

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du Diplôme de Master en génie mécanique  
Ingénierie des Matériaux et des Surfaces

Réalisation d'un tribomètre : application pour la caractérisation  
tribologique des AA5083/Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>

Proposé et encadré par :  
Pr.M.Hadji  
Co-promoteur:  
Mr.A.Benamor

Réalisé par :  
BOUZIDI MED HICHEM  
ARBIA HOUSSAM EDDINE

Année universitaire 2018/2019

# Sommaire

Introduction Générale .....	8
-----------------------------	---

## Etude Bibliographique

### Chapitre I

I.1 Introduction.....	10
I.2 Propriétés physico-chimiques de l'aluminium.....	11
I.3. Les alliages d'aluminium.....	11
I.3.1 Les alliages à durcissement structurales.....	11
I.3.1.1 Série 2000 : (Al-Cu et Al-Cu-Mg).....	13
I.3.1.2 Série 6000 : (Al-Mg-Si).....	13
I.3.1.3 Série 7000 : (Al-Zn).....	13
I.3.2 Les alliages sans durcissement structural.....	13
I.3.2.1 Série 1000 : (99% Al au moins) .....	14
I.3.2.2 Série 3000 : (Al-Mn) .....	14
I.3.2.3 Série 5000 : (Al-Mg) .....	14
I.4. Désignation des états métallurgiques.....	15
I.4.1 État T : traitement thermique.....	16
I.4.2 Les états H : écrouis .....	16
I.5. Caractérisation de l'alliage 5083 H 321 .....	17
I.5.1 Désignations .....	17
I.5.2 Composition chimique .....	17
I.5.3 Caractéristiques mécaniques.....	17

I.5.4 Propriétés d'emploi.....	17
I.6 Les phases MAX .....	17
I.6.1 Historique général.....	17
I.6.2 Structure cristalline des Phases MAX.....	18
I.6.3 Liaisons atomiques .....	19
I.6.4 Microstructure et propriétés du $Ti_3SiC_2$ .....	19
I.6.5 Microstructure du $Ti_3SiC_2$ .....	20
I.6.6 Les propriétés des phases MAX.....	22
<b><u>Chapitre II :</u></b>	
II.1 Introduction .....	24
II.2 TRAITEMENT PAR FRICTION.....	24
II.3 Description du procédé .....	24
II.4 Matériaux composites à matrice métallique.....	26
II.4.1 Eléments constituant d'un matériau composite.....	27
II.4.1.a. La matrice.....	27
II.4.1.b Renfort.....	27
II.5 Typologie des composites à matrice métallique (CMM) .....	27
II.6 Les propriétés des (CMM).....	28
<b><u>Chapitre III :</u></b>	
III.1 Introduction .....	30
III.1.1 Définition fondamentales .....	30
III.2 La friction et l'usure .....	30

III.3 Mécanismes d'usures.....	31
III.3.1 Usure adhésive.....	30
III.3.2 Usure abrasive.....	32
III.3.3 Usure par fatigue.....	34
III.3.4 Usure corrosive.....	34
III.4 Phases MAX en lubrifiants solides.....	34
III.6 Le système $Ti_3SiC_2-TiC-Ti_5Si_3$ .....	36

## **Procédures expérimentales**

### **Chapitre 4**

IV.1 Introduction.....	40
IV.1.1 Tribomètre pion disque.....	40
IV.1.2 Fonctionnement.....	40
IV.2. Diagnostique.....	40
IV.3 Conception solideWorks .....	41
IV.4 Usinage des pièces.....	42
IV.4.1 Pièce 1 la base fix.....	42
IV.4.2 Pièce 2 base mobile.....	43
IV.4.3 Pièce 3 glissière 1 et 2.....	44
IV.4.4 Pièce 4 Montant glissière.....	44
IV.4.5 Pièce 5 pont.....	45
IV.4.6 Pièce 6 Porte pion.....	45

IV.4.7 Piece 7 disque porte éprouvette et anneau de fixation.....	46
IV.5 L'assemblage.....	46
IV.6 Essai de marche.....	47
IV.7 Matériaux utilisés.....	48
IV.7.1 Métal de base (matériaux à traiter).....	48
IV.7.2 Matériau d'ajout (phase MAX $Ti_3SiC_2$ ).....	48
IV.8 Préparation pour le procédé.....	49
IV.8.1 Découpage et usinage de rayure.....	49
IV.8.2 Les outils de FSP.....	50
IV.9 Elaboration d'outils.....	50
IV.10 Procédé de FSP.....	52
IV.10.1 Les paramètres et les configuration appliqués dans le procédé.....	52
IV.10.2 Les étapes d'elaboration du procédé FSP.....	53
IV.11 Préparation des échantillon.....	54
IV.12 Le polissage des échantillons.....	55
IV.13 La caractérisation des échantillons.....	55
IV.13.1 La caractérisation optique.....	55
IV.13.2 Caractérisations tribologiques.....	57
IV.13.3 Paramètres des essais tribologiques.....	57
IV.14 Essais tribologiques.....	58
<b>Conclusions et perspectives .....</b>	<b>61</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>62</b>

## LISTE DES TABLEAU

**Tableau I.1** : propriétés de l'aluminium. [I-2]

**Tableau I.2** : désignation des séries principales des alliages d'aluminium [I-2]

**Tableau I.3** : Différents traitements thermiques et leurs symboles [I-4]

**Tableau 1.4** : La COMPOSITION chimique d'alliage AL 5083 [I-7]

**Tableau I.5** : Résumé des principales propriétés des phases MAX.

**Tableau IV 1** : paramètres de procédé FSP .

**Tableau IV 2** : Les paramètres d'essai tribologique

## LISTE DES FIGURES

**Figure I-1** : répartition des mailles des phase max 211-312-413

**Figure. I-2** microstructure du  $Ti_3SiC_2$

**Figure I-3** Cartographie des différentes structures obtenues (FG, CG et duplex) en fonction de la température de pressage isostatique et du temps de maintien à cette température [I-12]

**Figure II.1** : schéma de procédé de traitement par friction malaxage (FSP).

**Figure II.2** : schéma de procédé de traitement par friction malaxage (FSP).

**Figure III.1.** Schéma représentatif de deux façons dont l'usure adhésive peut arriver ; modèle proposé par [kayaba et kato 1981]

**Figure III.2** Schéma représentatif des deux façons dont l'usure adhésive peut arriver ; modèle proposé par [kayaba et kato 1981]

**Figure III.3** Schéma représentatif de l'usure abrasive.

**Figure III.4** : Variation du coefficient de friction vs. la variation de la température, pour des

**Figure III.5** : un schéma explicatif de la formation du tribofilm dans une matrice renforcée par le  $Ti_3SiC_2$

**Figure III 6** : La formation du  $Ti_3SiC_2$  par rapport à la variation des reactifs TiC et  $Ti_5Si_3$

**Figure III 7** : propriété mécanique de  $Ti_5Si_3$ - $Ti_3SiC_2$  composites.

**Figure IV.1** banc d'essai d'usure.

**Figure IV.2** : Assemblage de tribomètre LERTI09 sur solidworks

**Figure IV.2** : Assemblage de tribomètre LERTI09 sur solidworks

**Figure IV.3** : assemblages des tôles avec soudage.

**Figure IV.5** : plans de base fixe.

**Figure IV.6** : parcages.

**Figure IV.7** ; base mobile.

**Figure IV.8** assemblages de Montant glissière sur la base mobile.

**Figure IV.9** ; Porte pion.

**Figure IV.10** : disque porte éprouvette et anneau de fixation.

**Figure IV.11** : tribomètre LERTI09.

**Figure IV 12** : tôle d'alliage d'aluminium 5083 H111.

**Figure IV 13** : poudre de la phase MAX  $TiA_3SiC_2$ .

**FigureIV14** : A) la tole après usinage B) fraiseuse .

**Fugire IV 15**: l'outil FSP .

**Figure IV 16** : d'une scie automatique.

**Figure IV 17** : usnage d'outils .

**Figure IV 18** : l'austénitisation d'outils de FSP

**Figure IV 19** ;le montage expérimental.

**Figure IV 20** : a) des échantillons enrobé de composite AL/phase Max b) coupe de zone traité .

**Figure IV 21** : coupe de échantiollon pour tribologiea avant et après polissage .

**Figure IV 24** : balance haute précision (département chimie)

**Figure IV 24** : microstructure de composite AA15083/  $Ti_3SiC_2$

## INTRODUCTION GENERALE

Une bonne estimation de la durée de vie des pièces, dans un système mécanique permet d'éviter la panne, qu'une bonne partie d'entre elle est liée à l'usure générée par le frottement, d'où vient la valeur des recherches tribologiques.

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une caractérisation mécanique et métallurgique d'un procédé de traitement surfacique par déformation plastique communément appelé le FSP (Friction Stir Processing) d'un alliage d'aluminium 5083-H111.

Principalement ces caractérisations sont tribologiques. Mais l'absence de dispositif dans nos laboratoires nous a poussé à penser à réaliser un tribomètre et changer avec notre thème de mémoire de fin d'étude.

Le tribomètre pion-disque est l'appareil le plus utilisé pour les tests tribologiques dans les conditions de laboratoire pour but de tester la résistance à l'usure d'un ensemble tribologique formé de matériaux.

Suite aux travaux entrepris par nos camarades dans **UNIVERSITE MOULOUD MAAMERI DE TIZI-OUZOU** de la promotion 2009/2010 on a réalisé un prototype en basant sur leur conception.

Cet équipement devrait permettre au UNSDB de lancer un programme de TP pour nos camarades dans le domaine de la tribologie dans le but de mieux approcher le phénomène d'usure des surfaces par frottement.

# **Chapitre I**

L'aluminium et ces alliages, phase Max

## **1. Introduction :**

La première apparition de l'aluminium était en 1854 lors d'une présentation à l'académie des sciences par le chimiste français Sainte-Claire Deville, sous la forme d'un lingot. Cette pièce avait été obtenue par voie chimique. En 1886 il y'a eu l'invention du procédé d'électrolyse l'aluminium indépendamment, par Paul Héroult (France) et Charles Martin Hall (USA). [I-1]

Depuis, l'aluminium a connu un développement très important grâce notamment à son utilisation dans les industries ayant attrait au transport : aviation, automobile, marine. Il est aussi employé dans l'emballage, le bâtiment, l'électricité, la mécanique...

L'aluminium est un métal très répandu sur la terre, c'est le troisième élément après l'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium.

La bauxite est le minerai le plus utilisé pour obtenir de l'alumine, matière intermédiaire nécessaire à la fabrication de l'aluminium. La bauxite contient de 40 à 60% d'oxyde d'aluminium hydraté mélangé à de la silice et à de l'oxyde de fer. [I-1]

L'aluminium est produit par électrolyse de l'alumine dans de la cryolithe ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) fondue, à environ  $1000^\circ\text{C}$  dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone. [I-1]

L'aluminium se dépose au fond de la cuve avec un titre de 99,7% (les principales impuretés étant le fer et le silicium). Plusieurs procédés de raffinage permettent d'obtenir un titre plus élevé sachant que pour fabriquer une tonne d'aluminium, il faut deux tonnes d'alumine et quatre tonnes de bauxite. [I-1]

En tonnage, la production d'aluminium ne représente que 2% environ de celle des aciers Cependant, ce métal et ses alliages arrivent en seconde position dans l'utilisation des matériaux métalliques. L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qu'en font un matériau remarquable. L'aluminium et ses alliages prennent encore aujourd'hui une place importante dans les différents domaines de l'industrie. Son utilisation s'accroît de jour en jour grâce à ses propriétés particulières [I-1]

Les alliages de l'aluminium apparaissent suivant les deux catégories : [I-2] [I-3]

- Les alliages non trempant : les différents niveaux de résistance sont atteints en agissant sur les phénomènes d'écrouissage et d'adoucissement par recuit ou restauration série 1000, 3000, 5000 ;
- Les Alliages trempant (à durcissement structural) : les différents niveaux de résistance sont atteints en agissant sur les différents paramètres de la trempe structurale : série 2000, 6000, 7000.

**2. Propriétés physico-chimiques de l'aluminium :**

Les Propriétés physico-chimiques de l'aluminium non allié sont résumées dans le tableau I.1

Propriété	Valeur	Unité	Remarque
Numéro atomique	13		
Masse volumique $\rho$	2698	<b>Kg.m<sup>-3</sup></b>	Pureté comprise entre 99.65% et 99.99%
Température de fusion	660.45	°C	Sous 10 <sup>5</sup> Pa
Température d'ébullition	2056	°C	Sous 10 <sup>5</sup> Pa
Capacité thermique massique <b>Cp</b>	897	<b>J. Kg<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup></b>	à 25°C
Conductivité thermique $\lambda$	237	<b>W.m<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup></b>	à 27°C
Coefficient de dilatation linéique $\alpha$	23.1	<b>10<sup>-6</sup>. K<sup>-1</sup></b>	à 25°C
Résistivité électrique $\rho$	26.548	<b>10<sup>-9</sup> <math>\Omega</math> .m</b>	à 25°C
Module de Young <b>E</b>	69	<b>G Pa</b>	
Coefficient de poisson $\nu$	0.33		

**Tableau I.1 : propriétés de l'aluminium. [I-2]**

**3. Les alliages d'aluminium [I-2]**

Il existe un large panel d'alliages d'aluminium. En effet, les 8 familles existantes possèdent différentes propriétés, des compositions différentes et aussi des usages de ceux-ci différents. À l'intérieur de chaque famille, les alliages ont sensiblement les mêmes propriétés et aussi au niveau de la résistance à la corrosion. C'est en effet ce critère qui rend quasiment impossible, pour une application donnée, le changement d'alliage inter-famille mais le changement intra-famille reste possible. Il est possible de noter, avec l'avancement de la technologie, que chaque alliage peut être customisé pour une application particulière. L'ajout des différents métaux permet de renforcer les propriétés de l'aluminium qui restent très limitées pour son utilisation à l'état pur dans certains domaines. Cependant, la quantité d'impuretés doit être contrôlée. En effet, une teneur en impuretés trop élevée influe de manière défavorable sur les propriétés de l'alliage. Le dernier paramètre qui peut changer, endommagement exclu, les propriétés d'un alliage est le traitement thermique.

