs: a) l'abrasion à deux corps et à trois corps; b) mécanismes de l'usure abrasive.....	6
Figure I.4 : Schéma de l'usure adhésive.....	7
Figure I.5 : Valeurs du coefficient d'usure K présentées pour différentes conditions d'usure.....	10

Chapitre II : Résultats et discussions

Figure II.1 : Vue d'un duromètre.....	11
Figure II.2 : Vue d'un rugosimètre.....	12
Figure II.3 : Tribomètre TRB.....	13
Figure II.4 : Schéma expliquant le principe d'une mesure par un tribomètre.....	13
Figure II.5 : Balance analytique de 10^{-4} g précision.....	14
Figure II.6 : Tronçonneuse des échantillons.....	15
Figure II.7 : Vue de la polisseuse.....	16
Figure II.8 : Image de l'échantillon après la préparation.....	16
Figure II.9 : Vue microscope optique NIKON utilisé.....	17
Figure II.10 : Microscopie électronique à balayage.....	18

Chapitre III : Résultats et discussions

Figure III.1 : Dureté HB de l'alliage AS12 en fonction de la température d'injection.....	19
Figure III.2 : Evolution du coefficient de frottement de AS12 injecté à T1.....	21
Figure III.3 : Evolution du coefficient de frottement de AS12 injecté à T2.....	21

Figure III.4 : Evolution du coefficient de frottement de AS12 injecté à T3.....	22
Figure III.5 : comparaison du coefficient de frottement d'un alliage de AS12 coulé à trois températures différentes.....	22
Figure III.6 : Micrographies MEB des échantillons testés avec une charge de 2N à trois températures d'injection.....	24
Figure III.7 : Images optique des traces d'usure des échantillons testés avec une charge de 2N.....	26
Figure III.8 : Vue d'un ensemble de débris de l'alliage AS12 coulé sous pression à la température d'injection T2.....	28
Figure III.9 : Le spectre de diffraction de débris de l'alliage AS12 coulé sous pression à la température d'injection T2.....	29

Liste des tableaux

Chapitre II : Matériaux étudiés et techniques expérimentales

Tableau II.1 : Les paramètres de la rugosité.....	12
Tableau II.2 : Les paramètres de tribomètre.....	14

Chapitre III : Résultats et discussions

Tableau III.1 : Rugosités des échantillons coulés à différentes températures.....	20
Tableau III.2 : Largeur des traces d'usure obtenues par Microscopie optique.....	26
Tableau III.3 : Mesures de masse avant et après le test tribologique des échantillons et les pertes en masses produites.....	27
Tableau III.4 : Les résultats du taux d'usure à 2N et L= 50 m.....	28

Introduction générale :

Les alliages d'aluminium silicium ont fait l'objet d'un nombre important d'études, suite à leurs excellentes propriétés mécaniques combinées à une densité relativement faible, ce qui en font une classe d'alliage qui a trouvé une large gamme d'applications surtout dans l'industrie automobile. Cependant, leur mise en œuvre par fonderie exige une connaissance parfaite et une bonne maîtrise de leur technologie d'élaboration, ce qui réduirait le taux de rebut et étendrait leur domaine d'application sur le marché national. La composition la plus utilisée dans les alliages d'aluminium silicium de fonderie est 8 à 12 % pour un moulage sous pression.

Le moulage sous pression consiste à introduire l'alliage dans une chambre de compression ou il sera refoulé à l'aide d'un piston vers le moule permanent avec une grande pression de l'ordre de 1200bar et avec une grande vitesse.

La corrélation entre les paramètres du processus d'injection, la microstructure, la corrosion et les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium coulés sous pression a été étudiée fréquemment, mais l'usure a été généralement négligée. Quelques auteurs ont étudié l'usure des alliages d'AlSi en comparant la quantité de silicium. Cependant, les études sur l'usure des alliages d'Aluminium silicium coulés sous pression et l'effet des paramètres sont rares.

A la lumière de ce qu'on a décrit auparavant, l'objectif de ce travail est de fournir une compréhension additionnelle des effets des paramètres de procès (Température d'injection) sur le comportement tribologique d'un alliage Al-Si eutectique produit par moulage sous pression à chambre froide.

Le mémoire est structuré en trois chapitres :

- le premier où on retrouve les rappels théoriques sur les alliages d'aluminium-silicium moulé sous pression et les notions principales de frottement et de l'usure « Propriétés tribologiques ».
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des matériaux étudiés et des techniques expérimentales utilisées.
- Le troisième chapitre présente la discussion des résultats trouvés, et enfin une conclusion.

Chapitre I : Partie théorique

I- Généralités sur les alliages d'aluminium-Silicium (A-S) moulé sous pression:

Cette catégorie comprend les alliages EN AC-44 000 et EN AC-47 000. Industriellement, c'est la famille absolument prédominante des alliages d'aluminium de fonderie, ceci en raison des excellentes propriétés de fonderie que confère le silicium aux alliages d'aluminium et aussi pour leur aptitude au soudage, leur bonne stabilité dimensionnelle et leur faible température de fusion [1]. Le moulage sous pression des alliages d'Al-Si met en œuvre exclusivement des machines à chambre froide avec des pressions de maintien élevées (supérieures à 1000 bars) et par conséquent des forces de fermeture importantes (50 à 3500 tonnes) [2].

Les caractéristiques microstructurales et les propriétés mécaniques de ces alliages dépendent non seulement de leur composition en éléments d'alliages et la structure de coulée mais aussi de la taille du grain, les dimensions, la forme et la distribution des particules de silicium primaire, ainsi que la morphologie et la quantité des phases intermétalliques en présence [3].

I-1 Diagramme de phase binaire aluminium-silicium :

Le Silicium est le principal élément d'alliage de la plupart des alliages de fonderie. De ce fait, les pièces coulées à partir des alliages d'aluminium sont essentiellement les alliages aluminium-silicium. Le silicium augmente la coulabilité de l'aluminium et permet au métal de remplir complètement toutes les cavités et pores.

De plus, le silicium prévient la fissuration à chaud et augmente légèrement la dureté du métal en formant des particules dures ou des fibres de silicium pendant la solidification. Comme le montre la figure I.1, le système binaire Al-Si possède un point eutectique de 12,7% Si (% atomique). La solubilité maximale du silicium dans l'aluminium est de 1,5 % (% atomique) à la température eutectique; par contre, seulement 0,016% (% atomique) d'aluminium est soluble dans le silicium et ce, à 1190°C.

Le système aluminium-silicium forme un eutectique pour une teneur en silicium de 12,6 % en masse [4]. Les systèmes eutectiques possèdent en général d'excellentes propriétés de fonderie, et l'eutectique Al-Si a été l'un des premiers alliages de fonderie à être utilisé industriellement.

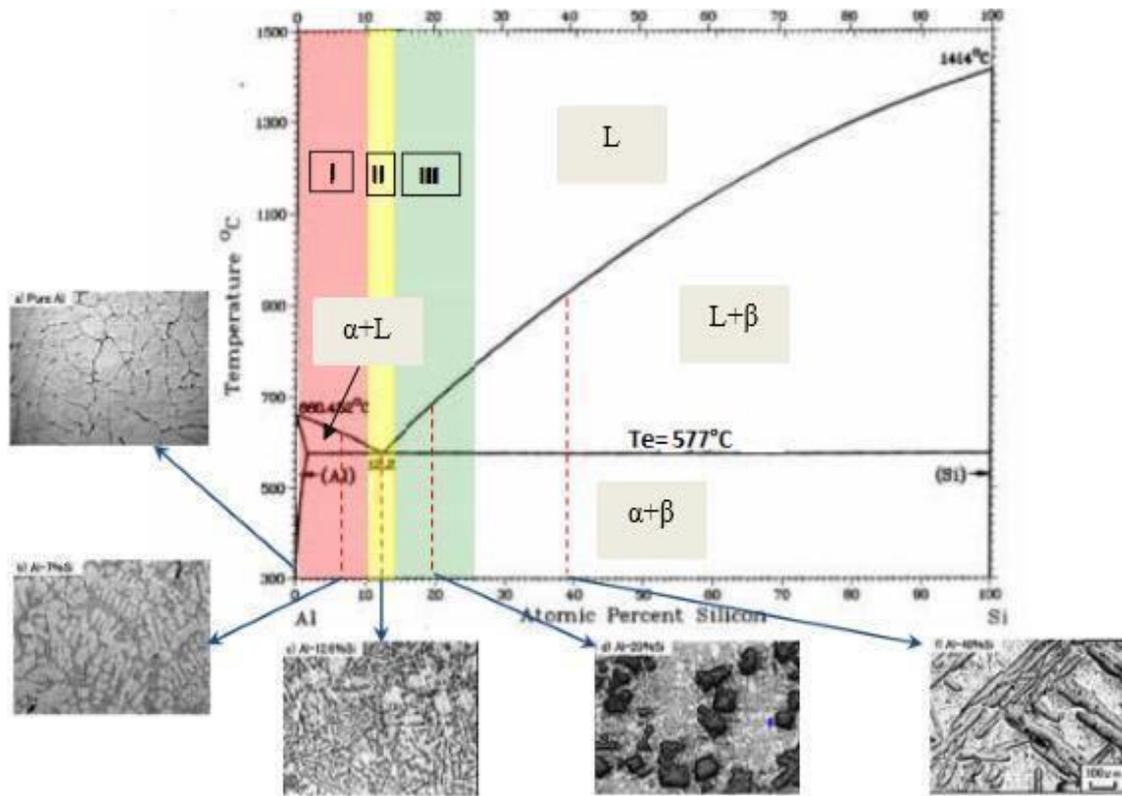


Figure I.1 : Diagramme d'équilibre Al-Si.

I-2 Propriétés de l'alliage AS12:

L'alliage considéré dans l'étude est AS12 dans lesquels la forte teneur en silicium conduit à une excellente coulabilité, une faible dilatation thermique et une bonne résistance à l'usure (pistons).

C'est un alliage proche de l'eutectique se comportant parfois en hypereutectique lorsqu'il est modifié au phosphore, il est distingué par de très bonnes propriétés de mise en œuvre en fonderie (coulabilité maximale, faible contraction volumique à la solidification).

Il est utilisé pour des pièces de formes complexes, à exigences de tenue mécanique moyenne et dont les épaisseurs peuvent descendre localement en dessous de 3 mm. Ces nuances sont utilisées à l'état F et coulées majoritairement en moule métallique et un peu au sable.

La modification au sodium quelquefois pratiqués améliore l'alimentation à la solidification et la ductilité, mais alerte la coulabilité.

Cet alliage est essentiellement destiné au diesel et aux culasses et cylindres à ailettes.

II- Propriétés tribologiques (frottement et usure)

II-1- Frottement et usure

II-1-1- Frottement solide:

Le coefficient de friction est défini de la façon suivante : Soit une charge N appliquée de façon normale sur un corps (son poids ou une force imposée) et une force T appliquée sur le bord de l'objet de telle sorte que sa vitesse soit constante. Une force de réaction R vient compenser les deux premières forces (Figure I.2).