Il existe deux grands types d'alliage d'aluminium : les alliages de moulage et les alliages de corroyage.

- **Les alliages de moulage** : sont des alliages d'aluminium destinés à être modifiés par des techniques de fonderie. Dans cette famille, deux familles se distinguent. Il y a la famille des alliages de première fusion qui sont élaborés à l'aide de l'aluminium primaire et d'un autre côté la famille de seconde fusion où les alliages sont obtenus par refusions des déchets. [I-2]
- **Les alliages de corroyage** : La famille des alliages d'aluminium de corroyage peut être découpée en deux familles distinctes autant au niveau des propriétés que de la fabrication : [I-2]
  - ✓ Les alliages à durcissement structural.
  - ✓ Les alliages à durcissement par écrouissage.

Dans l'état d'équilibre tous ces alliages forment une solution solide faiblement alliée et des phases intermétalliques telles que  $Mg_2Si$  (phase  $\beta$ ). Il existe deux grandes classes d'alliages d'aluminium déformés plastiquement.

### **3.1 Les alliages à durcissement structurales [I-2] [I-3]**

Les caractéristiques mécaniques maximales de ces alliages sont obtenues par un traitement en trois étapes : chauffage, refroidissement et maintien.

Le durcissement structural obtenu par un processus comporte

- **La mise en solution** : solubiliser les éléments durcissement précipités.
- **La trempe** : c'est à dire un refroidissement rapide interdisant toute diffusion afin d'amener cette solution solide dans un état sursaturé métastable.
- **Vieillessement** : à une température inférieure à la température d'homogénéisation, afin de faciliter le retour partiel vers les conditions d'équilibre.

Les principales familles d'alliages à durcissement structural sont : 2xxx, 4xxx, 6xxx, 7xxx. [I-2]

### 3.1.1 Série 2000 : (Al-Cu et Al-Cu-Mg)

- Durcissement dû à la précipitation de formes transitoires des composés d'équilibre  $\text{CuAl}_2$  et  $\text{CuMgAl}_2$ .
- Excellentes propriétés mécaniques (descendent pour les zones adjacentes aux cordons de soudure).
- En rajoutant Fe + Ni, nous obtenons une précipitation de  $\text{Al}_9\text{FeNi}$  qui nous donne une bonne tenue mécanique jusqu'à  $230^\circ\text{C}$  (fabrication des moteurs à turbine et structures d'avions supersoniques).
- À l'état trempé et vieilli, on a une résistance médiocre à la corrosion.

### 3.1.2 Série 6000 : (Al-Mg-Si)

- Normalement on a un rapport massique  $\text{Mg/Si}=1.73$ , si on a un excès de silicium on augmente les propriétés mécaniques, mais on diminue la résistance à la corrosion.
- En rajoutant Mn + Cr on augmente la résistance mécanique, la ténacité,
- Et on affine la taille des grains.
- En rajoutant Cu ( $< 0.5\%$ ) on monte les propriétés mécaniques.
- Excellente aptitude à la mise en forme à chaud.
- Bonne soudabilité
- Excellente résistance à la corrosion.

### 3.1.3 Série 7000 : (Al-Zn)

- Propriétés mécaniques les plus élevées (après traitement thermique)
- Cu ( $< 2\%$ ) durcit les alliages, descendre trempabilité, soudabilité et ténacité.
- Cr ( $< 0.3\%$ ) : on augmente leur résistance à la corrosion sous tension.
- Grand intervalle de températures de mise en solution
- Faible résistance à chaud.

## 3.2 Les alliages sans durcissement structural [I-2] [I-4]

Différent mécanisme de durcissement intervient dans ces alliages (1xxx, 3xxx, 5xxx) pour moduler les propriétés mécaniques tels que :

- **Le durcissement par écrouissage** : est la modification de l'état structural d'un métal ou d'un alliage résultant d'un corroyage ou d'une déformation plastique localisée à température ordinaire.

Vous pouvez obtenir de restaurer les propriétés initiales de l'alliage après traitement thermique approprié.

- **Le durcissement par addition en solution** : la présence dans le réseau cristallin de l'aluminium d'addition en substitution ou en insertion constitue un obstacle à la déformation et confère à l'alliage des propriétés de résistance mécanique. On peut superposer à ce durcissement un écrouissage.
- **Le durcissement par l'effet de phase dispersée** : lorsque les teneurs des éléments d'addition dépassent leur limite de solubilité, les éléments d'addition se séparent de la matrice riche en aluminium pour former une seconde phase dont l'effet durcissant est d'autant plus marqué lorsque les particules sont plus dispersées dans la matrice et que leur taille est petite.

### **3.2.1 Série 1000 : (99% Al au moins)**

- Propriétés faibles à l'état recuit ECROUISSAGE
- Mise en forme par déformation plastique à froid.
- Excellente tenue en atmosphère humide et marine
- Grande conductibilité électrique et thermique.
- Excellente tenue aux très basses températures.

### **3.2.2 Série 3000 : (Al-Mn)**

- Très facile à déformer.
- Bonne résistance à la corrosion.
- Facilement soudable
- Remplacent l'aluminium non allié de la série 1000 quand on veut des meilleures propriétés mécaniques.

### **3.2.3 Série 5000 : (Al-Mg)**

Un séjour prolongé à la température ambiante ou à une température un peu plus élevée provoque une précipitation de  $Mg_2Al_3$  aux joints de grains, ce qui a des conséquences néfastes sur la résistance à la corrosion. Pour pallier cette tendance, on soumet les alliages à un écrouissage suivi d'un recuit de stabilisation.

- Grande aptitude aux transformations à chaude et à froid.
- Excellente soudabilité.
- Très bonne résistance à la corrosion (on peut le monter encore plus par anodisation)
- Grande qualité de leurs états de surface après polissage et anodisation.

<b>Série Désignation</b>	<b>Élément d'alliage principal</b>
<b>Série 1000 1XXX</b>	<b>99%d'aluminium au minimum</b>
<b>Série 2000 2XXX</b>	<b>Cuivre (Cu)</b>
<b>Série 3000 3XXX</b>	<b>Manganèse (Mn)</b>
<b>Série 4000 4XXX</b>	<b>Silicium (Si)</b>
<b>Série 5000 5XXX</b>	<b>Magnésium (Mg)</b>
<b>Série 6000 6XXX</b>	<b>Magnésium (Mg) et Silicium (Si)</b>
<b>Série 7000 7XXX</b>	<b>Zinc (Zn)</b>
<b>Série 8000 8XXX</b>	<b>Lithium (Li) et autre</b>

**TableauI.2 : désignation des séries principales des alliages d'aluminium[I-2]**

#### **4. Désignation des états métallurgiques [I-4]**

L'état métallurgique d'un alliage, en lien avec ses propriétés mécaniques, résultant de l'application d'un traitement thermique, est représenté par une désignation standard, décrite pour les alliages corroyés. Un traitement thermique est désigné par les lettres suivantes :

**F** : Tel que fabriqué à chaud

**O** : Recuit ou recristallisé

**H** : Ecroui par déformation à froid

**T** : Traité thermiquement

Les états **F** et **O** n'ont pas de subdivision. Les états **H** et **T** sont définis de façon plus précise par des chiffres complémentaires.

#### 4.1 État T : traitement thermique[I-4]

Les traitements thermiques sont résumés dans le **tableau 1.3**

	Traitement thermique		Symbole
<b>Traitement avec mise en solution séparé</b>	Sans écrouissage	Muri	T4
		Revenu	T6
		Sur revenu	T7
	Avec écrouissage	Ecroui	T3
		Revenu	T8
		Revenu et écroui	T9
<b>Traitement sans mise en solution séparé</b>	Sans écrouissage	Muri	T1
		Revenu	T5
	Avec écrouissage	Revenu et écroui	T10
		Ecroui Muri	T11
		Revenu	T12

**Tableau I.3** : Différents traitements thermiques et leurs symboles[I-4]

#### 4.2 Les états H : écrouis [I-5]

La lettre H est suivie par 2 ou dans certains cas 3 chiffres.

Exemples : 5086 H16, 5083 H112.

Le premier chiffre indique le type de gamme thermomécanique. Le deuxième chiffre donne le degré d'écrouissage et donc le degré de caractéristique mécanique. Ce deuxième chiffre a généralement les valeurs suivantes :

- 2 : quart dur (écrouissage  $\approx$  12 %) ;
- 4 : demi dur (écrouissage  $\approx$  30 %) ;
- 6 : trois quart dur (écrouissage  $\approx$  50 %) ;
- 8 : dur (écrouissage  $\approx$  75 %).

L'éventuel troisième chiffre désigne une variante

## 5. Caractérisation de l'alliage 5083 H 321

### 5.1 Désignations

Norme européenne : EN AW-5083 [Al Mg4, 5Mn0,7] [I-6]

### 5.2 Composition chimique

La COMPOSITION chimique est présentée en % dans le **tableau 1.4**

% Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0,40	0,40	0,10	0,4 1,0	4,00 4,90	0,05 0,25	0,25	0,15	Le reste

**Tableau 1.4** : La COMPOSITION chimique d'alliage AL 5083[I-7]

### 5.3 Caractéristiques mécaniques[I-7]

Etat H116 à température ambiante E=6mm

- Résistance : > 305 Mpa
- Limite d'élasticité à 0,2% : > 215 MPa
- Allongement A% : > 10 %

### 5.4 Propriétés d'emploi

Alliage soudable de résistance mécanique intermédiaire qui résiste bien à la corrosion. Bon comportement à basse température jusqu'à -196 °C [I-6]

## 6. Les phases MAX :

### 6.1 Historique général :

Dans les années 1960, le groupe de Hans Nowotny a découvert plus de 30 nouvelles phases de carbures et nitrures, dénommées phases H (ou phases de Hägg). En dépit de cette réalisation impressionnante, ces phases sont restées complètement inexplorées jusque dans les années 1990, période au cours de laquelle Barsoum et El-Raghy [I-8] à l'Université de Drexel (Philadelphie, USA) ont réussi à synthétiser sous forme massive un matériau monophasé de composition  $Ti_3SiC_2$ . Les travaux préliminaires qu'ils réalisèrent démontrèrent que ce matériau possède une combinaison unique de propriétés : il allie de très bonnes propriétés typiques d'un matériau métallique à celles des matériaux céramiques. Ainsi, comme les métaux, ils présentent des conductivités électriques et thermiques élevées et sont usinables à température

ambiante avec des outils traditionnels. Ils sont par ailleurs extrêmement résistants à l'oxydation, possédant une densité faible et une forte rigidité tout comme les céramiques. Plus tard la même équipe a découvert la phase  $Ti_4AlN_3$  [I-9]. Il a été clairement montré que cette phase partage la même structure de base que la phase  $Ti_3SiC_2$ , qu'elle possède des propriétés similaires. Plus généralement, il a été démontré que c'est un très grand nombre de phases possédant des compositions chimiques différentes qui possèdent le même type de propriétés.

Ces différentes découvertes ont conduit à l'introduction d'une nouvelle nomenclature pour ces matériaux désormais appelés les phases  $M_{n+1}AX_n$  ( $n=1, 2, \text{ ou } 3$ ) ou phases MAX où M est un métal de transition, A est un élément du groupe A et X est C (et/ou) N [I-10/I-11]. Depuis, de nombreuses autres phases MAX a été synthétisées et ont révélé des propriétés très inhabituelles entraînant de nombreuses études plus fondamentales.

Ces propriétés étonnantes proviennent de la structure en couches (matériaux nanolamellaires) des phases MAX et de la combinaison des liaisons M-X (métallique iono-covalente) qui sont généralement fortes comparativement aux liaisons M-A. Ces propriétés remarquables en font des matériaux à fort potentiel applicatif même si à l'heure actuelle leurs applications restent encore limitées (éléments de chauffage, contacts électriques, etc.). [I-11].

De nos jours, nous connaissons environ près de 70 phases MAX qui ont été synthétisées généralement sous forme massive par des techniques de métallurgie des poudres mais également, dans de nombreux cas, sous formes de couches minces. Ces phases MAX connues sont souvent triées en fonction de la stoechiométrie (211, 312, et 413 correspondants respectivement à  $n=1, 2$  et  $3$ ) et de la configuration de valence des électrons des éléments M et A, [I-9].

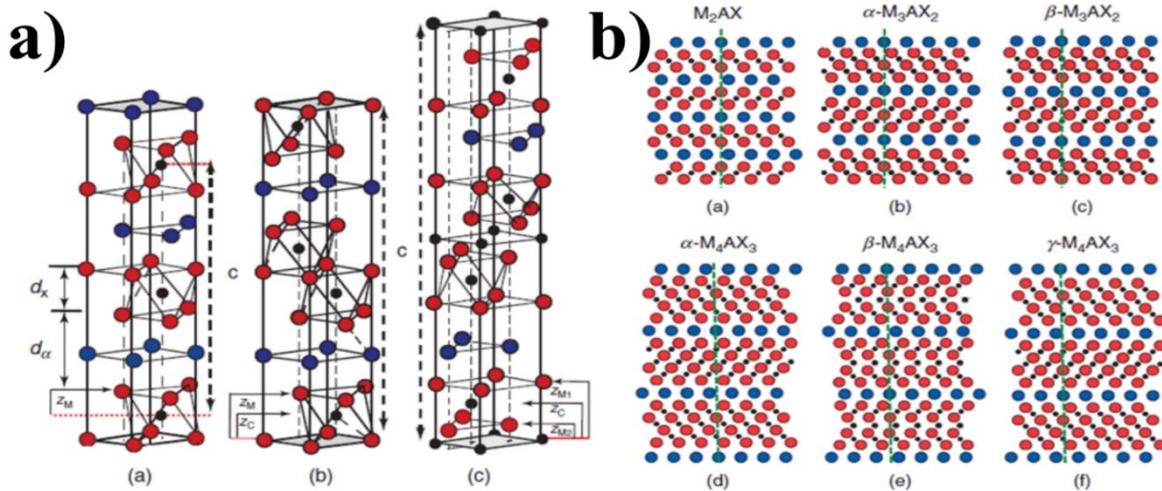
## **6.2 Structure cristalline des Phases MAX :**

Les phases  $M_{n+1}AX_n$  sont des phases lamellaires, avec un réseau cristallin hexagonal figurant dans un groupe d'espace  $P6_3/mmc$ . La figure I.1 a montré les trois structures possibles des phases MAX ou  $n=1, 2, \text{ ou } 3$ . Les atomes de l'élément M (en rouge) forment des octaèdres de groupement  $M_6X$ , ou un atome X se situe au milieu. Ses groupements sont séparés par une couche monoatomique des atomes de l'élément A. L'empilement des couches atomiques des phases MAX est bien plus clair dans la figure I.1 b, ou on peut bien définir le nombre n qui constitue leur formule chimique. [I-12]

### 6.3 Liaisons atomiques :

Les phases MAX représentent les trois types de liaisons atomiques, à savoir : covalente, ionique et métallique. La différence en matière de structure cristallographique et la densité des liaisons atomique, fait la différence en quelques propriétés telles que : la conductivité électrique, rigidité, dureté, comportement tribologique, ...etc. [I-12]

- Liaison covalente : est la liaison la plus forte dans la structure cristalline des phases MAX, elle se manifeste par la liaison entre les atomes M et X. [I-12]
- Liaison ionique : dans les céramiques come le TiC et le TiN, il a été prouvé par Neckel et al. Qu'on ne peut jamais trouver une céramique à caractère 100% covalent. Donc il est clair que les blocs M-X constituent aussi des liaisons ioniques. Par-contre il est aussi supposé que la liaison entre les atomes M-A est à caractère ionique. Les liaisons M-A est une liaison faible par rapport à la liaison covalente M-X, ce qui donne aux phases MAX leur propriétés anisotropiques. [I-12]
- Liaisons métalliques : elle est présente dans les phases MAX entre les atomes M-M, elle est généralement responsable de la bonne conductivité électrique et thermique des phases MAX. [I-12]



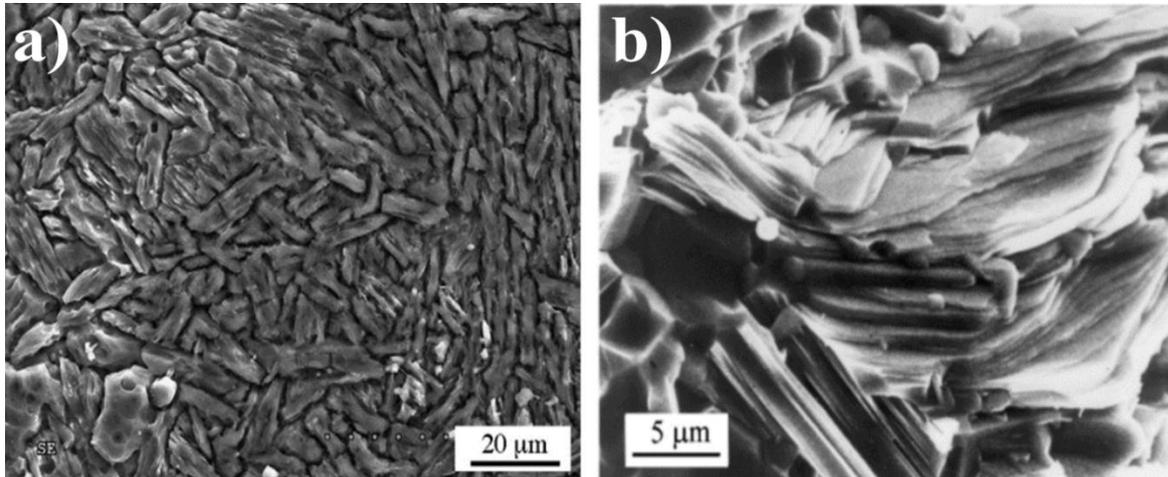
**Figure I-1** : répartition des mailles des phase max 211-312-413

### 6.4 Microstructure et propriétés du $Ti_3SiC_2$ :

Parmi les phases étudiées dans cette thèse est la phase  $M_{n+1}AX_n$  (ou  $M=Ti$ ,  $A=Si$ , et  $X=C$ ) avec  $n=2$ . Cette phase représente la phase la plus caractérisé dans la littérature, elle peut être synthétisé sous différentes formes et par différentes méthodes : HP (Hot Pressing) [I-12], SPS (Spark Plasma Sintering) [I-9], HIP (Hot Isostatic Pressing) [I-13], en massif. Et par : micro-ondes, SHS (Self Propagating High Temperature), sous la forme de poudres. Et par CVD (Chemical Vapour Deposition) et PVD (Physical Vapour Deposition) en couches minces[I-12].

### 6.5 Microstructure du $Ti_3SiC_2$ :

Le  $Ti_3SiC_2$  représente une microstructure typique des phases MAX, avec des grains allongés comme il est présenté dans la figure I-2a. La structure lamellaire (en feuille) du  $Ti_3SiC_2$  est clairement vue lors de la fracture de cette phase sous contrainte mécanique. [I-11].

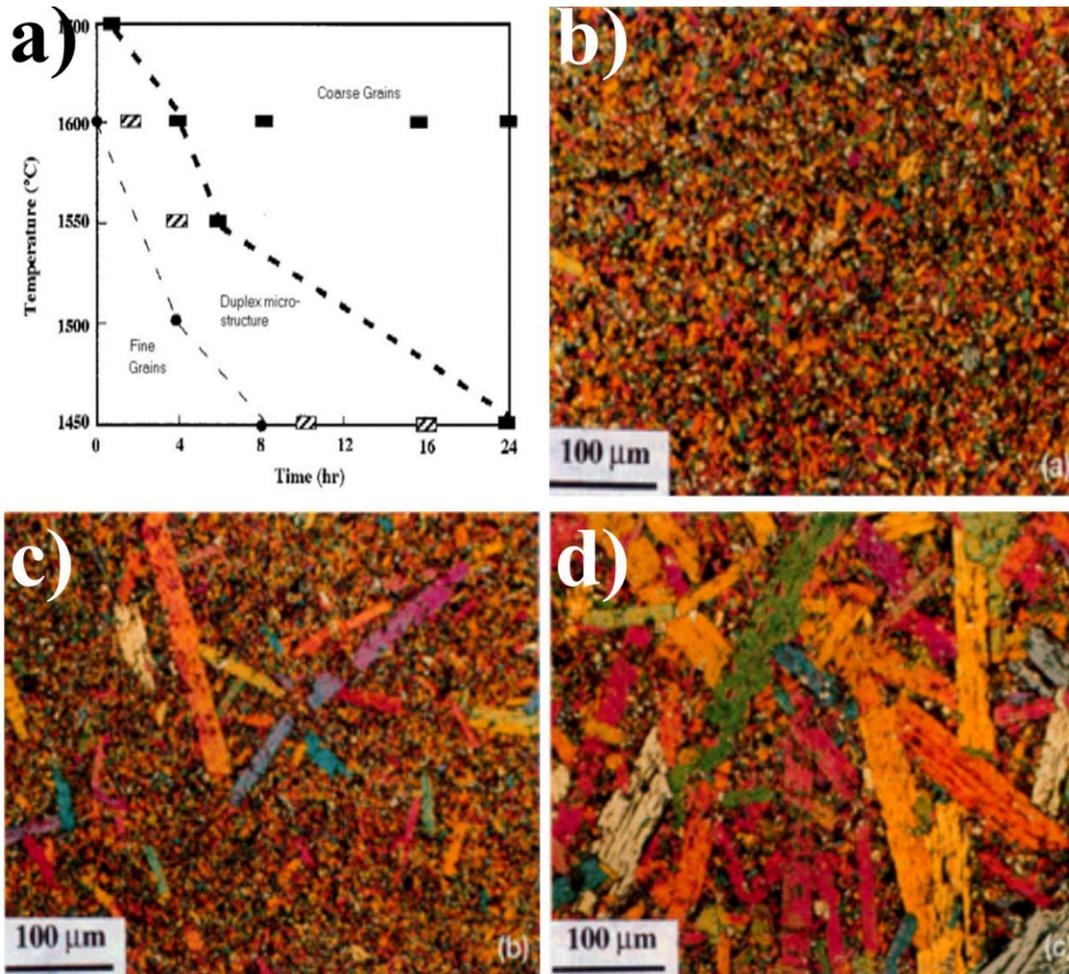


**Fig. I-2** microstructure du  $Ti_3SiC_2$ .

Comme tous matériaux, les propriétés mécaniques du  $Ti_3SiC_2$  sont fortement liées à la microstructure. La taille des grains des phases MAX peut être contrôlé en contrôlant les paramètres de synthèse (Temps, température) [I-13], comme le montre la figure I-3a.

L'évolution de la microstructure du  $Ti_3SiC_2$  a été étudiée par El Raghy et al. [I-9] dans un intervalle de température de 1450-1600°C, l'effet du temps de maintien durant la synthèse est apparent sur la taille des grains. Figure I-3b, I-3c, et I-3d correspondent respectivement à un temps de maintien de 8h, 16h et 24 h. Trois types de microstructure on put être synthétisé :

- 1- Microstructure à grains fins (figure I-3b).
- 2- Microstructure intermédiaire de gros grains intégrés dans une matrice à grains fins (figure I-3c).
- 3- Microstructure à gros grains (figure I-3d).



4-

**Figure I-3** Cartographie des différentes structures obtenues (FG, CG et duplex) en fonction de la température de pressage isostatique et du temps de maintien à cette température [I-12].

### 6.6 Les propriétés des phases MAX :

Le tableau I.5 résume les propriétés des phases MAX : une combinaison exceptionnelle des propriétés des matériaux métalliques et céramiques. [I-12]

Propriétés métalliques	Propriétés céramiques
Excellents conducteurs électriques et thermiques	Résistance à l'oxydation
Très résistants aux chocs thermiques	Bonne résistance aux acides et aux bases
Tolérants à l'endommagement	Bonne résistance à la fatigue
Facilement usinables	Réfractaires à haute température (>1300°C)
Faible dureté	Conservation de l'essentiel des propriétés mécaniques à haute température
Ténacité élevée	grande rigidité et faible densité

**Tableau I.5 :** Résumé des principales propriétés des phases MAX.

La particularité des phases MAX réside dans leurs propriétés exceptionnelles qui résultent de leur structure nanolamellaire et peuvent être résumées comme la combinaison des propriétés des métaux et des céramiques. Les phases MAX sont généralement rigides, légères, et plastiques à haute température. Elles partagent leurs propriétés thermiques, élastiques, chimiques et électriques avec la phase MAX correspondante. Elles sont de bons conducteurs électriques et thermiques et sont résistantes à la corrosion et à l'usure. Les phases MAX possèdent aussi des propriétés mécaniques uniques : tolérantes à l'endommagement, résistantes aux chocs thermiques et usinables. [I-13]

## **Chapitre II**

### Le Traitement par friction malaxage (FSP) Composite Métal-Céramique

### **II.1 Introduction :**

Le traitement par friction-malaxage (FSP) est une technique de surface relativement récente. La technologie qui peut être appliquée à de nombreux métaux, y compris l'aluminium, le magnésium, le fer, Cuivre, titane et alliages à base de nickel [1]. Lorsqu'il est appliqué aux métaux coulés, FSP peut éliminer les défauts de coulée tels que la porosité, et améliorer les propriétés mécaniques de leurs surfaces. FSP est une adaptation de Friction Stir Welding (FSW), un assemblage à l'état solide procédé inventé par Wayne Thomas au Welding Institute UK (TWI) en 1991 [2]. FSP, ainsi que FSW, ne fait pas fondre le métal qui est traité, et c'est un processus à l'état solide.

FSP utilise un outil cylindrique non-consommable avec une broche concentrique à une extrémité. L'outil est tourné et pressé dans une surface matérielle et une combinaison de frottement et adiabatique le chauffage adoucit le matériau, tout en l'exposant simultanément à une action d'agitation, entraînant un mélange homogène et des structures de grains affinées [1, 3-5]. Le volume du matériau traité de cette manière a des propriétés améliorées, telles qu'une résistance accrue, ductilité et résistance à la corrosion [1,3-5]. FSP est actuellement à l'étude pour de nombreuses applications spécifiques d'ingénierie de surface.

### **II.2 TRAITEMENT PAR FRICTION**

La agitation par friction permet de traiter thermo-mécaniquement en une emplacements sélectionnés sur la surface d'un matériau pour améliorer les propriétés spécifiques du matériau. FSP est un dérivé du soudage par friction-malaxage, un procédé à l'état solide pour assembler des alliages d'aluminium sont difficiles à souder par fusion [2]. FSP utilise les mêmes techniques que FSW, mais FSP est utilisé pour modifier la microstructure locale et ne pas joindre les métaux ensemble.

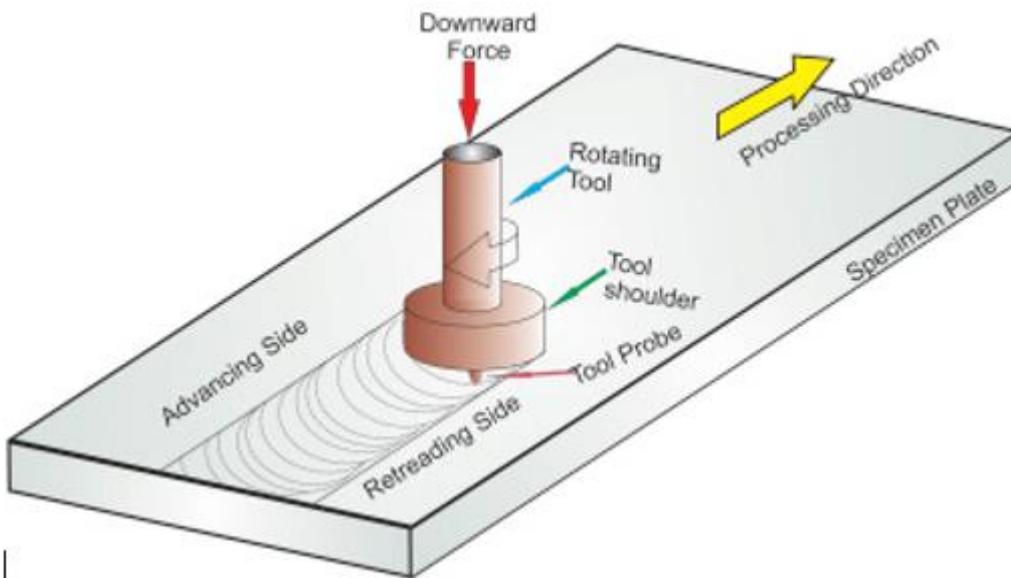
### **II.3 Description du procédé :**

Le procédé de traitement par friction malaxage (FSP), représenté sur la figure 2.1(a), met en œuvre un mandrin tournant qui reçoit l'outil de procédé proprement dit, lequel se présente sous la forme d'un cylindre de révolution en acier à haute résistance comportant un épaulement prolongé par une tige ou une pointe coaxiale, elle-même cylindrique ou tronconique.