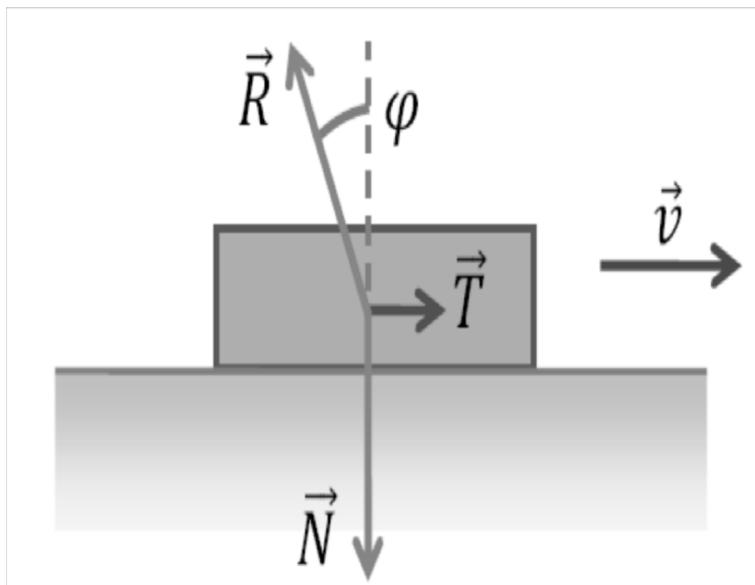


Figure I.2 : Schéma du processus de frottement.

Le coefficient de friction est alors défini comme :

$$f = \tan \varphi + \frac{\|\vec{T}\|}{\|\vec{N}\|} \quad (\text{I.1})$$

Une autre définition est souvent utilisée : deux solides en contact le long d'une surface d'aire S ne peuvent glisser l'un sur l'autre que si on leur applique une force T tangentielle à la surface, suffisante pour vaincre le frottement. Cette force croît proportionnellement à la force normale N , qui s'exerce perpendiculairement à la surface S :

$$T = \mu_s N \quad (\text{La loi de Coulomb I.2})$$

Où μ_s est le coefficient de frottement statique des deux matériaux.

Le coefficient de friction est dépendant de nombreux paramètres, comme le type de matériau utilisé, la vitesse de friction, les traitements de surface appliqués à ces matériaux, et l'environnement extérieur. Plus ce coefficient est faible, plus les pertes d'énergies par friction sont faibles [5].

D'ailleurs, l'origine physique du phénomène de frottement réside dans la création de microsoldures, par contact à l'échelle atomique entre les aspérités des surfaces des deux solides en l'absence de lubrification. Par fluage de ces aspérités, la surface de contact s'accroît avec la force normale et avec le temps [6].

II-1-2- Usure :

L'usure peut être produite par un contact de glissement (frottement), ou de roulement entre les surfaces de deux solides, ou bien par l'écoulement sur une surface d'un fluide chargé de particules solides (érosion). Dans le premier cas, on distingue souvent entre l'usure abrasive (à deux corps ou à trois corps) et l'usure adhésive [7].

a. Usure abrasive :

L'usure abrasive est un phénomène mécanique d'enlèvement de matière causé par le glissement ou le roulement des particules dures sur une surface sous l'effet d'une pression externe [7]. Il existe deux processus différents de ce phénomène : l'usure abrasive à deux corps et l'usure abrasive à trois corps comme le montre la figure I.3.a. En effet, au cours de leur mouvement, si les particules fortement ancrées à la surface d'un matériau pénètrent la surface d'un autre matériau, on parle de l'usure abrasive à deux corps ; Si ces particules sont libres de glisser entre les deux surfaces, on parle donc de l'usure abrasive à trois corps.

Les mécanismes responsables de l'enlèvement de matière sont le labourage, la coupe, la fatigue de surface et la fragmentation (figure I.3.b). Toutefois, le labourage est le mécanisme le plus dominant pour les matériaux ductiles, et la coupe reste particulièrement repérée pour les matériaux fragiles. A noter cependant, qu'aucun mécanisme n'est responsable à lui seul des pertes de matière [7,8].

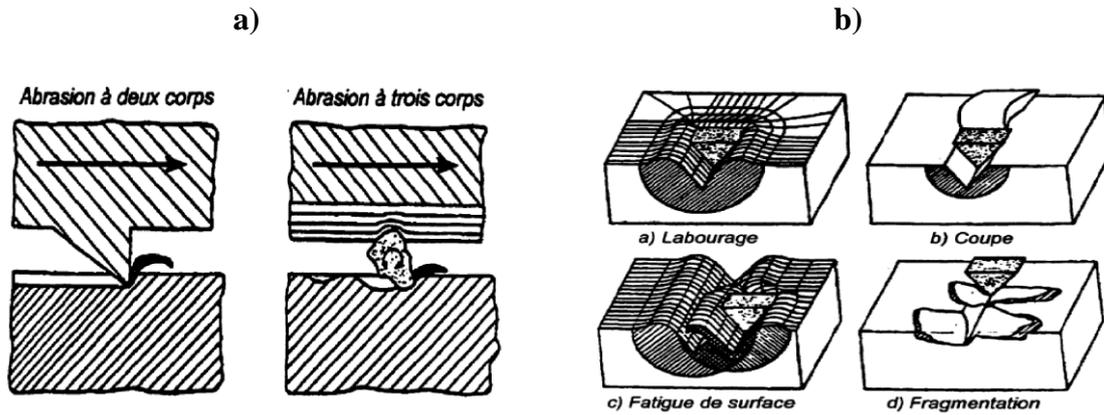


Figure I.3 : Schémas représentatifs : a) l'abrasion à deux corps et à trois corps ; b) mécanismes de l'usure abrasive.

Facteurs influençant l'abrasion d'un matériau [7]:

L'abrasion d'un matériau est effectivement influencée par certains facteurs dont le degré d'influence est plus ou moins significatif.

En premier lieu, la dureté est la première propriété à tenir en compte, lorsqu'on veut prévoir la résistance à l'abrasion d'un matériau. En effet, la dureté est inversement proportionnelle avec la perte en matière, autrement dit, plus le matériau est dur plus qu'il résiste à sa pénétration par les particules abrasives. A dureté égale, les métaux purs présentent des propriétés plus intéressantes que les alliages et les céramiques.

En deuxième lieu, la ténacité qui est une mesure de la résistance à la propagation des fissures, y joue un rôle important. Si la charge appliquée au matériau demeure inférieure à un seuil critique dépendant de sa ténacité, cette dernière demeure sans effet. Cependant, et au cas contraire, il faut avoir une ténacité relativement élevée afin d'éviter le mécanisme de fragmentation même si la dureté est diminuée. Ceci ne constitue pas un obstacle contre l'augmentation de la dureté, car selon les conditions auxquelles le matériau est soumis, une résistance à l'abrasion optimale peut être obtenue par la constitution d'un compromis entre la dureté et la ténacité du matériau en question.

En outre, la présence d'une seconde phase dans le matériau est également un facteur à prendre en compte. En effet, une matrice ductile dans laquelle des éléments durs sont insérés est effectivement plus résistante à l'usure abrasive. Toutefois, ceci dépend de la grosseur et de la concentration de la phase introduite. Ainsi, dans certains cas, la ténacité peut être baissée diminuant la résistance à l'usure abrasive du matériau.

En dernier lieu, les propriétés de l'abrasif influent directement sur l'aptitude à l'abrasion d'un matériau. Il est évident que l'abrasif doit être plus dur que le matériau pour qu'il puisse le rayer et pénétrer. En plus, un abrasif de forme angulaire est plus pénétrant qu'un autre arrondie. La dimension des particules abrasives joue de sa part également un rôle significatif ou le maintien de la dimension des particules sous un seuil critique diminue sensiblement le taux d'usure.

b. L'usure adhésive :

L'usure adhésive est un phénomène physico-chimique provoquée par le mécanisme de transfert matière entre deux surfaces pendant leur mouvement relatif, qui est due de sa part par un processus de soudure en phase solide. Autrement dit, pendant leur mouvement, la matière d'une pièce est transférée vers l'autre par un soudage en phase solide (figure I.4). En effet, si les métaux en contact sont solubles l'un dans l'autre, il y a formation des liaisons interatomiques ou intermoléculaires formant des alliages à l'interface par diffusion.

D'ailleurs, le mécanisme engendré au niveau de l'interface dépend essentiellement de celle-ci. Si l'interface est moins solide que les pièces, les jonctions se cisailent par rupture adhésive, l'usure est donc modérée, douce ou quasi nulle. Par contre, si l'interface est plus solide qu'une des pièces, il y a rupture cohésive, donc usure sévère et grippage. L'interface se fixe sur la pièce la plus résistante ou se détache sous forme des particules qui, écrouies et oxydées, peuvent contribuer à l'adhésion [7,8].

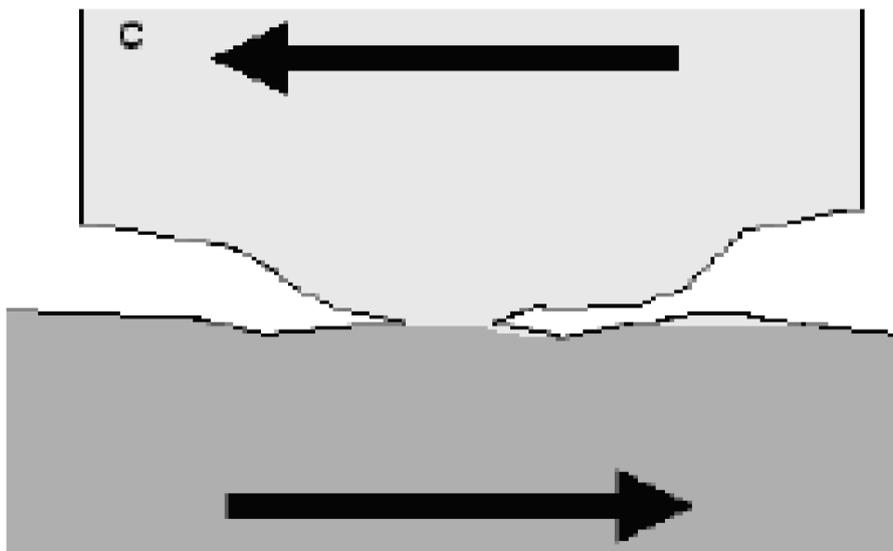


Figure I.4 : Schéma de l'usure adhésive.

III - Approche quantitative de l'usure :

L'étude des différents types d'usure montre que leurs mécanismes associés peuvent être très variés par leurs conditions d'apparition et par leurs effets. L'étude prédictive de l'usure, quant à elle, dépend à son tour du type d'usure et fait intervenir des paramètres propres aux matériaux (ductilité, limite élastique, dureté, ...) et des paramètres de fonctionnement (vitesse, géométrie, charge,...). Ces paramètres peuvent évoluer durant le processus d'usure ce qui rend encore plus difficile sa quantification.

Afin de pouvoir quantifier ce phénomène, l'usure a été largement étudiée durant ces dernières décennies et plusieurs modèles ont été développés. Cependant, aucune de ces lois n'est générale et la plupart d'entre elles ont été développées pour des conditions bien spécifiques. H.C. Meng et K.C. Ludema ont recensé dans la littérature plus de 300 lois relatives au frottement et à l'usure [9]. Ils ont proposé par la suite une classification chronologique de ces lois en trois catégories :

- Les lois à caractère empirique, qui ont vu le jour entre les années 1950 et 1970.

Elles prennent en compte principalement des paramètres relatifs aux conditions de tests. Barwell [10] propose une loi où le taux d'usure est identifié par le volume d'usure (V) exprimé en fonction du temps. Rhee [11] propose une loi d'usure sur la masse perdue où interviennent l'effort normal, la vitesse de glissement et des coefficients empiriques. Ces lois sont bien précises mais ne sont valables que pour les tests où elles ont été établies.

- Entre les années 1970 et 1980 sont apparues les lois basées sur la mécanique du contact. Certaines d'entre elles tiennent compte des propriétés des matériaux en contact, comme leur module de Young ou bien leur dureté, qui ont un impact sur la cinétique d'usure.

- Enfin, depuis les années 1980 les lois basées sur les mécanismes d'endommagement (mécanique de la rupture) se sont développées. Elles incluent les mécanismes de dislocations, les propriétés en fatigue et la rupture en cisaillement.

III-1- Loi d'Archard :

En 1953, Archard a étudié le phénomène de l'usure de plus près et a établi l'une des lois les plus usuelles, en se basant sur les travaux antérieurs de Holm (1946) [12, 13,14]. Une loi empirique qui permet d'estimer la perte de masse du matériau usé dans le cas d'un contact de glissement pour des matériaux de dureté très différente. Cette loi est basée sur le fait que le contact des surfaces ne se fait que par un nombre réduit d'aspérités, réparties aléatoirement sur la surface (surface réelle de contact). D'autre part, ces aspérités doivent supporter la charge et maintenir les déformations dans le domaine d'élasticité. La forme la plus courante de la loi d'Archard est exprimée en fonction d'un coefficient d'usure k sans dimension, de la force normale appliquée F_n , de la distance de glissement L et de la dureté du matériau le plus mou H . Ce modèle de base a été appliqué initialement dans le cas de l'usure adhésive à sec [15], et s'exprime comme suit :

$$V = k F_n L/H \quad (I.3)$$

Il a été montré que la loi d'Archard peut être étendue à d'autres mécanismes, notamment celui de l'abrasion. Moyennant une redéfinition de certains paramètres, l'équation précédente peut s'écrire :

$$V = k F_n L \quad (I.4)$$

Où k est un coefficient d'usure souvent exprimé en $mm^3N^{-1}m^{-1}$. Ce coefficient, dont la valeur ne dépasse pas l'unité, nous donne une indication sur l'amplitude du phénomène (usure sévère - usure modérée) et il n'est obtenu que par le biais de l'expérience (figure I.5). Les faibles valeurs du coefficient d'usure K sont obtenues pour les conditions de glissement lubrifié, où on a une faible proportion d'aspérités en contact. Alors que dans les conditions de glissement non lubrifié, K peut varier de 10^{-6} à $10^{-2} mm^3N^{-1}m^{-1}$ et atteint son maximum dans les conditions de régime sévère. Ce coefficient est différent pour chacun des corps en contact et dépend des conditions géométriques et thermodynamiques [16].

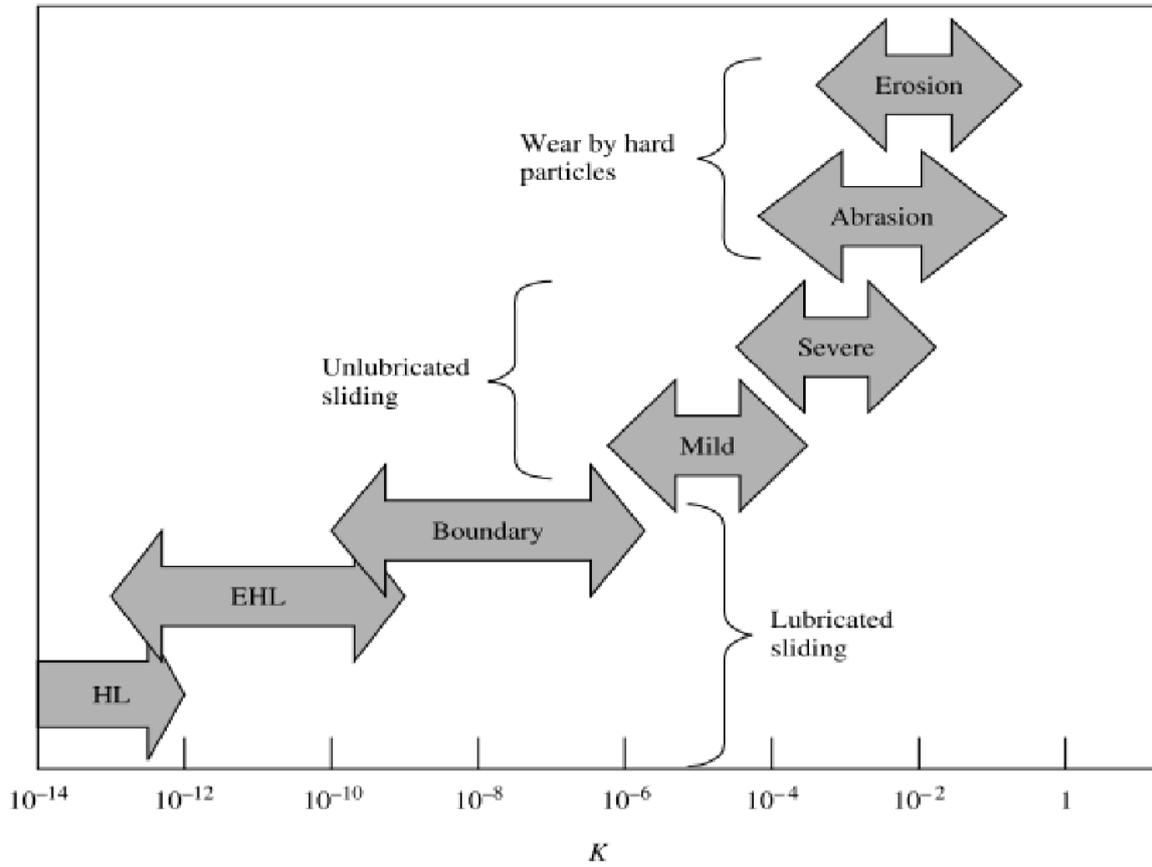


Figure I.5 : Valeurs du coefficient d'usure K présentées pour différentes conditions d'usure.

HL = lubrification hydrodynamique ;

EHL = lubrification élastohydrodynamique [12]

Chapitre II : Matériaux étudiés et techniques expérimentales

I- L'objectif :

L'objectif de ce travail est l'étude de l'influence de la température d'injection sur les propriétés tribologiques de la pièce. L'alliage vient d'une pièce en alliage AS12 coulé sous pression à différentes températures d'injection : 580°C, 650°C et 700°C.

II- Matériaux étudiés :

Notre étude repose sur un alliage d'aluminium à 12% de silicium (AlSi12 ou AS12), un alliage eutectique. Nous l'avons choisi à cause de son utilisation très utile dans le domaine de l'industrie des tracteurs (surtout les pièces de moteur).

L'alliage AS12 est coulé sous pression pour des pièces de moteur « couronne d'aube 801 ». Ces pièces ont été découpées au laboratoire ENSMM à l'aide d'une micro tronçonneuse de type Mecatome T210 pour préparer des échantillons qui subiront ultérieurement, soit des essais tribologiques, soit des analyses mécaniques et les analyses par microscopie optique et électronique à balayage décrites par la suite.

III- Techniques de caractérisation :

III-1- Caractérisation mécanique

III-1-1- Essai de dureté (Dureté brinell) :

Les mesures de dureté ont été réalisées sur des trois pièces de l'alliage AS12 effectuées à l'aide d'un duromètre (Figure II.1) avec les conditions suivantes : Dureté Brinell, bille d'acier de diamètre 10 mm, sous une charge de 1000 kgf.



Figure II.1 : Vue d'un duromètre.

III-1-2- Essai de 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, et 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.

La rugosité d'une surface donnée peut être déterminée par la mesure d'un certain nombre de paramètres. On peut citer notamment (Tableau II.1), parmi les plus utilisés:

Tableau II.1 : Les paramètres de la rugosité

Rp	Pic maximal observé sur la longueur analysée. Si l'on pose un repère cartésien dont l'axe des abscisses est aligné sur la ligne centrale de la surface à mesurer, le pic maximal, lu sur l'axe des ordonnées, pourra également être noté $R_p = y_{\max}$.
Rc	Creux maximal observé sur la longueur analysée. $R_c : R_c = y_{\min} $
Rt	Rugosité totale. Elle correspond à la somme du pic maximal et du creux maximal observé sur la longueur analysée. $R_t = R_p + R_c$
Ra	Écart moyen, ou moyenne arithmétique des distances entre pics et creux successifs. "Ra" correspond à la différence entre cette distance moyenne et la "ligne centrale". Ce paramètre "moyen" permet de donner une indication générale résumant les autres paramètres de rugosité d'une surface donnée, et est par conséquent fréquemment utilisé.

Le rugosimètre utilisé pendant notre étude de type TR220 est montré sur la figure II.2



Figure II.2 : Vue d'un rugosimètre utilisé.

III-2- Essai tribologique :

Pour examiner le comportement tribologique de l'alliage étudié, nous nous intéressons à la mesure du coefficient de frottement et l'estimation de la perte de masse. Nous effectuons nos mesures avec une configuration bille sur disque en rotation (ball on disk). Nous disposons pour cela d'un tribomètre TRB (Figure II.3).

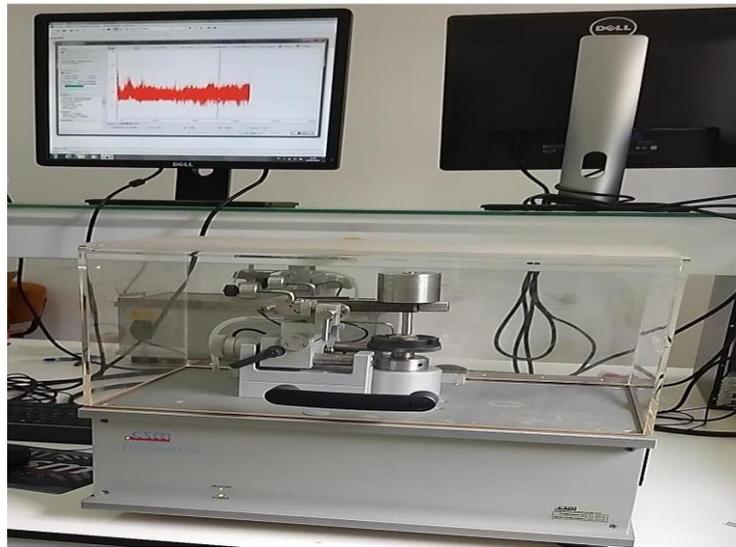


Figure II.3 : Tribomètre TRB.