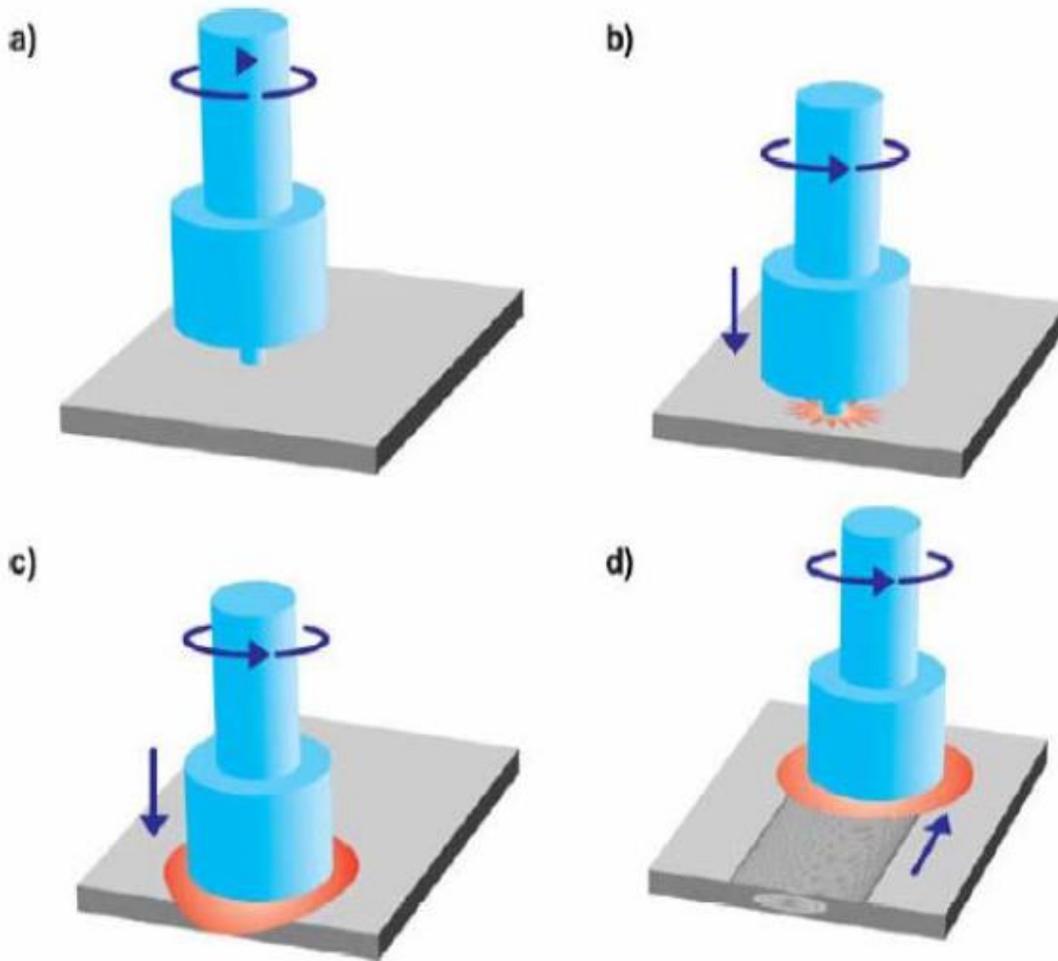
A l'étape 'b', la pointe de l'outil en rotation est plongée dans la pièce et crée de la chaleur. La forme de l'outil consiste en une broche de petit diamètre qui est entièrement insérée dans le métal, et un épaulement concentrique, de plus grand diamètre qui est destiné à empêcher le déplacement vers le haut du matériau à la surface de la pièce.

Lorsque l'outil pénètre dans la surface, la broche rotative crée un échauffement frictionnel et adiabatique. Cette combinaison de chauffage adoucit le matériau de sorte que l'outil peut pénétrer plus loin le Matériel. Au fur et à mesure que l'outil tourne, il induit une agitation et des flux de matière autour de pion. La profondeur de pénétration est contrôlée par l'épaulement et la longueur de pion. L'étape «c» de la figure 2.1 représente le contact de l'épaulement avec la surface de matériaux. Ceci étend la zone chaude en raison du chauffage provoqué par l'épaulement de l'outil en rotation. La contrainte d'épaulement sur l'écoulement ascendant de la matière causée par l'action d'agitation de la broche entraîne une action de forgeage sur le matériau déformant.

La vitesse de rotation et de déplacement de l'outil dépend du matériau et de l'épaisseur des plaques soudées. Généralement, la vitesse de rotation est comprise entre 100 et 1500 tr/ min, et la vitesse d'avance est inférieure au mètre par minute. Cette vitesse de déplacement est toutefois inférieure à celle des procédés par fusion, car la progression de l'outil doit permettre à la matière de fluer correctement de l'avant vers l'arrière.



**Figure II.1** : schéma de procédé de traitement par friction malaxage (FSP).



**Figure II.2** : schéma de procédé de traitement par friction malaxage (FSP).

**II.4 Matériaux composites à matrice métallique :**

Le composite à matrice métallique (CMM) est un terme générique utilisé pour une large classe de matériaux composés d'une matrice métallique ductile renforcée et d'un constituant fragile qui est généralement de la céramique. Les composites à matrice métallique (CMM) ont commencé à être appliqués avec succès dans les industries aéronautiques et aérospatiales depuis les années 70. Leur application dans les industries automobiles date du milieu des années 80. De nos jours, les applications et les variétés de CMM sont de plus en plus importantes. [II-1, II-2]

## **II.4.1 Eléments constitutifs d'un matériau composite**

### **II.4.1.a. La matrice :**

Appelée aussi liante. La matrice a pour fonction d'assurer la cohésion des renforts, de répartir les efforts et même d'assurer la protection chimique. Dans le cas des CMM la matrice est métallique ; les métaux les plus souvent utilisés sont : l'aluminium, le magnésium et le titane, pour les hautes températures c'est le cobalt (parfois allié avec du nickel). La matrice métallique donne au matériau composite de nouvelles propriétés. Les plus communes sont : des meilleures propriétés mécaniques, une meilleure résistance au feu et à la température, une meilleure conductivité électrique et thermique, une résistance aux radiations, une imperméabilité au gaz et à l'humidité. Ils sont utilisés dans des domaines très variés : du foret de perceuse (tungstène) à l'aérospatial en passant par l'automobile. Cependant le facteur qui limite leur exploitation est le coût, bien supérieur à celui des matériaux plus conventionnels. Les recherches sur ces matériaux sont assez récentes (environ une vingtaine d'années) mais ils ont très vite remplacé les matériaux conventionnels dans certaines applications précises : automobile (moteur, frein...) et aéronautique (empennage, train d'atterrissage, turbine...) [II-3].

### **II.4.1.b Renfort :**

Le matériau implanté dans la matrice sous forme de particules ou de fibres pour but d'accroître les propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc.) et d'améliorer des propriétés physiques, tels les comportements au feu et à l'abrasion, la tenue en température ou les propriétés électriques [II-4, II5]. Plusieurs renforts ont été classés suivant leur forme leur dimension et leur nature chimique

## **II.5 Typologie des composites à matrice métallique (CMM) :**

Les CMM à base de particules font partie de la famille des matériaux composites à matrice métallique à renfort discontinu. Les particules de renfort sont sphériques ou polyédriques de diamètre variant de 0.5 à 100 µm. Les CMM sont obtenus directement par mélange des particules de carbure de silicium ou d'alumine au métal liquide ou semi liquide. [II-5]

Les composites à matrice métallique à base de particules sont classés en deux catégories selon la taille des particules de renfort à savoir [II-1] :

- Ceux aux larges particules (plus de 100 µm de diamètre) qui sont pourvus d'une grande résistance à l'usure mais sont aussi très difficiles à usiner.
- Ceux aux petites particules (moins de 50 µm de diamètre) qui ont de bonnes propriétés de frottement et sont moins difficiles à usiner.

Selon la nature des particules de renfort, on distingue [II-1] :

- Les particules molles telles que le graphite et le talc dont l'introduction dans les composites apporte des propriétés de lubrification appréciables.
- Les particules dures telles que le carbure de silicium (SiC) qui ont une grande résistance à l'abrasion mais usent très vite les outils de coupe.
- Les particules d'alumine, intermédiaires entre les deux classes précédentes.

### **II.6 Les propriétés des (CMM) :**

Les CMM à matrice d'alliage d'aluminium renforcée de particules de céramique ont un faible rapport poids/volume, une haute résistance à l'usure, une conductivité et une diffusibilité thermique élevées, propriétés qui font d'eux des matériaux de choix pour l'aéronautique, l'aérospatial et l'automobile.

Les CMM peuvent être modulés de façon à obtenir, en plus d'un rapport poids/volume proche de celui de l'aluminium, l'une ou l'autre des propriétés :

- Une rigidité et une résistance à la déformation comparables à celles du titane.
- Une contrainte d'écoulement et un module d'élasticité d'une fois et demie ceux des alliages d'aluminium à haute résistance.
- Une résistance à l'usure approchant celle des aciers.
- Un coefficient d'expansion thermique qui équivaut à celui de l'acier inoxydable ou du béryllium.
- La présence du renfort en céramique permet d'obtenir un pouvoir d'amortissement élevé et de moduler le coefficient de dilatation thermique de zéro jusqu'à la valeur du métal. Comparés aux céramiques, les CMM particuliers ont une bonne conductibilité thermique et électrique.

Les matériaux composites à matrice d'alliage d'aluminium suscitent depuis longtemps un intérêt dans le secteur de l'automobile pour la réalisation de pièces mécaniques d'usure. Les particules céramiques (carbure de silicium ou alumine) au sein de l'alliage d'aluminium augmentent ainsi la résistance à l'usure du matériau [II-6]. Les propriétés mécaniques des CMAI dépendent de la nature du renfort, de sa géométrie et de leur technique d'élaboration [II-7]. Les composants obtenus par métallurgie des poudres, présentent des propriétés très attrayantes, du fait de l'addition de particules céramiques fines (généralement SiC ou fibres d'alumine): module d'Young très élevé, très bon comportement en fatigue, très bonne résistance à l'usure...etc . [II-8]

**CHAPITRE III**  
ETAT DE L'ART SUR LA TRIBOLOGIE  
DES CERAMIQUES

### **III.1 Introduction :**

Dans ce chapitre il est présenté un état de l'art sur le comportement tribologique des phases MAX et leur composite. En commençant par définir un système tribologique et les facteurs intrinsèque et extrinsèque influençant sur sa performance. A ce jour les phases MAX représente des propriétés lubrifiantes très satisfaisantes et en concurrence avec les matériaux les plus lubrifiants qui existent à ce jour.

#### **III.1.1 Définition fondamentales :**

La tribologie est une science pluridisciplinaire qui regroupe différents aspects allant du comportement mécanique sous effet de plusieurs contraintes et états, jusqu'à la physique des surfaces, et la chimie de la lubrification complexe. [III-1]

La tribologie peut être défini comme la science ou la technologie qui s'intéresse aux phénomènes surgissant entre la surface de deux matériaux ou plus, en contact ou en mouvement relatif. [III-1]

### **III.2 La friction et l'usure :**

La friction est communément utilisée pour décrire la force qui résiste au mouvement de glissement, elle est très importante car elle décrit le mécanisme de perte d'énergie durant le processus de glissement. Bowden and Tabor (1964) ont établis quelques généralités de base sur la friction comme suit :

- 1- La force de friction ne dépend pas de la surface apparente de contact.
- 2- La force de friction est proportionnelle à la charge normale appliquée.
- 3- La cinétique de force de friction ne dépend pas de la vitesse de glissement.

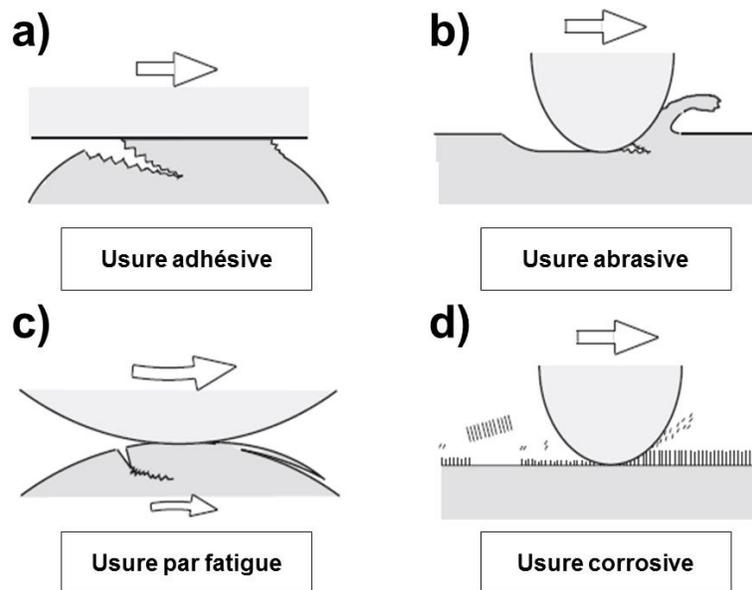
Parmi les paramètres pour définir le comportement tribologique d'un système sont : les forces de friction entre deux surfaces est le coefficient de frottement qui est définit par :  $\mu = F_t / F_N$ . Et la quantification d'usure ou l'usure est la quantité de la matière enlevée lors du glissement, elle peut être exprimé en masse ou en volume. [III-1]

**III.3 Mécanismes d'usures :**

L'usure est un problème majeur lors de la friction des pièces mécaniques dans un système donné. L'impact sur la performance que ça soit technique (dégradation des matériaux, perte d'énergies calorifique, chauffage excessifs, utilisation des lubrifiants, l'utilisation des systèmes complexes, etc.) ou économique (coûts, pertes, etc.). Des transitions de la perte d'usure peuvent arriver dans un système de  $10^{-5}$  à  $10^{-1}$  mm<sup>3</sup>/N.m, ainsi provoquer la défaillance du système [Bushan]. Pour contrôler ça, un choix minutieux des paramètres opératoires, le choix des matériaux ; et les conditions environnementales doit être bien étudié. En science des matériaux il est primordial de comprendre les mécanismes d'usure qui cause la défaillance d'un système tribologique, en partant de l'échelle nanométrique à l'échelle micro et macro-métrique. La caractérisation de l'usure en science des matériaux se fait par l'observation du volume d'usure, les valeurs et es changement du coefficient de friction, la rugosité de la surface usée, les particules libérés lors de l'usure, et la caractérisation de la piste d'usure.

Les mécanismes d'usure les plus reconnus selon Burwell et al : [III-2] sont les suivants :

-Usure adhésive ; Usure abrasive ; Usure par fatigue ; Et usure corrosive.



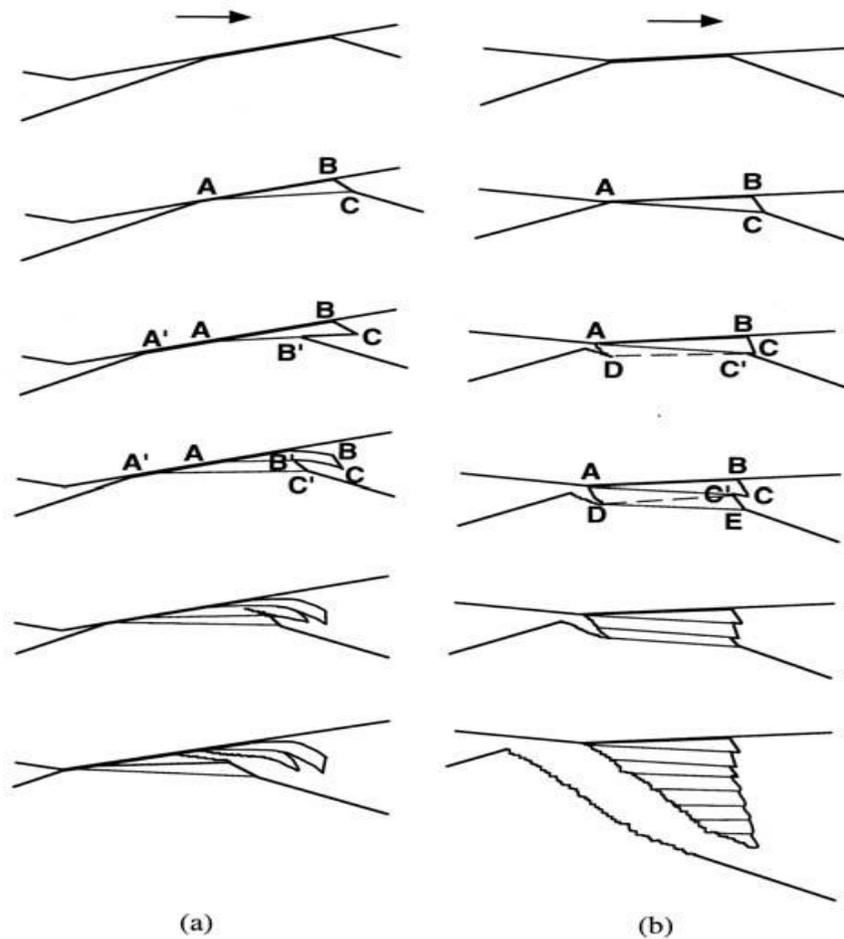
**Figure III.1.** Schéma représentatif de deux façons dont l'usure adhésive peut arriver ; modèle proposé par [kayaba et kato 1981]

Il faut bien distinguer la différence entre ces mécanismes, Burhan et al. a mis la différence entre ces mécanismes comme suit : lorsque le contact génère une déformation plastique, on est soit dans l'abrasive ou l'adhésive. La différence réside que si la surface s'use par micro-cutting l'usure est abrasive, par contre si le mécanisme se fait par forces d'adhésions entre les deux surfaces, ceci est appelé adhésive. Dans le cas où le système se frotte dans un environnement corrosif comme solutions chimiques, on appelle ça l'usure corrosive, alors que lorsque l'environnement est l'air, le mécanisme est appelé usure par oxydation. [III-2]

### **III.3.1 Usure adhésive :**

Sous déformation plastique, si les forces d'adhésion entre les deux surfaces peut résister au mouvement de glissement, les surfaces en contacte peuvent s'arracher. Un autre cas d'usure adhésive est si l'un des matériaux est plus mou comparant à l'autre, et si les contraintes de cisaillement de l'un des matériaux est inférieur aux forces d'adhésion entre les deux surfaces, cela provoquera un détachement et un transfert de matière d'une surface à l'autre.

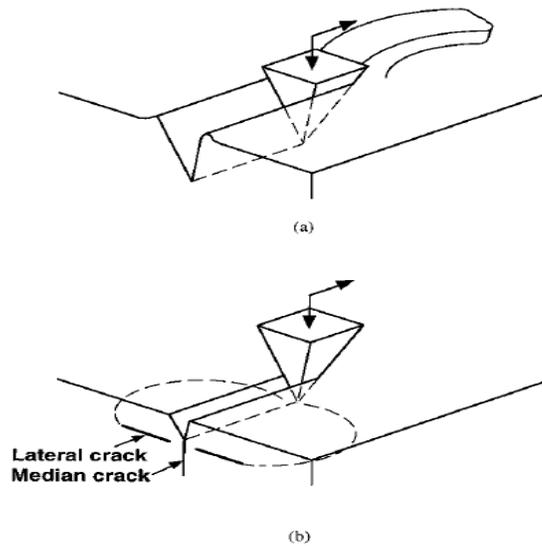
L'usure adhésive peut arriver comme il est présenté sur la **figure III.1** par différents modes [III-1]. La taille et la forme de la particule généré durant l'usure adhésive ne correspond pas toujours à la taille du contacte. Aussi, le matériau qui est relativement plus dur n'est pas loin d'être usé. Cela dépend de la forme macroscopique du contacte, la microstructure des deux matériaux, les contaminations en surface, et autres facteurs [bruhan]. [III-2]



**Figure III.2** Schéma représentatif des deux façons dont l'usure adhésive peut arriver ; modèle proposé par [kayaba et kato 1981]

### III.3.2 Usure abrasive :

S'il y'aura un accrochage entre les aspérités des deux surfaces, le labourage durant le glissement prend place. Par conséquent, un volume de matière est enlevé et une trace de rainure est laissée derrière, comme il est présenté sur la Figure III.2 Ce type d'usure est appelé abrasif. Le modèle présenté en Figure III.2.a est une présentation seulement si le matériau usé est ductile, les débris générés auront un aspect long. Si le matériau est fragile (Figure III.2.b) les débris générés seront à cause d'une propagation de fissure, et quelques les débris aurons des traces de fracture. [III-2]



**Figure III.3** Schéma représentatif de l'usure abrasive.

### **III.3.3 Usure par fatigue :**

Dans ce mode d'usure, les débris ne sont pas générés par une seule passe durant le glissement, les rainures formées ont tendance à être moins claires. Après plusieurs passes de labourage un nombre critique  $N$  de glissement engendrera des fissures adjacentes à la surface du glissement, et le détachement se fera après. [III-2]

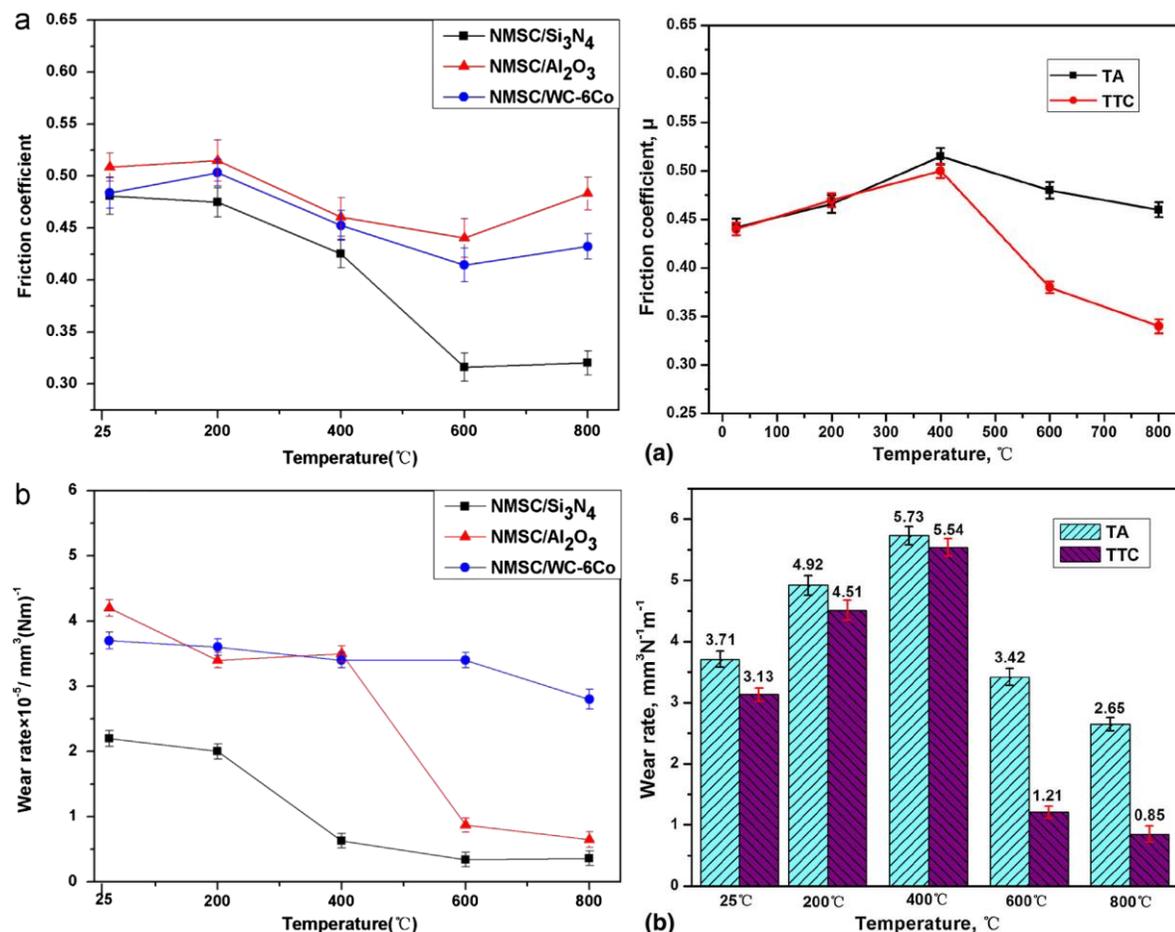
### **III.3.4 Usure corrosive :**

Se fait par la formation d'un tribofilm à la surface de l'un ou des deux matériaux en contact. Ce tribofilm se forme par des réactions chimiques provoquées par les éléments chimiques venant de l'environnement, comme l'oxygène dans le cas d'oxydation sous des conditions atmosphériques (air) ou dans un environnement corrosif comme quelques acides. Des éléments chimiques provenant des acides peuvent se transférer durant le glissement pour modifier la nature du tribofilm formé. [III-1/III-2]

### **III.4 Phases MAX en lubrifiants solides :**

Une autre utilisation des phases MAX dans le domaine tribologique été comme lubrifiants solides intégrés comme particules dans une matrice métallique ou céramique. Shi et al [III-10] a intégré 15% (en pourcentage massique) la phase MAX  $Ti_3SiC_2$  comme particules mous dans une matrice

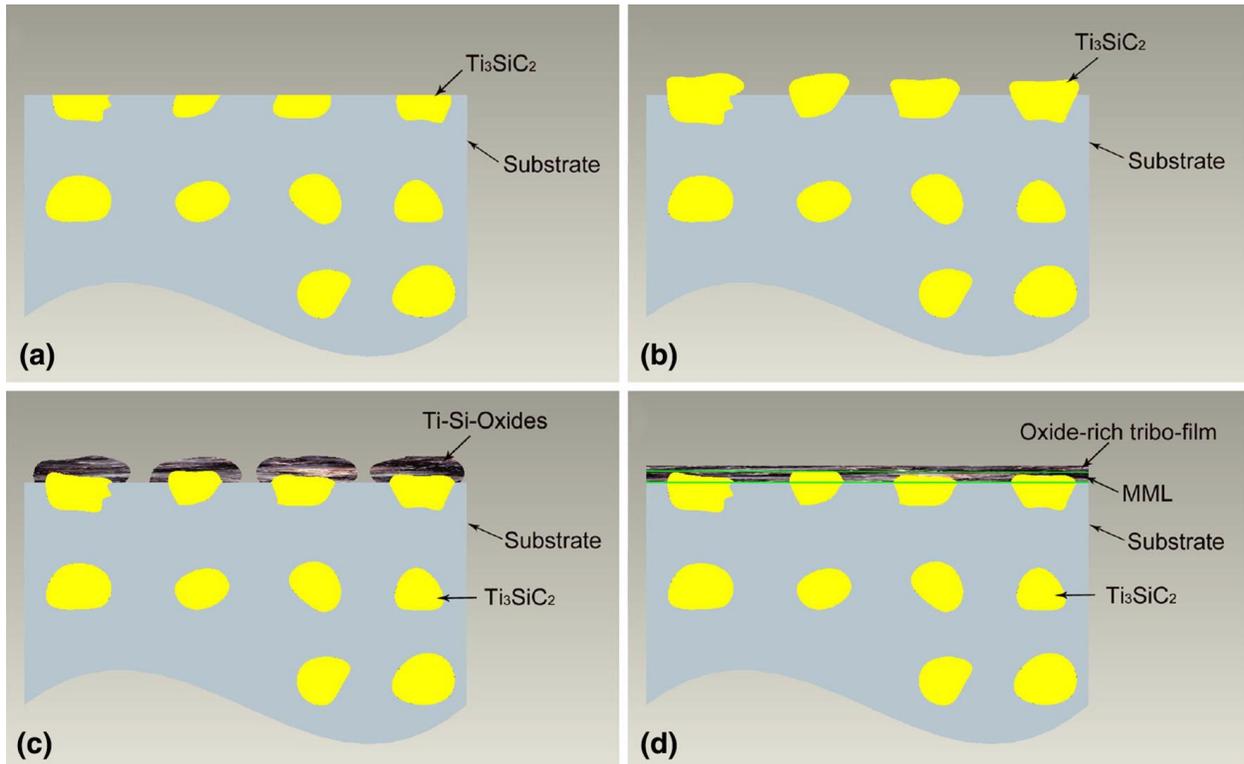
du Ni<sub>3</sub>Al. La phase MAX a amélioré le comportement frictionnel ainsi que la résistance en usure de la matrice céramique à haute température comme il est présenté dans la figure III.12 ainsi Xu et al. [III-9] a pu renforcer une matrice en TiAl par le Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>, et cette dernière a aussi amélioré le comportement tribologique de la céramique seulement à haute température. Le pouvoir lubrifiant de la phase MAX été responsable, dans les deux cas, de former un tribofilme avec un pouvoir très lubrifiant.