Le principe de la mesure est schématisé sur la figure II.4 : on applique une charge sur une bille fixée sur un bras. L'échantillon, quand à lui, fixé sur un support rotatif. La bille est excentrée du centre de la rotation d'un rayon R et tourne à une vitesse V . La force tangentielle F est mesurée au niveau du bras. En connaissant la charge P , un logiciel en déduit par un calcul le coefficient de friction en fonction du temps.

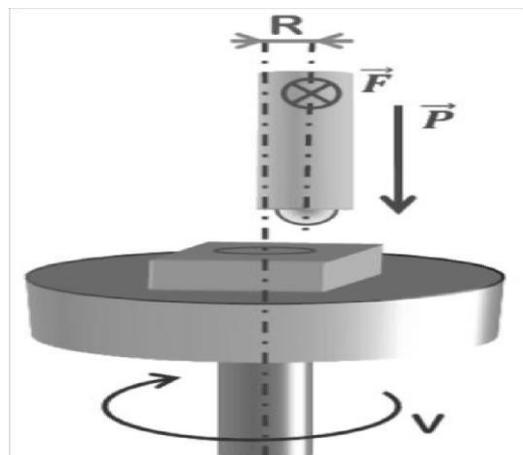


Figure II.4 : Schéma expliquant le principe d'une mesure par un tribomètre [4].

Les paramètres à déterminer pour une mesure de coefficient de friction sont donc la charge appliquée, le temps de mesure, le matériau de la bille, la vitesse, et le diamètre de rotation. Il est aussi possible de changer l'environnement en utilisant une cuve de lubrifiant, en injectant un gaz dans l'enceinte ou en jouant sur l'hygrométrie.

D'après les travaux antérieurs qui ont traité du même matériau, les paramètres suivants ont été choisis :

Tableau II.2 : Les paramètres de tribomètre.

Paramètres	Spécifications
Le matériau de la bille	100C6 de 6 mm de diamètre
La vitesse de rotation constante	2 cm/sec.
L'environnement	les tests sont effectués sans lubrification et à l'air
La charge appliquée (N)	2
Distance parcourue (mm)	50

Le tribomètre peut parfois être muni d'un profilométrie afin de mesurer l'usure de l'échantillon, malheureusement dans notre cas, le tribomètre ne dispose pas de cette option. L'usure étant un paramètre important dans la caractérisation d'un traitement de surface, on procédera de la manière suivante : nous estimons l'usure de l'échantillon par la mesure de la perte en masse. Pour cela, pour chaque échantillon, nous mesurons sa masse avant et après le test tribologique à l'aide d'une balance (Figure II.5) permettant les mesures jusqu'à 10^{-4} g.

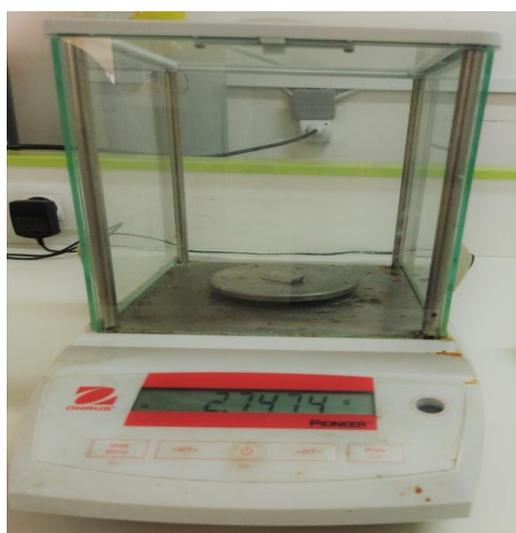


Figure II.5 : Balance analytique de 10^{-4} g précision.

III-3- Microscopie optique :

III-3-1- Préparation des échantillons :

L'aluminium et ses alliages sont mous et ductiles. Ils sont facilement rayés ou tordus pendant la préparation. Il est important de spécifier la méthode utilisée pour préparer les échantillons pour l'observation microstructurale par microscopie optique

a- Découpage :

Dans une première étape, on a découpé la plaque en petites plaquettes de dimension 40mm sur 30mm à l'aide d'une tronçonneuse (Figure II.6) doté d'un système de lubrification-refroidissement (eau dans notre cas) avec une vitesse lente, afin d'éviter toute transformation de phase des échantillons.



Figure II.6 : Tronçonneuse des échantillons.

b- Polissage :

Le polissage consiste à rendre la surface à analyser plane, brillante et sans rayure susceptible de gêner l'examen micrographique; pour cela, on a utilisé une polisseuse à disques. La polisseuse (Figure II.7) est munie d'un dispositif d'arrosage permanent pour éviter les échauffements qui pourraient modifier la structure du métal. Par ailleurs, le polissage comprend deux étapes :



Figure II.7 : Vue de la polisseuse.

b-1- Le prépolissage :

Les trois échantillons doivent passer sur des papiers abrasifs de plus en plus fins, de granulométrie:120, 240 320, 400, 600, 800,1000, 1200, et 2000. Après le polissage, les échantillons sont rincés à l'eau, puis séchés. A titre indicatif, les conditions opératoires suivantes peuvent être appliquées dans la majeure partie des cas. La vitesse de rotation des disques abrasifs de l'ordre 150 à 300 tr/min.

b-2- Le polissage de finition :

Les échantillons (Figure II.8) passent sur un tapis de tissu mouillé à l'aide d'un feutre imbibé d'alumine en solution, préparé de poudre d'alumine très fine avec de l'eau distillée.



Figure II.8: Image de l'échantillon après la préparation.

Le microscope optique de marque NIKON (Figure II.9) est utilisé pour observer la trace d'usure après l'essai de tribologie sur l'alliage AlSi12.



Figure II.9 : Vue microscope optique NIKON utilisé.

III-4- Microscopie électronique à balayage :

La microscopie électronique à balayage est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière [19].

Le microscope électronique à balayage utilisé est de marque Fei (figure II.10) présent au niveau de laboratoire de génie des matériaux à l'ENSM. Ce microscope est destiné à l'observation d'échantillons secs et conducteurs ainsi qu'à l'analyse des éléments chimiques présents par un spectromètre de dispersion d'énergie EDAX (analyse EDS).

L'observation de la microstructure s'effectue avec le mode d'imagerie d'électrons secondaires du MEB appelé mode SEI (Secondary Electron Imaging). Ce mode permet d'observer des objets ayant une morphologie et un relief importants. Les topographies sont obtenues via un détecteur collectant les électrons secondaires émis par l'échantillon. La résolution est de l'ordre de quelques nanomètres. Les parties sombres et claires visibles sur

les images obtenues dépendent de la position des détecteurs par rapport à l'échantillon et surtout de l'angle entre le faisceau incident et la surface analysée. En effet, l'émission secondaire varie selon où i_0 correspond à l'angle entre le faisceau incident et la normale à la surface de l'échantillon, et, $p < 1$ dépend de l'énergie des électrons incidents [20].

L'analyse des éléments chimiques s'effectue à l'aide du mode EDS (X Energy Dispersive Spectroscopy) qui enregistre l'énergie $h\nu$ des photons X émis par l'échantillon en nombre de coups lorsque le faisceau primaire du microscope impacte l'objet. Chaque élément chimique constitue une source de photons. Ainsi, un spectre d'émission existe pour chaque élément chimique. Par analyse EDS, il est possible d'obtenir un spectre d'émission des éléments chimiques émis par l'objet analysé [20].

Pour analyser les échantillons, la même préparation de surface décrite ci-avant a été effectuée, sauf qu'il faut nettoyer les échantillons à ultrason avant de les attaquer chimiquement.

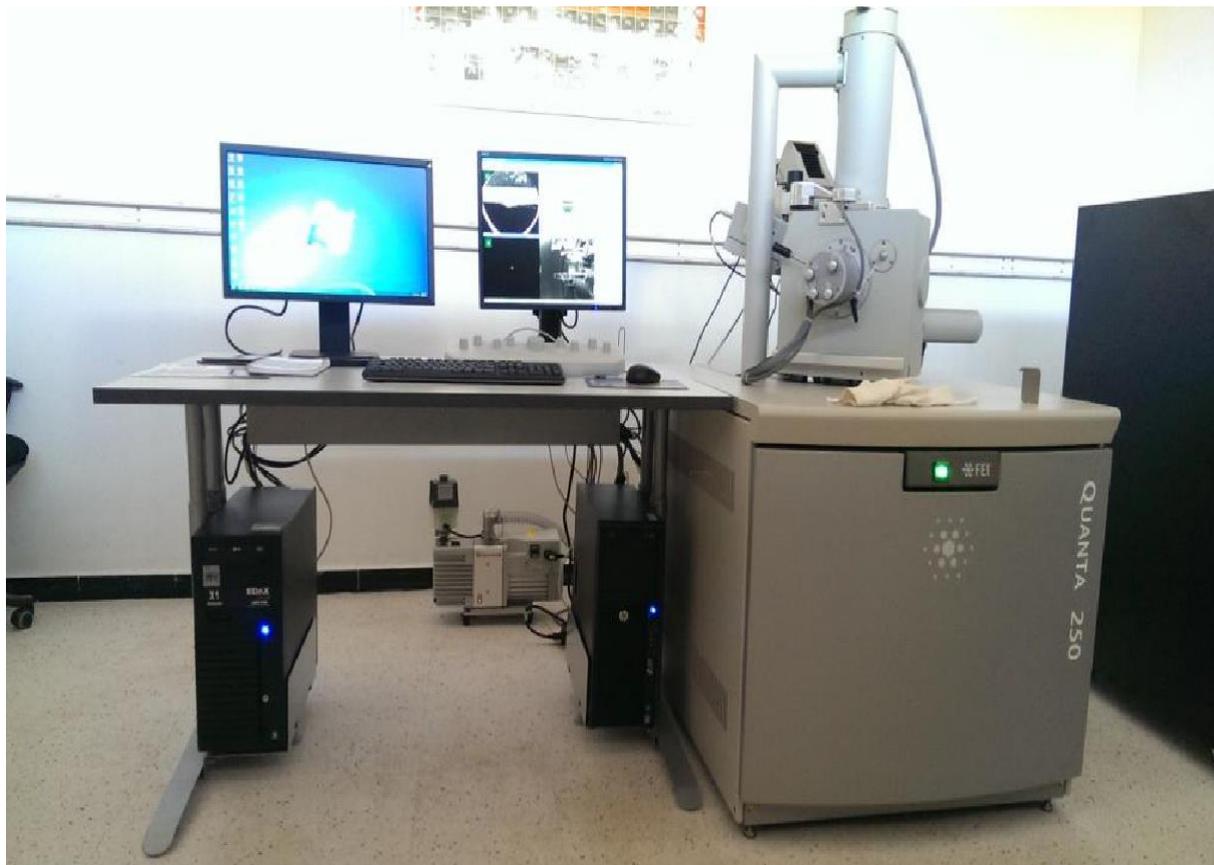


Figure II.10 : Microscopie électronique à balayage.

Chapitre III : Résultats et discussions

I- Etude mécanique :

I-1- Dureté brinell :

L'essai de dureté, comme étape préliminaire, sert à nous donner un aperçu général sur l'évolution des caractéristiques mécaniques des échantillons coulés sous différentes températures d'injections.