**Figure III.4 :** Variation du coefficient de friction vs. La variation de la température, pour descomposites Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> en lubrifiants solide.

La figure suivante représente un schéma explicatif de la formation du tribofilme dans une matrice renforcée par le Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>. Plusieurs recherches ont été faites dans ce contexte en utilisant Le Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> comme un lubrifiant solide, dans une matrice de Ti<sub>3</sub>Al [III-10], NiTi [III-10] Ag [III-9], Cu [III-7] Al [III-6]. Le Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> été toujours responsable de modifier la tribochimie des interfaces

tribologiques étudié par la formation des tribofilms riches en oxydes, présentant dans certaines conditions un pouvoir lubrifiant très important. Les études sont toujours en progression et dépendent de plusieurs facteurs tribologiques : Nature du matériau à renforcer, la nature de l'antagoniste, charge appliqué, vitesse de glissement, humidité, et température.



**Figure III.5 :** un schéma explicatif de la formation du tribofilm dans une matrice renforcée par le  $Ti_3SiC_2$

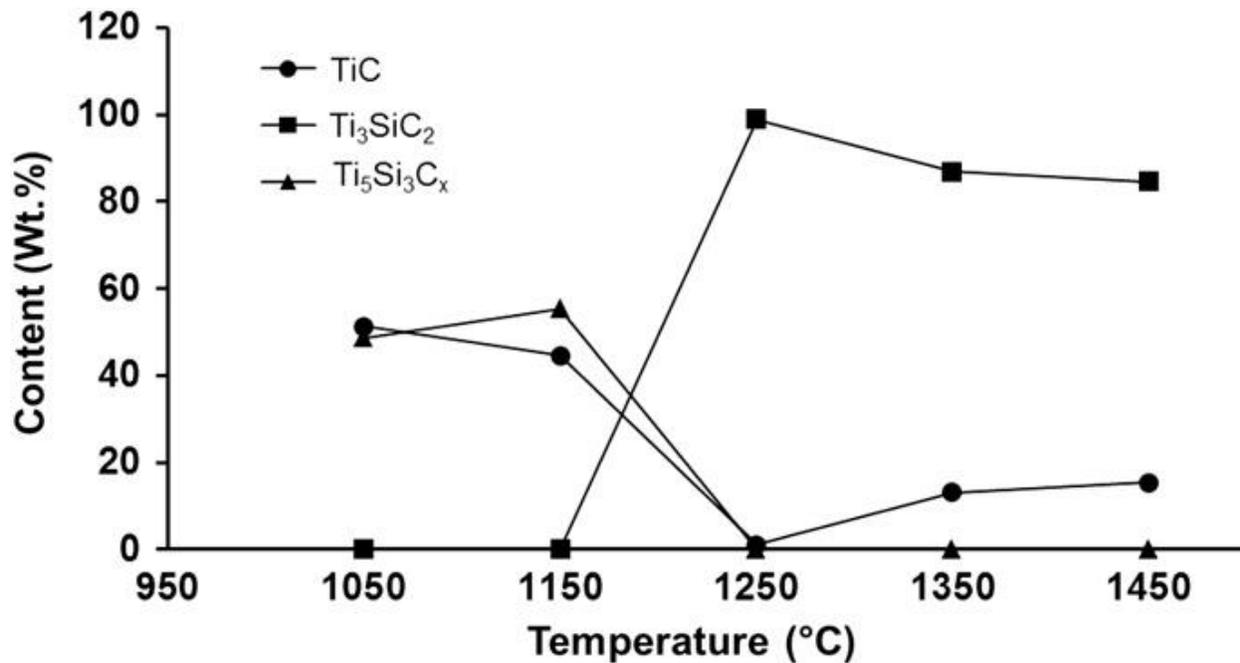
### III.5 Le système $Ti_3SiC_2$ -TiC- $Ti_5Si_3$ :

Les carbures et les silices ont attiré l'attention de la communauté scientifique dans ces dernières années. Ils sont de très bons candidats pour être utilisés à haute température, à cause de leur grand point de fusion, faible densité, résistance au fluage, et leur résistance à l'oxydation à haute température [III-10]. La silice du titane  $Ti_5Si_3$  est une silice qui représente un haut point de fusion ( $2130^{\circ}C$ ), une grande résistance à l'oxydation et à la corrosion, et une bonne résistance au fluage. Comparé au  $MoSi_2$ , qui présente une densité de  $6.3\text{ g/cm}^3$ , l'avantage du  $Ti_5Si_3$  est sa faible densité ( $3.24\text{ g/cm}^3$ ). Le désavantage essentiel du  $Ti_5Si_3$  est sa faible ténacité ( $2.5\text{ MPa.m}^{1/2}$ ). L'un des méthodes étudiées pour améliorer sa ténacité été d'intégrer le TiC comme renfort, Li et al. [III-11]

a introduit 35%TiC comme renforts et la ténacité ainsi que la résistance à la flexion du  $Ti_5Si_3$  a augmenté de 510 MPa et  $4.2 MPa m^{1/2}$ , respectivement.

D'où les études des potentiel applications de ces composites ( $Ti_5Si_3/TiC$ ) a vu le jour. Ces composites ont présenté une potentiel utilisation comme des revêtements résistants à la corrosion et à l'usure, principalement pour l'alliage du Titane  $Ti6AlV4$ .

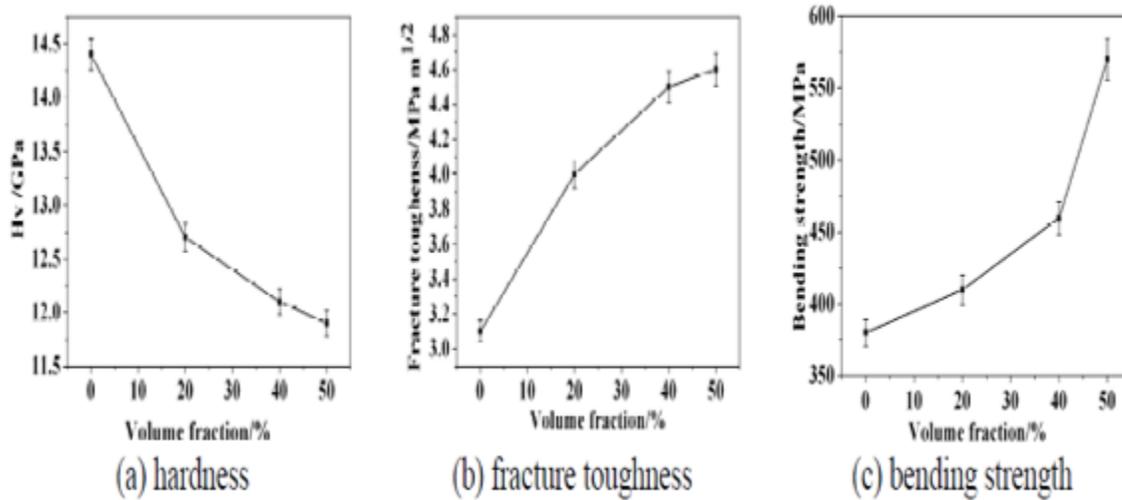
Durant la synthèse de ces composites, le  $Ti_3SiC_2$  été fréquemment trouvé comme une phase mineure ne dépassant pas les 3 pourcents [III-5]. la ténacité de ces composites a enregistré une augmentation de la ténacité à une valeur de  $5.1 MPa m^{1/2}$  [III-7]. Il est présenté dans figure qui suit le travail de Ghosh et al [ III-11]. sur la synthèse du  $Ti_3SiC_2$  par SPS (Spark Plasma Sintering).



**Figure III 6 :** La formation du  $Ti_3SiC_2$  par rapport à la variation des reactifs TiC et  $Ti_5Si_3$

Il est trouvé que le  $Ti_5Si_3$  et le TiC réagissent en formant le  $Ti_3SiC_2$  du  $1150^{\circ}C$  jusqu'à leur complète disparition à  $1250^{\circ}C$ . il est élaboré que la formation du  $Ti_3SiC_2$  est très sensible à la stochiométries des poudres initiales, granulométrie du mélange des poudres [III-11], température et temps de maintien lors de la synthèse [III-8].

D'où les composites du système ternaires TiC/Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> renforcé par Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> ont vu le jour. Chao Qin et al ont étudié l'effet du Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> sur le comportement mécanique de ces composites. La figure X présente leur résultat les plus importants.



**Figure III 7** : réaction et transformation de Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>

Comme il est présenté auparavant la phase MAX Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> représente une dureté de 4 GPa, l'intégration de cette phase dans une matrice plus dure diminue la dureté finale du composite. Quoique l'augmentation du contenu en Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> a été bénéfique pour la ténacité et la résistance en flexion pour les composites Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>/TiC. Ces deux dernières propriétés mécaniques augmentaient avec l'augmentation du contenu du Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>.

## **CHAPITRE 4**

réalisation et application pour la  
caractérisation tribologique

#### **IV.1 Introduction :**

Ce chapitre représente le principal objectif de notre projet. Elle se compose Deux parties ; le premier est consacré à la modification d'une conception d'un tribomètre pion disque de nos camarades **P'UNIVERSITE MOULOUD MAMERI DE TIZI-OUZOU**, et la réalisation. Le deuxième pour une application pour la caractérisation tribologique des AA5083/Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>.

##### **IV.1.1 Tribomètre pion disque :**

Il s'agit du moyen d'étude de la résistance a l'usure et un des méthodes d'étude tribologique la plus courante, Elle a pour but de tester dans des conditions de laboratoire la résistance à l'usure d'un ensemble tribologique formé de deux matériaux, généralement en présence d'un lubrifiant.

La méthode consiste à mettre en rotation un disque à surface plane, formant le partenaire de frottement mobile. Le partenaire de frottement fixe présente une surface sphérique (pion ou bille) Il appuie sur le disque de manière excentré

L'usure générée se manifeste par l'apparition d'un « plat » sur le pion appelé calotte d'usure et d'un sillon circulaire sur le disque.

##### **IV.1.2 Fonctionnement :**

La force appliquée est constante et générée par un poids. La force de frottement est mesurée à l'aide d'un dynamomètre ou un capteur

La vitesse de glissement est maintenue constante ; la rotation est poursuivie jusqu'à ce que le pion ait parcouru une distance déterminée par passages successifs sur le disque typiquement plusieurs centaines de mètres à plusieurs kilomètres

#### **IV.2. Diagnostique :**

Le fonctionnement de tribomètre est simple elle s'agit de combine deux grandeur phtisque la force générée par un poids et une vitesse générée par la rotation de disque, la vitesse peut être varier par le nombre des tours et la position du pion sur le disque.

Donc le tribomètre doit avoir deux fonction essentiel une vitesse de rotation variable et un pion mobile sur le rayon de disque.

D'où vient la solution de nos camardes.

- Solution 1

Un variateur de vitesse + moteur, qui permette d'avoir une vitesse de 1200 t/min (vitesse initiale de moteur) jusqu'à 1 t/min mais en bas vitesse l'échauffement de moteur présente un problème que on a proposé la solution suivante, Un variateur de vitesse + moteur + réducteur, Cette solution

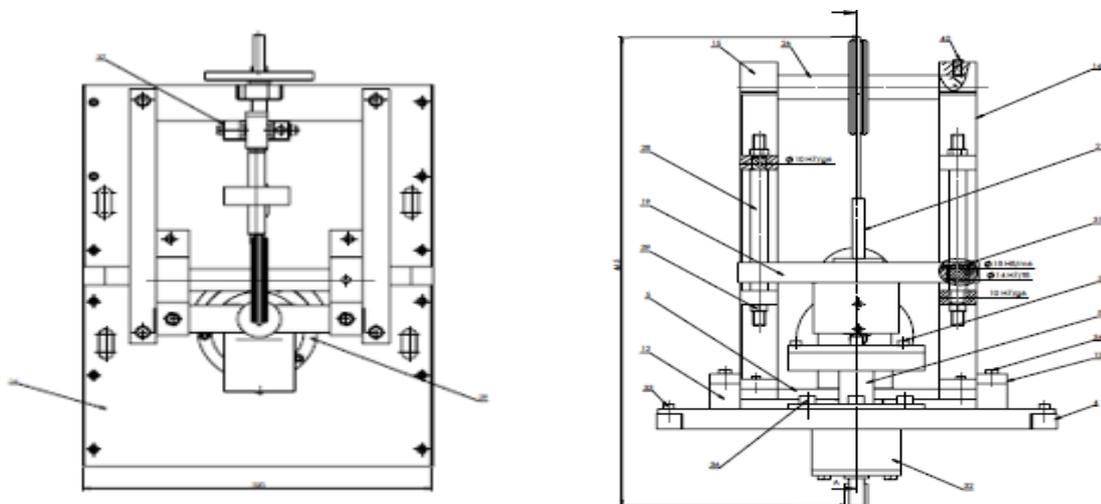
fournit une basse vitesse sur le disque avec une vitesse de moteur suffisamment élevé pour qu'il maintient son refroidissement.

- Solution 2

En posant la masse sur le dispositif de chargement (pan) qui est fixé sur la poutre (base mobile), cette dernière est guidée en translation (verticale) à l'aide des glissières cylindriques fixées sur les deux montants et jusqu'à avoir le contact pion/disque, l'effort sera transmis au pion sous l'effet de la pesanteur, par l'intermédiaire du dispositif porte capteur, et le porte pion.

Le volant assure le déplacement horizontal de la base qui est guidée dans les rainures formées par les glissières nous permet de choisir la piste d'essai et la maintenir par la vis. La solution ou ont combiné les glissières cylindriques avec deux montants en une seule pièce et ajouter deux roulements longitudinaux comme un guide.

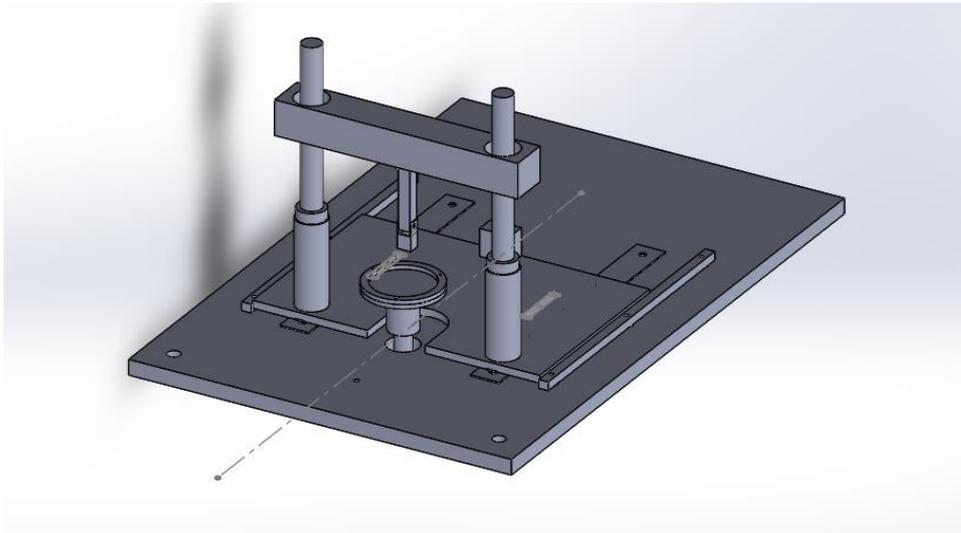
Donc on a commencé par faire une conception ont basée sur le plan original **Figure IV.1**.



**Figure IV.1** BANC D'ESSAI D'USURE.

#### IV.2.1 Conception solideWorks :

La conception solideWorks de toute la pièce était essentiel pour planifier le travail et surdimensionner certaines pièces pour cause de certaines pièces qui ne pouvaient pas être usiné dans l'atelier du a l'absence des outils ou la panne des machine l'université et dans d'autres cas, à modifier les solutions proposées. L'assemblage est présenté dan la **Figure IV.2**



**Figure IV.2 :** Assemblage de tribomètre LERTI09 sur solidworks

### IV.3 Usinage des pièces

L'usinage des pièces de tribomètre a été ou niveau d'atelier d'usinage du département de génie mécanique.

#### IV.4.1 Pièce 1 la base fix :

- Etape 1 la réalisation d'une base fix on acier 400\*800\*20mm composé de 6 tôles de 10 mm d'épaisseur assembler pare soudage a l'arc qui va porter toutes les autres pièces du tribomètre figure IV.3

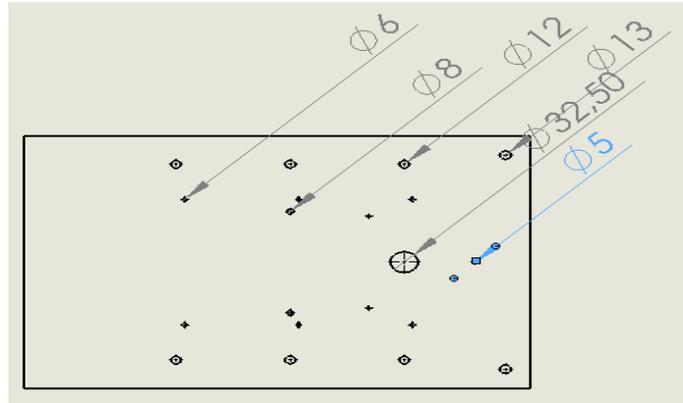


**Figure IV.3 :** assemblages des tôles avec soudage.

## CHAPITRE 4 : réalisation et application pour la caractérisation tribologique

- Etape 2 fraiser la base pour ajuster sa la géomètre et un bon aspect.
- Etape 3 perçage et taraudage.

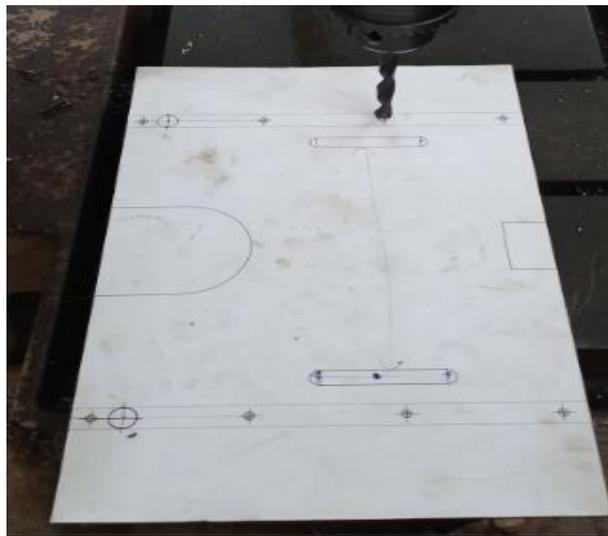
Tout le trou percé vante être taraudé sauf le trou de 32.50mm de diamètre qui va servir de passage pour l'Arber entre le moteur et le port échantillon **Figure IV 5**.



**Figure IV.5 :** plans de base fixe.

### IV.4.2 Pièce 2 base mobile :

- Etape 1 la réalisation d'une base fix on acier en découpée une tôle 200\*300\*10.
- Etape 2 fraiser la Pièce pour ajuster sa la géomètre et un bon aspect.
- Etape 3 perçage et taraudage FigureIV.6.



**Figure IV.6 :** parcages.

- Etape 4 rainure.

Deux rainures de de part en part de 50mm de longeur pour limiter la base mobile.

Deux rainures de 2mm pour fixer deux tôles en acier du bas de la pièce pour servir comme des glissières **figure IV.7**.



**Figure IV.7** ; base mobile.

#### **IV.4.3 Pièce 3 glissière 1 et 2 :**

- Glissière 1 deux tôles en acier de 300\*10 qui va être fixées sur le bus de la base mobile.
- Glissière 2 deux tiges de section carrée en acier de 10\*10\*300 qui va être fixées sur la base fixe pour guider la base mobile.

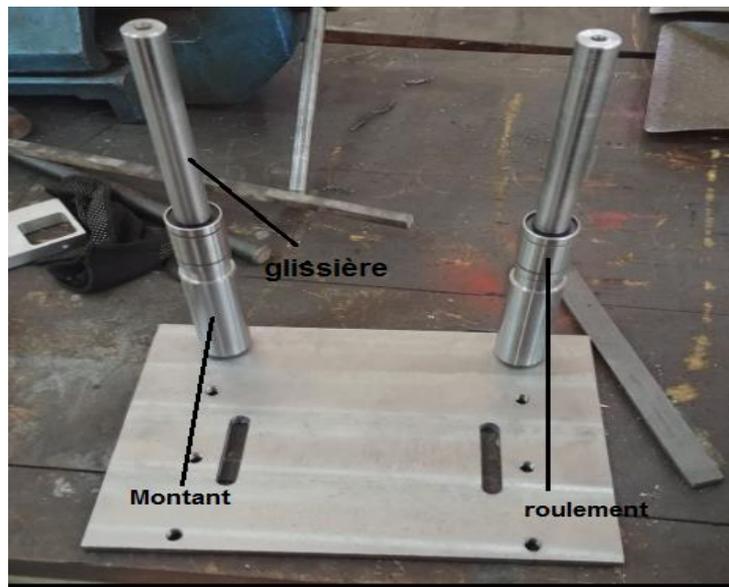
#### **IV.4.4 Pièce 4 Montant glissière :**

Deux pièces cylindriques qui ont un parti montant qui va être fixé sur la base mobile et un parti glissière qui supporte un roulement à billes linéaires **figure IV.8**.

- Etape 1 découpage de deux tubes pleins en acier de 36\*320mm.
- Etape 2 chariotage et dressage deux opérations faites en tour pour ajuster la géométrie de deux pièces et leur dimension.
- Etape 3 chariotage une partie de 200 mm jusqu'à avoir un diamètre de 20 mm qui va servir comme glissière pour les roulements.
- Etape 4 perçage et taraudage.

Perçage et taraudage de la base de la pique pour l'assembler avec la base mobile avec des vis sans tête

#### **Figure IV.8.**



**Figure IV.8** assemblages de Montant glissière sur la base mobile.

#### **IV.4.5 Pièce 5 pont :**

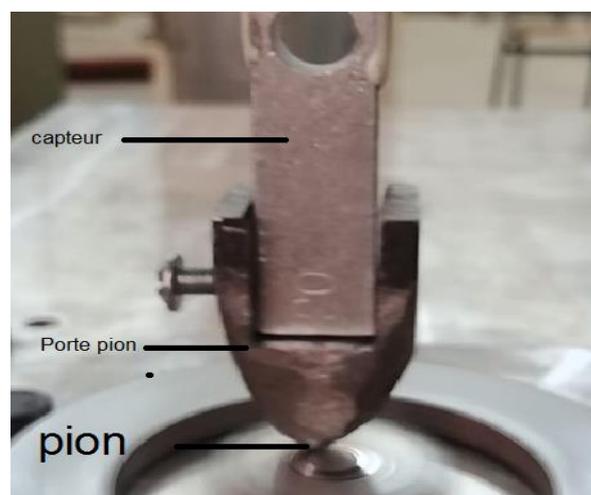
Un tube carré de 300\*40\*60 qui servira pour porter les charges et le porte capteur **figure IV.11**.

- Etape 1 perçage de deux trous de diamètre 32mm.

#### **IV.4.6 Pièce 6 Porte pion :**

Un porte pion qui correspond à la forme de capteur est assuré le contact entre la bille et l'échantillon **figure IV.9**.

- Etape 1 découpage d'une pièce de 15\*15\*40mm.
- Etape 2 rainure de 11mm de largeur et 20 mm profondeur.
- Etape 3 perçage et taraudage.



**Figure IV.9** ; Porte pion.

**IV.4.7 Pièce 7 disque porte éprouvette et anneau de fixation :**

- Etape 1 découpage d'un tube plein en acier de 80\*320mm.
- Etape 2 chariotage et dressage deux opérations fait en tour pour ajuster la géométrie de deux pièces et leur dimension.
- Etape 3 perçage et alésage et découpage en tour pour avoir un anneau de diamètre extérieur de 78 mm et intérieur de 65 mm et 5mm d'épaisseur.
- Etape 4 dressage la surface de découpage.
- Chariotage la partie inférieure de la pièce 35 mm de longueur jusqu'à 35 mm de diamètre.
- Etape 5 perçage et alésage de la partie inférieure un trou de 36mm de profondeur et 16.8mm de diamètre pour assurer un montage serré avec l'arbre de transmission ou moteur de la diamètre 17 mm.



**Figure IV.10** : disque porte éprouvette et anneau de fixation.

**IV.5 Assemblage :**

On a e dispositif de chargement (Pont) qui est fixé sur la Base mobile (p8), cette dernière est guidée et supporté en translation (verticale) à l'aide des glissières cylindriques (p4) jusqu'à avoir le contact pion/disque, l'effort sera transmis au pion sous l'effet de la pesanteur, par l'intermédiaire du dispositif porte capteur, et le porte pion (p6). La base mobile (p2) assure le déplacement horizontal du pion qui est guidée dans les rainures formées dans la base mobile nous permet de choisir la piste d'essai et la maintenir par la vis sur la base fix (p1) **figure IV11.**



**Figure IV.11** : tribomètre LERTI09.

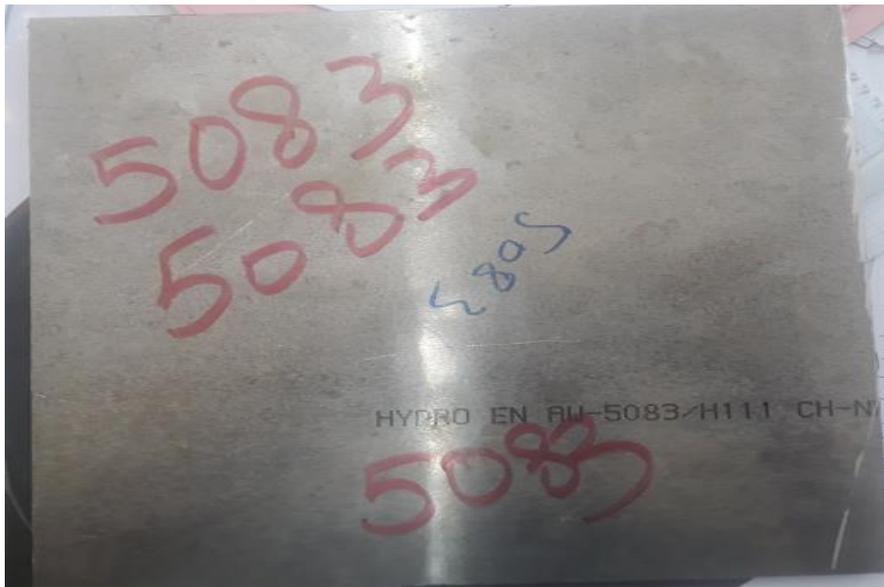
#### **IV.6 Essai de marche :**

Essai de marche sur un échantillon de composites d'Aluminium, L'essai a présenté un succès au niveau de fonctionnement mécanique mais un échec d'équipement électronique du la mort de capteur qui nous avons pu l'obtenir donc la seule donnée qui ont peut extrait avec notre tribomètre et la perte ou gagne de masse on espère que d'autres continuer le travail dans un avenir proche.