La figure III.1 donne les valeurs de dureté brinell obtenues sur l'alliage AlSi12 coulé à trois températures d'injection différentes. Ces valeurs, qui sont une moyenne de trois mesures, et montrent une augmentation de la dureté de 70 HB vers 85 HB avec l'augmentation de la température d'injection.

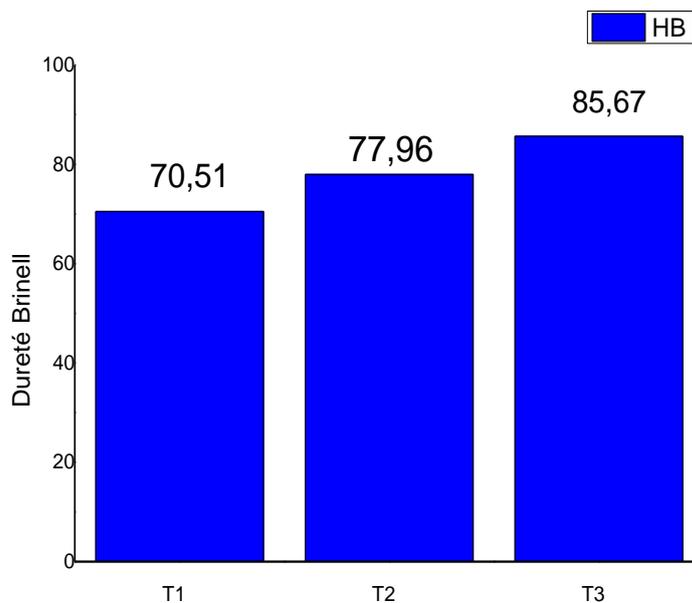


Figure III.1: Dureté HB de l'alliage AS12 en fonction de la température d'injection.

D'après la figure précédente, la température d'injection T1, la plus basse, donne la plus faible dureté, cela peut être dû à la structure grossière de la phase α -Al et la distribution de l'eutectique. En deuxième position, T2 donne aussi une dureté inférieure. La température d'injection T3 a donné le meilleur résultat car elle a contribué à affiner la structure encore plus surtout la phase α avec plus d'eutectique autour.

I-2- Rugosité :

La rugosité est une propriété primaire qu'il faut déterminer pour une bonne pratique des mesures tribologiques. Pour chaque échantillon, trois mesures de rugosité sont faites et les moyennes des mesures obtenues pour l'alliage AS12 coulé à trois températures d'injections différentes et après polissage sont présentées au tableau III.1 en dessous. Ces valeurs montrent une bonne cohérence avec la valeur théorique qu'il faut avoir ($Ra < 1\mu m$)

Tableau III.1 : Rugosités des échantillons coulés à différentes températures.

Températures d'injection	T1	T2	T3
Valeur de rugosité (μm)	0.45	0.48	0.57

Généralement, les valeurs de la rugosité les échantillons coulés en moulage sous pression montrent le meilleur état de surface de tous les modes de coulé. Mais comme les échantillons ont été découpés de pièces, il faut s'occuper de la planéité avec la rugosité des surfaces. Pour maintenir les mêmes conditions tribologiques, les échantillons sont polis et nettoyés avec de l'acétone. Les valeurs de la rugosité de nos échantillons de températures d'injection différentes (T1, T2, et T3) trouvés ont montré une rugosité allant de 0.4 à 0.6 μm .

II- Etude tribologique :

II-1- Coefficient de frottement :

Les figures (III.2), (III.3) et (III.4) montrent les variations du coefficient de frottement en fonction de nombre des tours pour les trois échantillons de l'alliage AlSi12 injecté à différentes températures qui font l'objet de cette étude sous une charge constante de 2N.

Au début de l'essai et par application de la charge égale à 2N, la courbe (figure III.2) de l'échantillon injecté à T1 montre que le coefficient de frottement est au départ faible (période de rodage), mais après 168 tours, nous trouvons une valeur stable du coefficient de friction de 0.9441, qui est identique de la valeur de coefficient de frottement statique. En moyenne, la valeur de coefficient de friction est de 0.440.

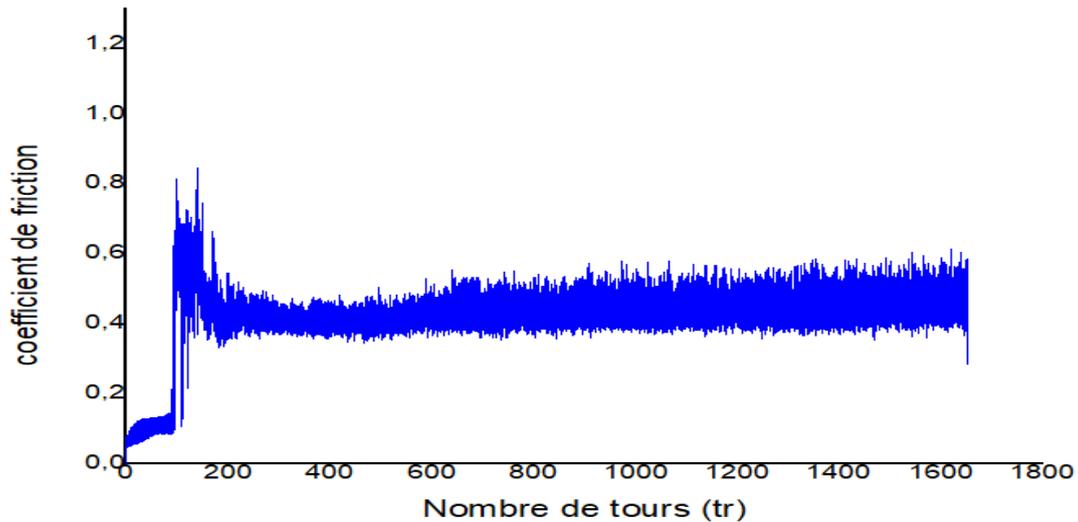


Figure III. 2 : Evolution du coefficient de frottement d'AS12 injecté à T1.

Sur la courbe de l'échantillon injecté à T2 (Figure III.3), nous remarquons que le coefficient de friction est au départ faible, mais il augmente progressivement et rapidement jusqu'à ce qu'il atteigne son régime stable au bout de 90 tours, nous trouvons une valeur stable et maximale du coefficient de friction de 0.9366. En moyenne, la valeur de coefficient de friction est de 0,514 qui est appelée coefficient de frottement dynamique

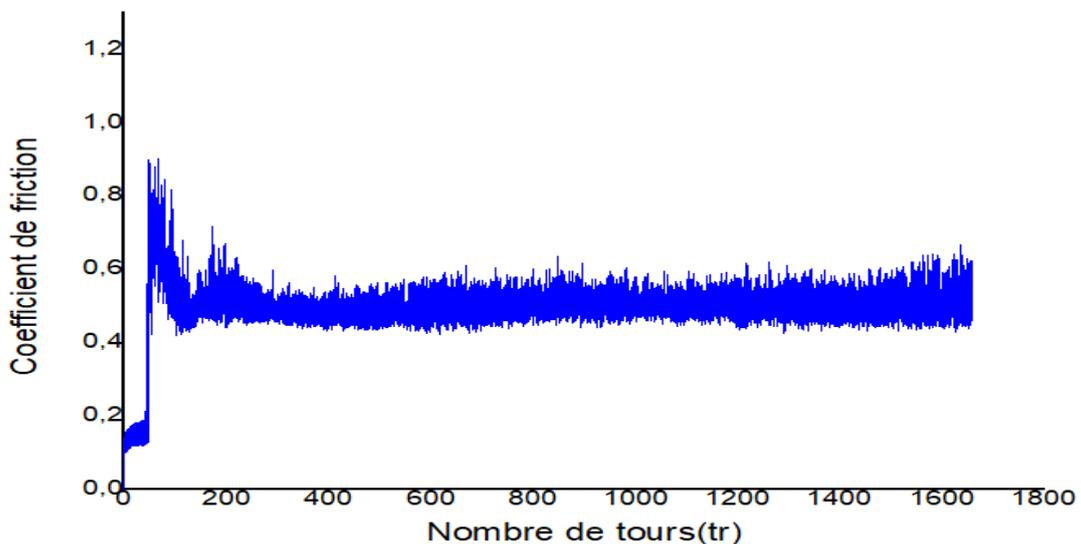


Figure III.3 : Evolution du coefficient de frottement d'AS12 injecté à T2

La courbe (Figure III.4) de l'échantillon injecté à T3 présente un comportement totalement différent des deux échantillons précédents. Elle montre que le coefficient de friction augmente rapidement à l'usure abrasive, à 13 tours, nous trouvons une valeur stable

du coefficient de friction de 1.00231, qui est identique de la valeur statique, mais après. En moyenne, la valeur de coefficient de friction est de 0,53.

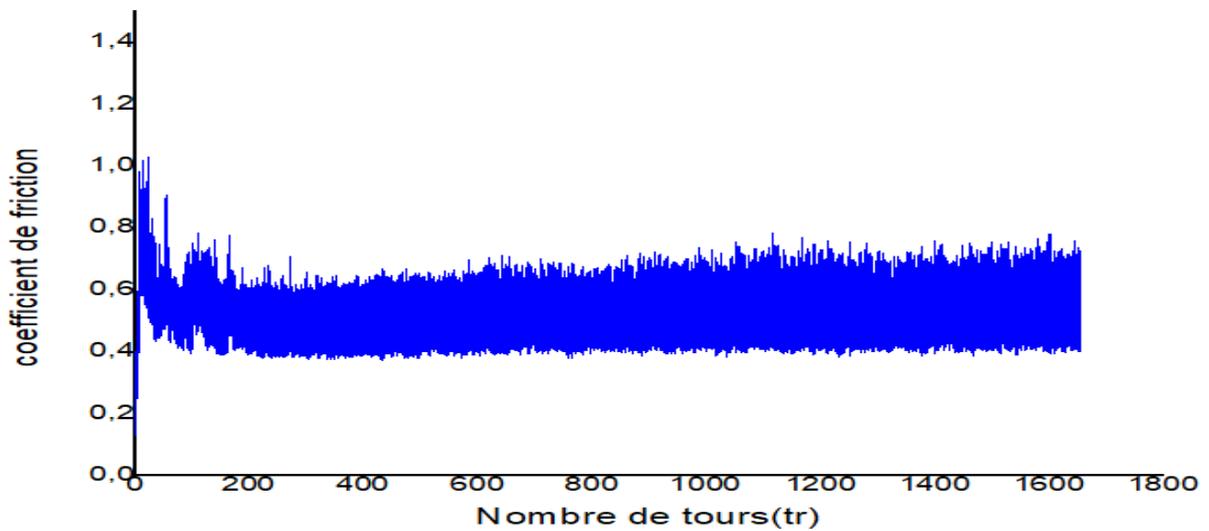


Figure III.4 : Evolution du coefficient de frottement d'AS12 injecté à T3.

La figure III.5 suivante résume les résultats de coefficient de frottement obtenus sur les trois matériaux AS12 coulés à différentes températures d'injection (T1, T2, T3) sous une charge constante de 2N. On constate que le coefficient de frottement du matériau moulé AS12 a augmenté de manière significative avec l'augmentation de la température d'injection.

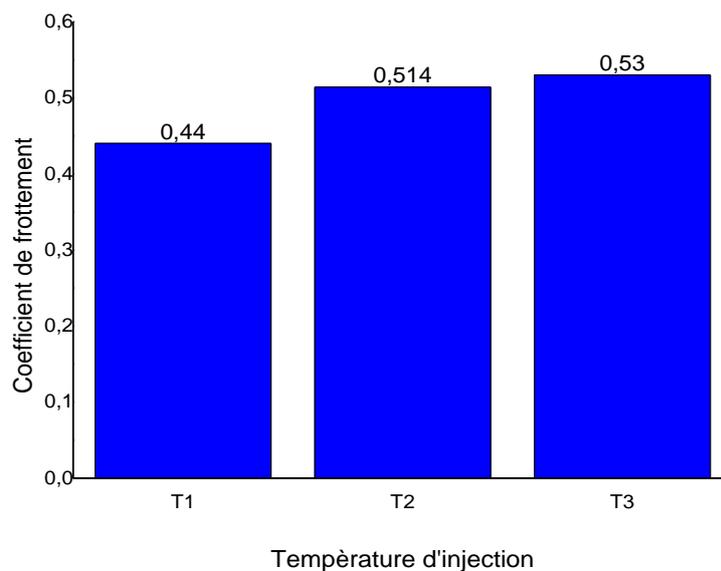
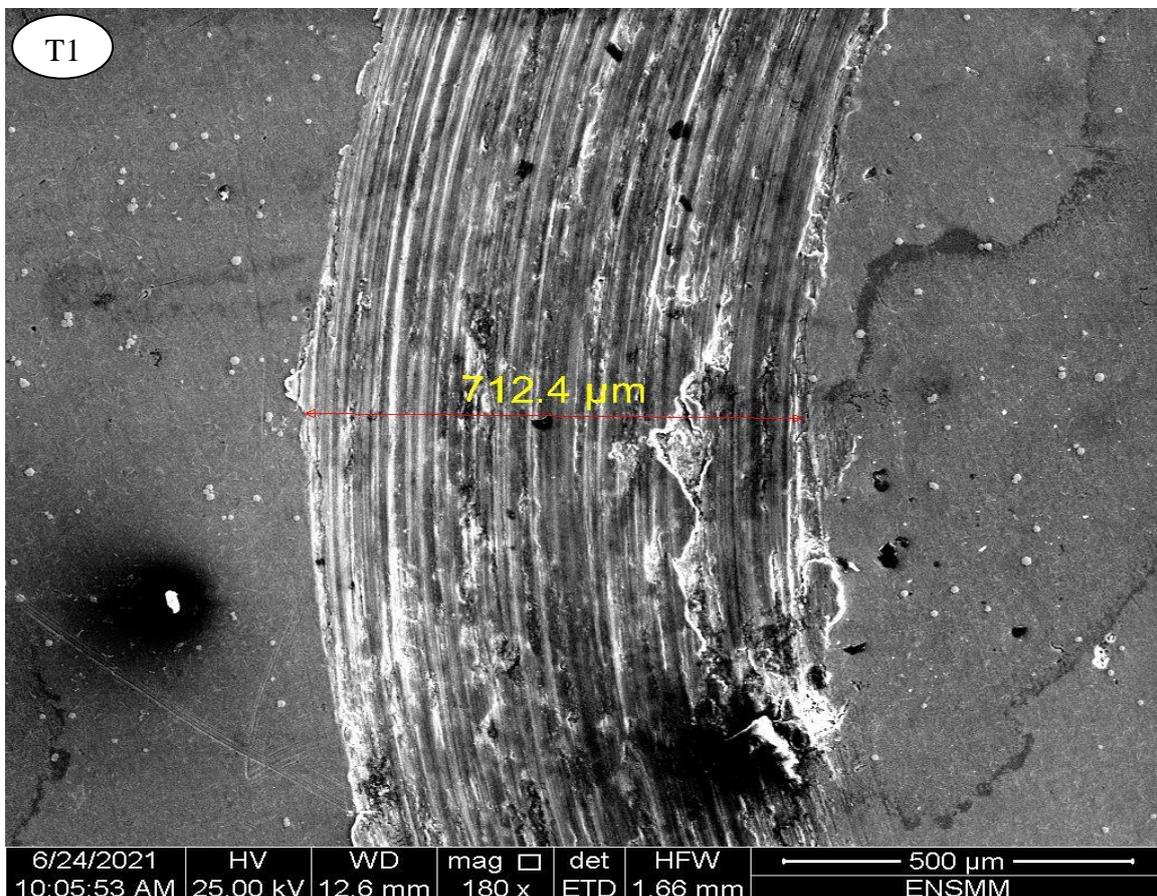


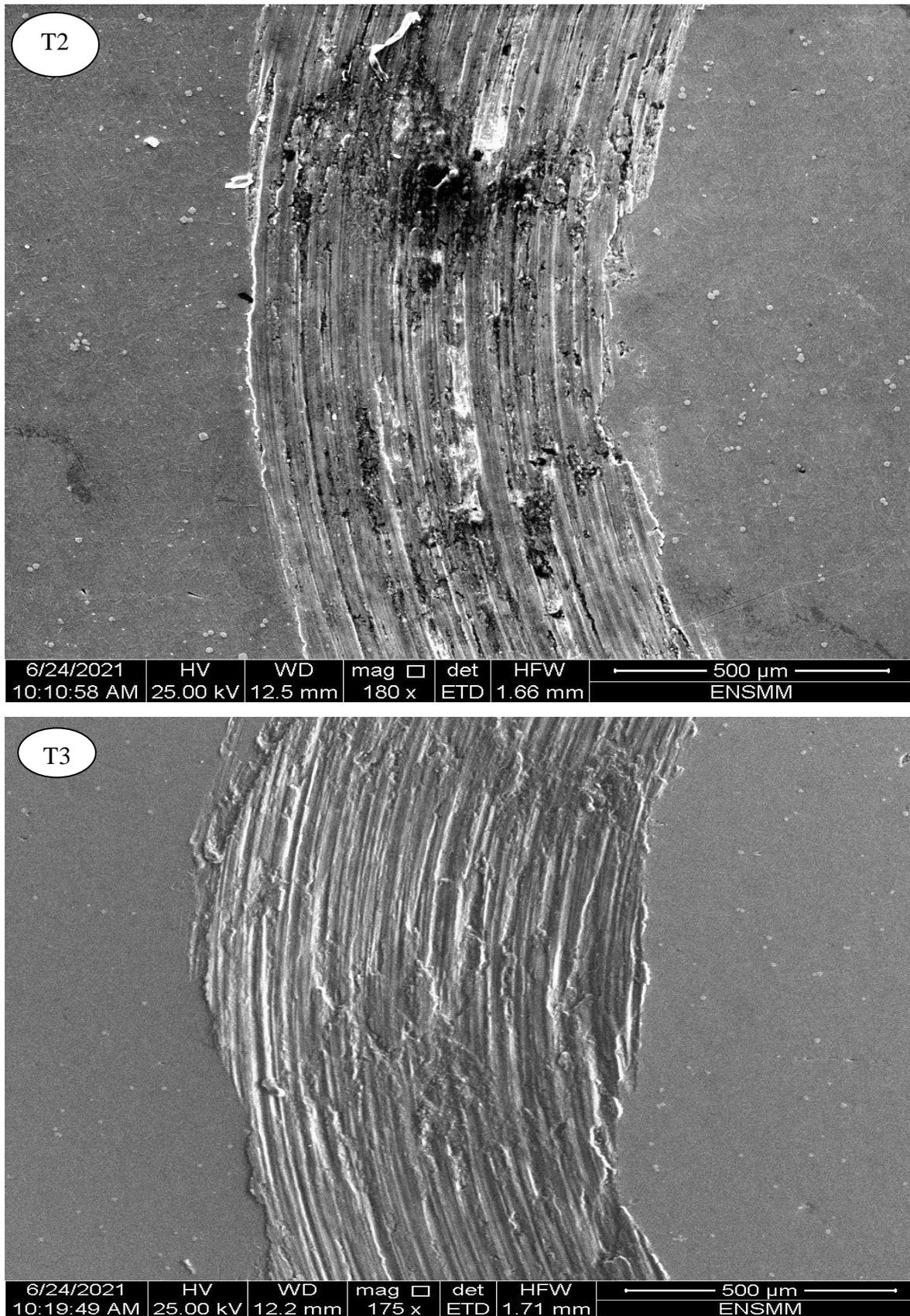
Figure III.5 : comparaison du coefficient de frottement d'un alliage d'AS12 coulé à trois températures différentes.

II-2- Analyse des échantillons après le test tribologique :

Afin de préciser le mécanisme d'usure qui a eu lieu, nous avons examiné les surfaces usées par le microscope électronique à balayage. Les figures III.6 montrent les micrographies de la trace d'usure sur l'alliage AS12 après le frottement sous une charge de 2N à une vitesse de glissement de 2 cm/s. Ces images mettent en évidence le même mécanisme d'usure abrasive que celui observé pour les échantillons injectés à trois températures différentes. Elle montre des stries parallèles continues et orientées dans le sens du glissement. Cependant, on remarque que la dégradation de la surface est plus précise au milieu des échantillons T1 et T2 par rapport à l'échantillon T3. C'est-à-dire, les échantillons usés par les températures T1 et T2 que les rayures semblent être plus profondes et celles de l'échantillon usé à T3 sont seulement superficielles.

Des traces d'oxydes et des copeaux d'usure sont aussi localisés au niveau de la surface des échantillons T1 et T2. En revanche, la déformation plastique sous forme de bourrelets est moins visible. L'arrachement de la matière et transfert des particules de l'alliage AS12 est clairement observé ce qui indique que le mécanisme d'usure à ces conditions est par adhésion.

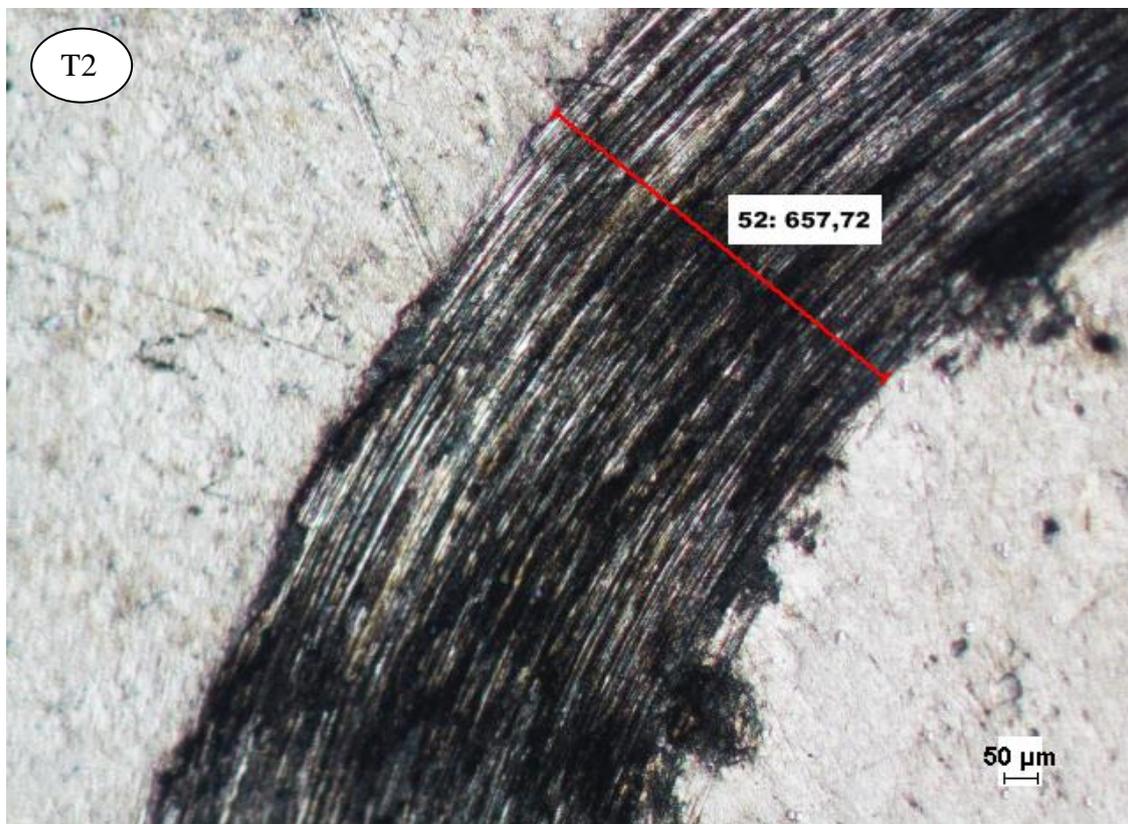
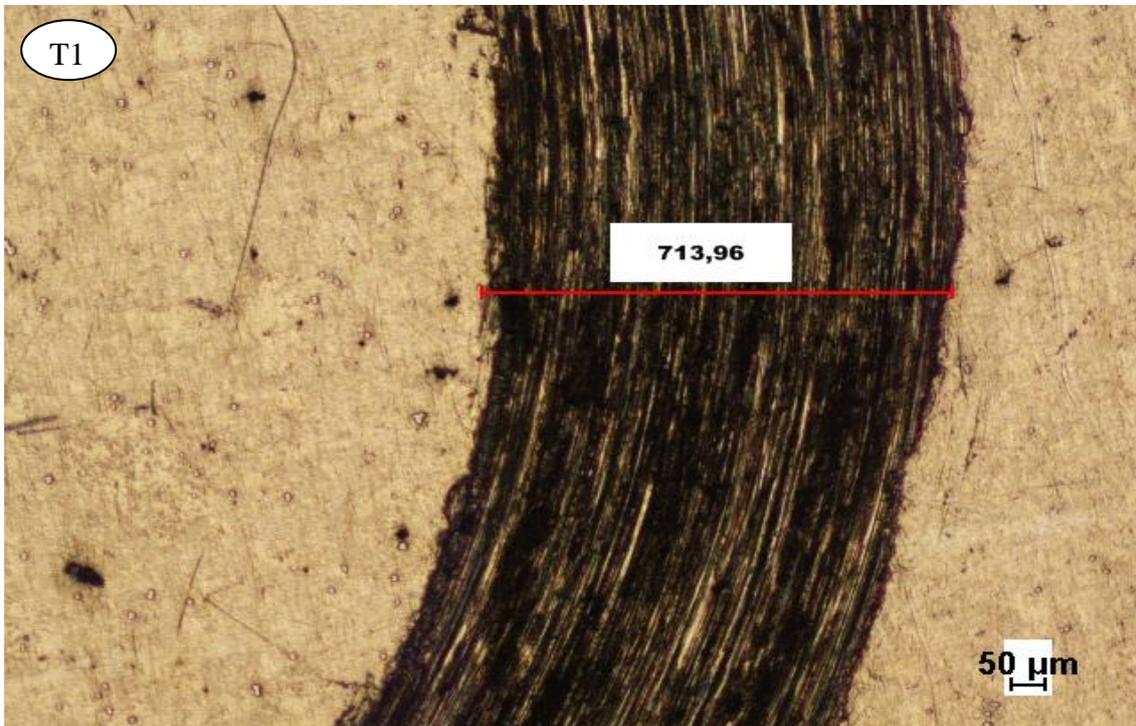


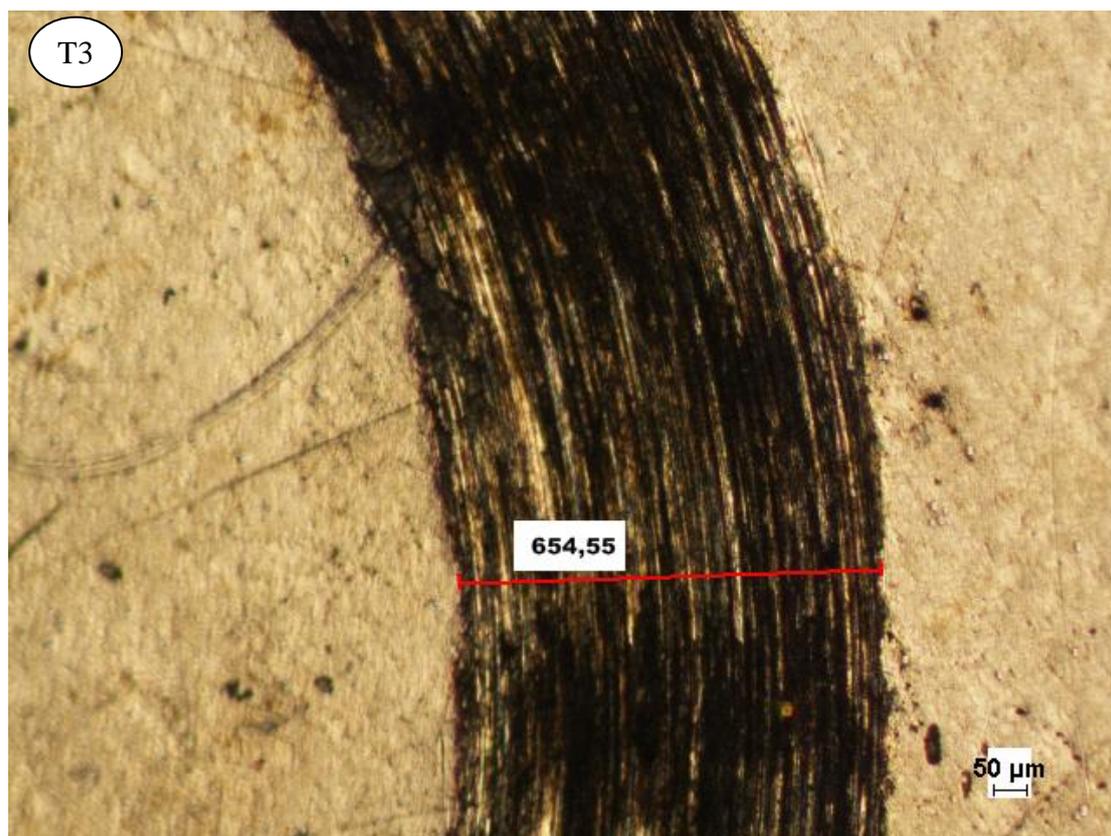


Figures III.6 : Micrographies MEB des échantillons testés avec une charge de 2N à trois températures d'injection

II-3- Analyse de traces d'usure par Microscopie optique OM :

Les micrographies optiques du matériau AS12 après les tests de frottement montrent que les sillons d'usure ont des tailles et des aspects différents.





Figures III.7 : Images optique des traces d'usure des échantillons testés avec une charge de 2N

La largeur des traces d'usure a été évaluée à partir d'images optiques, nous avons mesurés les largeurs des traces d'usure pour chaque échantillon. Le tableau III.2 montre l'ensemble de ces valeurs.

D'après ce tableau, on peut constater que :

- Plus les traces d'usure sont grandes, plus le coefficient de frottement est faible, et plus le comportement tribologique est le pire.
- A la charge appliquée 2N, la largeur des traces d'usure diminue si la température d'injection d'AS12 augmente.

Tableau III.2 : Largeur des traces d'usure obtenues par Microscopie optique.

Température d'injection	T1	T2	T3
Largeur des traces d'usure (μm)	713.96	657.72	654.55

II-3-1- Estimation de la perte de masse :

Nous avons pesé les masses des échantillons avant et après l'essai. Le tableau III.3 montre les valeurs trouvées avec les pertes en masses produites. Nous calculons la perte en masse par la formule suivante :

$$\text{perte (\%)} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (\text{III.1})$$

Où :

L : est la perte de masse (%).

m_i : est la masse avant l'essai (g).

m_f : est la masse après l'essai (g).

Tableau III.3. Mesures de masse avant et après le test tribologique des échantillons et les pertes en masses produites à charge 2N.

	Masse avant le test (g)	Masse après le test (g)	Gain en masse(%)
T1	1.5502	1.5508	-0.0387
T2	2.5688	2.600	-1.21145
T3	2.5240	2.6024	-3.1060

Le tableau montre les valeurs trouvées, on observe un gain de masse et non une perte de masse, ce qui est probablement dû au changement du mode de l'usure, de l'usure abrasive en usure adhésive, et également à l'usure de la bille d'acier.

La perte de masse est souvent expliquée par l'usure de l'alliage de surface. Toutefois, le gain de masse est probablement en raison du port de la bille de 100C6 utilisée dans les essais. On peut supposer que la bille 100C6 est usée parce que sa dureté (190-195HB) était devenue supérieure à celle de la surface d'AS12 (85HB). et on remarque aussi d'après les valeurs de perte en masse trouvées que le gain en masse a augmenté si la température d'injection est augmentée.

II-3-2- Le taux d'usure :

Le taux d'usure du disque (W_d) est déterminé en utilisant le volume d'usure (V) par exemple calculé à l'aide du logiciel tribomètre. A partir de cette valeur, le taux d'usure peut être calculé comme suit et est généralement exprimé en m^2/N . Le taux d'usure est représenté par l'équation :

$$W_d = \frac{V}{F_n.L} \quad (\text{III.2})$$

Tableau III.4 : Les résultats du taux d'usure à 2N et L= 50 m.

	W_d (mm ³ /N.m)
T1	1,044 10⁻³
T2	1,292 10⁻³
T3	7,51 10⁻³

A partir de ces calculs, nous pouvons dire et confirmer que la dureté de l'alliage générée par la grande température d'injection entraîne le renforcement du comportement tribologique.

III- Débris :

La figure (III.8) montre une vue d'un ensemble de débris de l'alliage AS12 coulé sous pression à la température d'injection T2 et le spectre de diffraction correspondant(III.9). Les débris d'usure de l'alliage d'AlSi présente de large forme feuilletée. Le flux de débris a une taille de grains des particules entre 1-100µm.

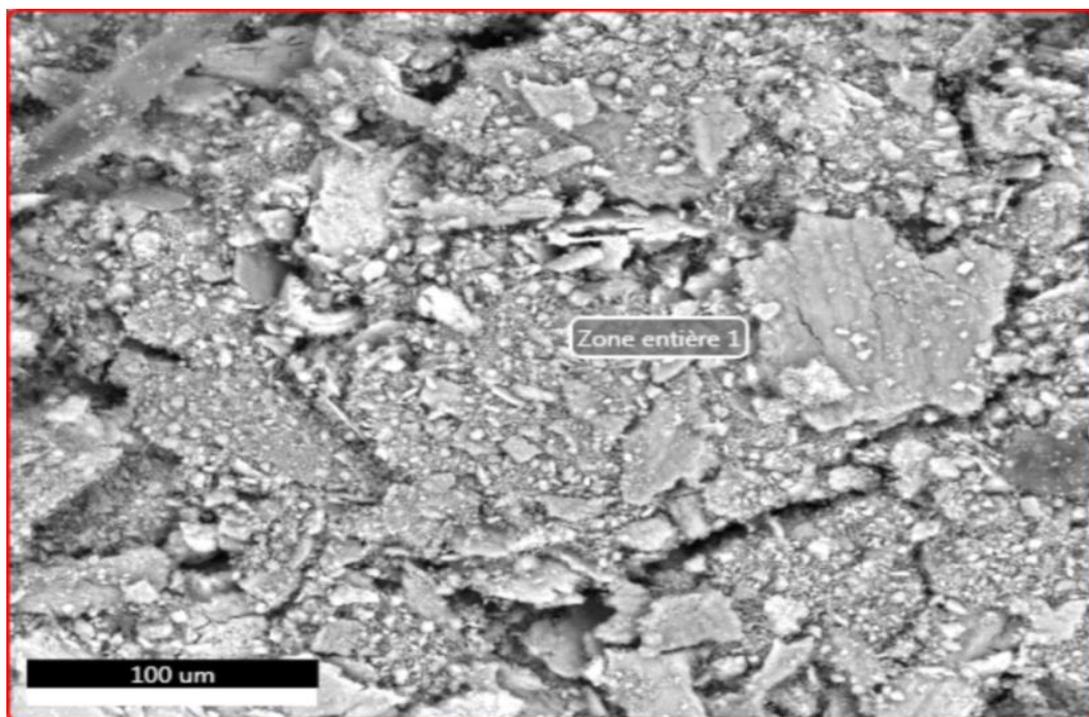


Figure III.8 : Vue d'un ensemble de débris de l'alliage AS12 coulé sous pression à la température d'injection T2.

Le spectre EDS des particules d'usure montre la présence des éléments tels que l'Aluminium, silicium, oxygène, fer, et cuivre. Ceci démontre que les débris comportent des oxydes et des intermétalliques. Donc, la présence de ces éléments confirment l'arrachement et la formation des oxydes et de ces intermétalliques lors du mouvement d'usure.

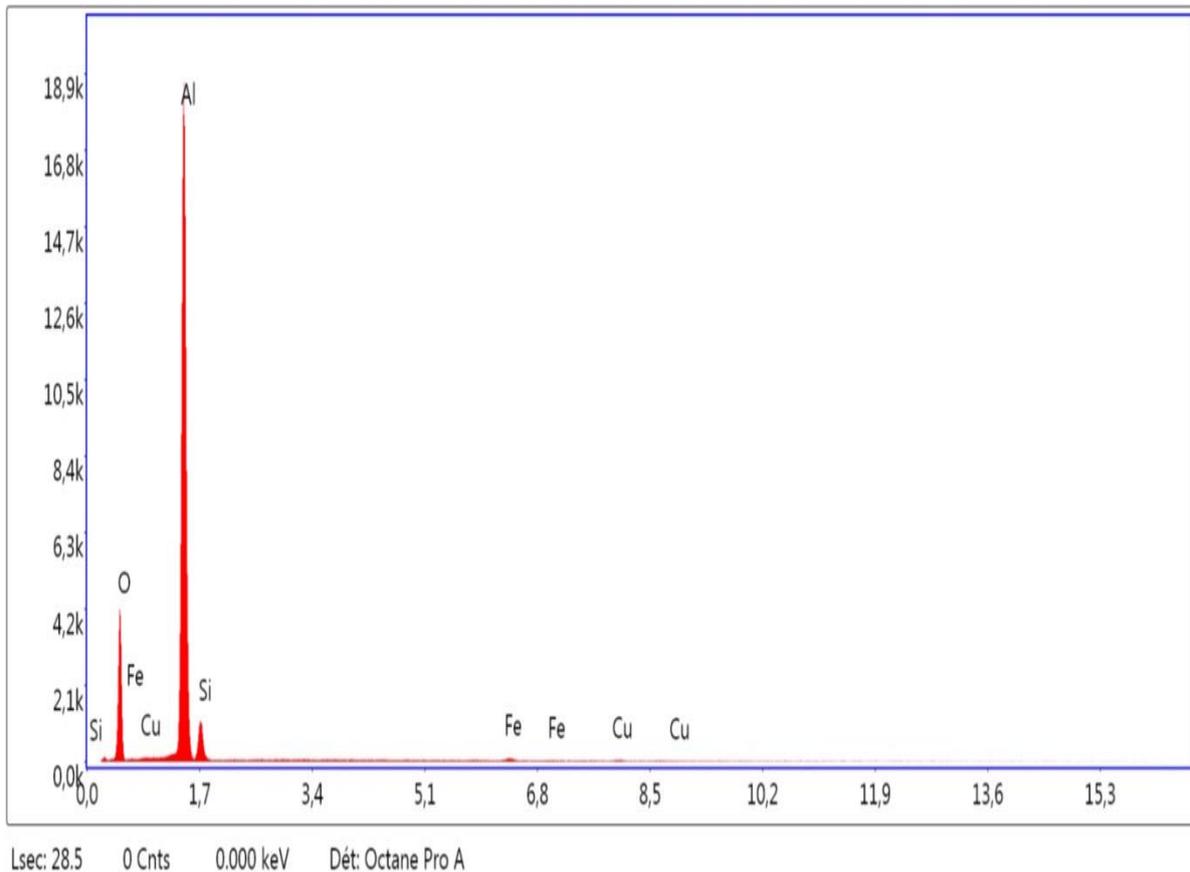


Figure III.9 : Le spectre de diffraction de débris de l'alliage AS12 coulé sous pression à la température d'injection T2

Conclusion Générale

Ce manuscrit est élaboré dans l'objectif d'apporter une compréhension sur l'influence de la température d'injection du métal liquide dans la fonderie sous pression à chambre froide sur le comportement tribologique de la pièce coulée.

L'étude expérimentale s'est portée sur une caractérisation mécanique, et une analyse tribologique par tribomètre. Ces essais expérimentaux ont été appliqués sur l'alliage AS12 injecté à trois températures différentes, suivis par la dureté, la rugosité, le coefficient de frottement, la trace d'usure, le taux d'usure après le test tribologique et l'analyse des débris d'usure. L'alliage AlSi12 normalisé EN AC 44200 a fait l'objet de cette étude et plusieurs conclusions intéressantes sont tirées :

- ✓ L'augmentation de la température d'injection engendre une amélioration de la dureté de l'alliage eutectique AS12.
- ✓ Les valeurs de la rugosité de nos échantillons de température d'injection différente (T1, T2, et T3) trouvés ont montré une rugosité allant de 0.4 à 0.6 μ m.
- ✓ Le coefficient de frottement est inversement proportionnel à la température d'injection et à la dureté du métal en mouvement.
- ✓ A partir des estimations de poids avant et après le test tribologique, un gain de masse a été observé. Ce phénomène s'explique probablement par le port de la balle de 100C6 utilisée dans les essais.
- ✓ La trace d'usure augmente fortement avec la dureté, et la résistance à l'usure augmente avec l'augmentation de la température d'injection de l'alliage AS12.
- ✓ Les observations par microscope électronique à balayage ont confirmé la présence des sillons de labourages correspondants à une usure abrasive et un mode adhésif.
- ✓ L'analyse par dispersion d'énergie (EDS) est confirmée l'arrachement des intermétalliques et la formation des oxydes et lors du mouvement d'usure.

Références Bibliographiques :

- [1] Michel GARAT, Propriétés des alliages d'aluminium de fonderie, M4675, 2012.
- [2] Dr.S.Bensaada. Manuel fonderie et soudage, 2003.
- [3] Aluminium Taschenbuch.14^e éd, Aluminium Ventrale, dusseldorf, 1988.
- [4] Ouvrage de .f. soetens, welded connections in aluminium alloy structures, heron, vol. 32, n°1, 1987
- [5] C.Pierret. Comportements mécaniques et tribologiques du Ti-6Al-4V traité par implantation d'ions carbone et oxygène multichargés. Développement des moyens associés. Science des matériaux. Université de Caen, 2011.
- [6] G.Murry. Aide mémoire-métallurgie « Métaux, alliages, propriétés ». 2^{ème} édition. Paris: Dunod, 2010.
- [7] M.Grenier, Microstructure et résistance à l'usure de revêtements créés par fusion laser avec gaz réactifs sur du titane, Thèse de maitre des sciences : Université de Laval, 1998.
- [8] N.Fillote, Etude mécanique de l'usure- Modélisation par Eléments Discrets des débits de troisième corps solide -, Thèse de doctorat : Institut national e des sciences appliquées de Lyon, 2004.
- [9] H. C. Meng et K. C. Ludema, "Wear Models And Predictive", 1995.
- [10] F.T. Barwell, "Wear of metals",1958.
- [11] S. K. Rhee, "Wear equation for polymers sliding against metal surfaces",
- [12] G. W. Stachowiak, "Wear: Materials, mechanisms and practice", John Wiley, 2005.
- [13] P. Wriggers, "Computational contact mechanics", Ed. John Wiley, 2002.
- [14] P. J. Blau, "Fifty years of research on the wear of metals", Tribol ,1997.
- [15] M. Zbinden And V. Durbec, "A kinetic model for impact/sliding wear of pressurized water reactor internal components: application to rod cluster control assemblies", 1996.

- [16] N. Brie, "Opérateur de calcul de l'usure", Code Aster, 2009.
- [17] Jean-Denis Brassard, "revêtements nanostructures superhydrophobes en vue d'applications en aérodynamique", université du Québec à Chicoutimi, 2011.
- [18] Kayaba, T., Hokkirigawa, K. and Kato, K., Analysis of the abrasive wear mechanism by successive observations of wear processes in a scanning electron microscope, *Wear*, 110 (1986), p. 419-430.
- [19] D.Apalian, S.Shivkumar, G.Sigworth,«Fundamental Aspects of Heat Treatment Of Cast Al-Si-Mg Alloys»,AFSTransactions,Vol.97,1989,pp.727-742.
- [20] Esnouf C., Caractérisation microstructurale des matériaux - Analyse par les rayonnements X et électronique, Presses polytechniques et universitaires romandes, Edition Metis Lyon Tech, 2011.