**IV.7 Matériaux utilisés :**

**IV.7.1 Métal de base (matériaux à traiter) :**

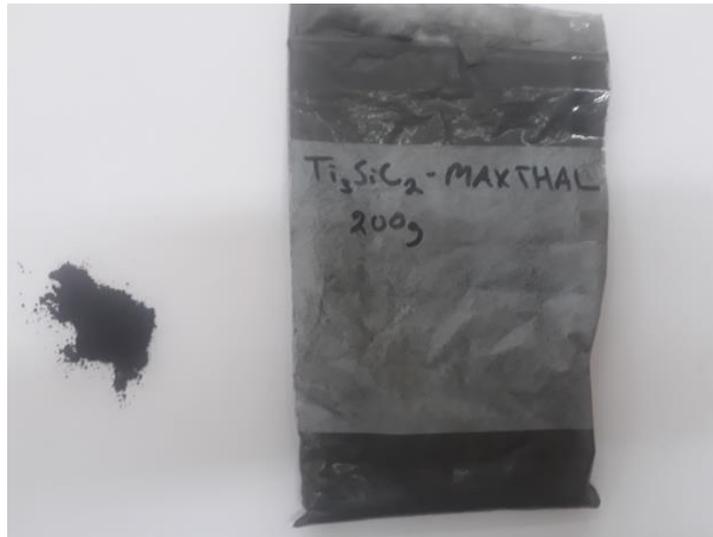
Le matériau utilisé dans ce travail est l'alliage d'aluminium 5083 H111, sous la forme d'une tôle **figure IV 12** pour un traitement par friction malaxage sans et avec l'aide de phase MAX  $Ti_3SiC_2$ , d'où l'aluminium va occuper le rôle de la matrice dans le composite.



**Figure IV 12** : tôle d'alliage d'aluminium 5083 H111.

**IV.7.2 Matériau d'ajout (phase MAX  $Ti_3SiC_2$ ).**

Le Matériau d'ajout est sous forme de poudre phase MAX  $Ti_3SiC_2$  de  $34 \mu$  de granulométrie **figure IV 13**, qui va occuper le rôle de renforce dans le composite.

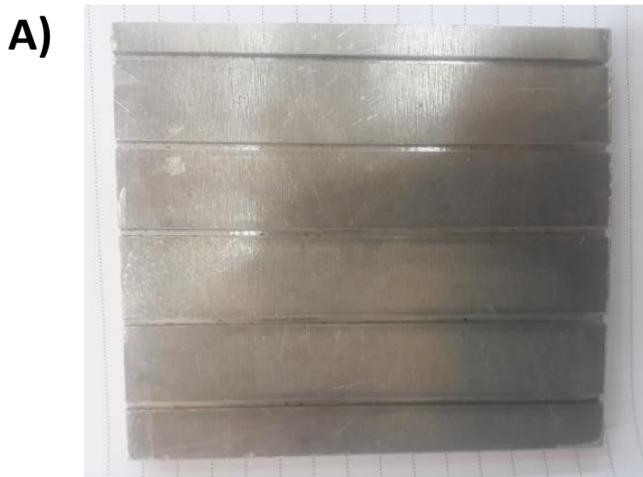


**Figure IV 13** : poudre de la phase MAX TiA<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>.

#### **IV.8 Préparation pour le procédé :**

##### **IV.8.1 Découpage et usinage de rayure.**

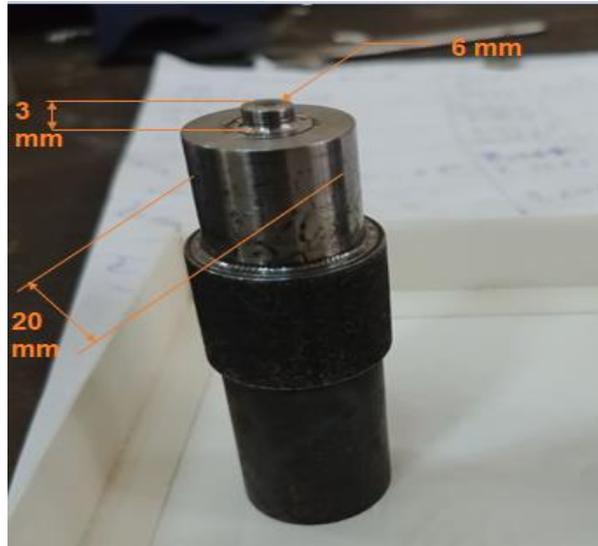
- On découpe la tôle **figure IV 12** a plusieurs carrés de 10\*10 cm pour but de facilité sa manipulation sur la table de fraiseuse
- Pour l'usinage de rayure on utilise la fraiseuse universelle on mode horizontale semi-automatique a l'aide d'une lame de coupe circulaire de 2 mm d'épaisseur **figure IV 14 B**, le procédé est fait en plusieurs passe et la présence de lubrification pour éviter d'affectation thermique, no a réalisé de rayure de 3 mm de profondeur et de 2 mm de largeur sur la surface de la tôle avec une distance de 20 mm entre deux rayures **figure IV 14 A**.



**FigureIV14** : **A)** la tole apré usinage **B)** fraiseuse .

**IV.8.2 Les outils de FSP :**

un outils en acier qui contient un épaulement de 20 mm Ø qui contient un poib ed 6mm Ø et de 3 mm de longueur dans la partie inférieure qui représente des paramètres fixe de FSP **Figure IV 15.**



**Figure IV 15:** l'outil FSP .

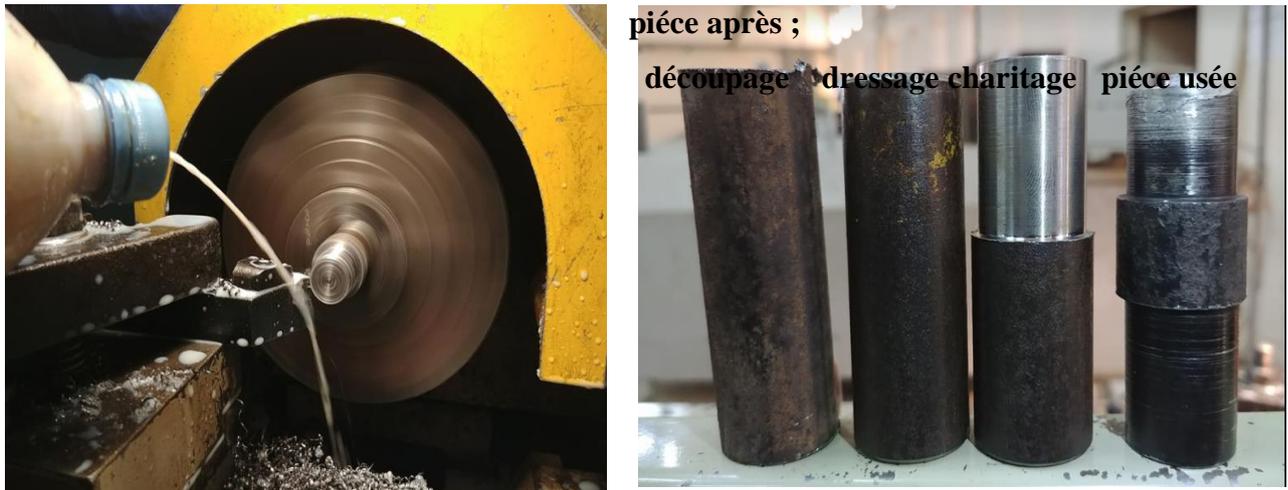
**IV.9 Elaboration d'outils**

- on prend une barre cylindrique d'acier pour découper des morceaux de 60mm a l'aide d'une scie automatique **Figure IV 16.**



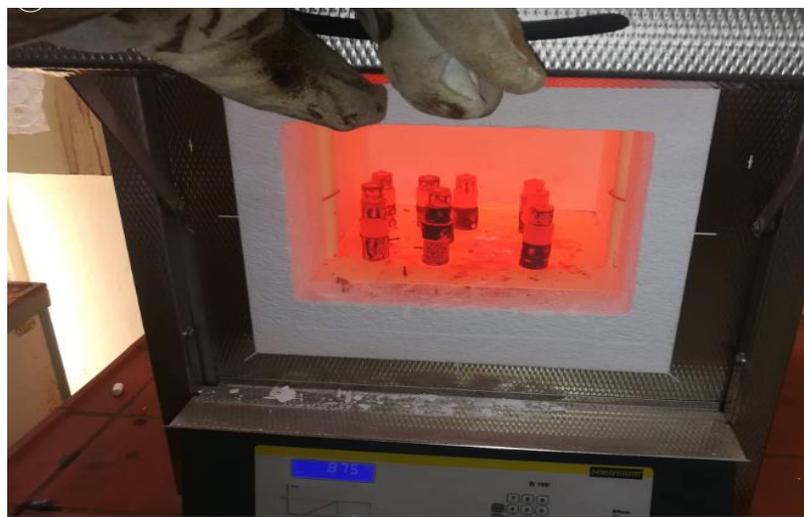
**Figure IV 16 :** d'une scie automatique.

- Usinage d’outils dans le tour après le découpage le dressage et appliqué pour avoir deux surface plane et parallèle , l’usinage de épaulement et pion est obtenu par charitage **figure IV 17** .



**Figure IV 17** : usinage d’outils .

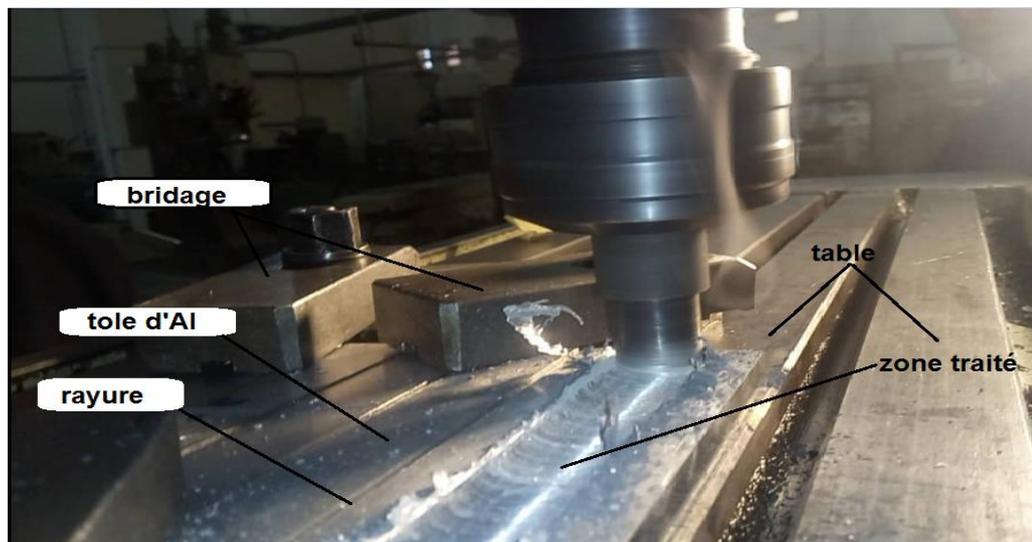
- Après la fabrication d’outils augmente la dureté a été nécessaire pour éviter toute forme de déformation élastique pendant l’opération de FSP et augmente leur résistance à l’usure avec un traitement thermique de trempe .
- Trempe a l’eau 20°C, un chauffage a une température de 900 °C ( jusqu’à l’austénitisation) **figure IV 18**, avec une maintien de 30 min et refroidissement rapide par immersion dans l’eau .



**Figure IV 18** : l’austénitisation d’outils de FSP

### **IV.10 Procédé de FSP**

- **Préparation de la surface** on la poliassant avec un papier abrasif de 800 puo éliminer tous les contaminastion .
- **Rempmisage de la poudre** on remplit le rainures en poudre de la phase MAX  $TiA_3SiC_2$  avec un bon compactage.
- **Montage et procédé** le travail a été fait sur fraiseuse verticale automatique ,le montage est représenté dans **la figure IV 19** et pour cela on fixe la tole d'aluminium sur la table de fraiseuse avec des bridages en tenant compte que la rayure est fixé en parallèle a la mouvement longitudinale de la table.



**Figure IV 19** ;le montage expérimental.

#### **IV.10.1 Les paramètres et les configuration appliqués dans le procédé :**

Après le choix des matériaux l'alliage Al 5080 H111 (traitement thermique et Taux d'érouissage) et la poudre de phase MAX  $Ti_3SiC_2$  ( taille de grain ) et la géométrie de rayure .

Les paramètre restante a optimiser est les configuration d'apliquation vitesse d'avance , la vitesse de rotation de l'outils et nombre de passe d'ou reste lier à la capacité de notre appareil ( fraiseuse ) .

- vitesse d'avance : la vitess d'avance a été fixé a 60mm/s en raison d'une panne de fraiseuse
- vitesse de rotationde l'outils : on a choisé 3 vitesse défiront pour chaque vitesse on a effectué 2 essais ( 1 passe , 3 passe )

• **tableau IV 1.**

Parmètres de procédé	Vitesse de rotation (rpm)	Vitesse d'avance $V_a$ ( mm/s )	Angule de tilt (°)	Nombre de passage
1 rainure ouvert	710	60	2	1 passe 3passes
1 rainure ouvert	900	60	2	1 passe 3passes
1 rainure ouvert	1120	60	2	1 passe 3passes
Témoins FSP sans poudre	710	60	2	1 passe 3passes
Témoins FSP sans poudre	900	60	2	1 passe 3passes
Témoins FSP sans poudre	1120	60	2	1 passe 3passes

**Tableau IV 1** : paramètres de procédé FSP .

**IV.10.2 Les étapes d'élaboration du procédé FSP :**

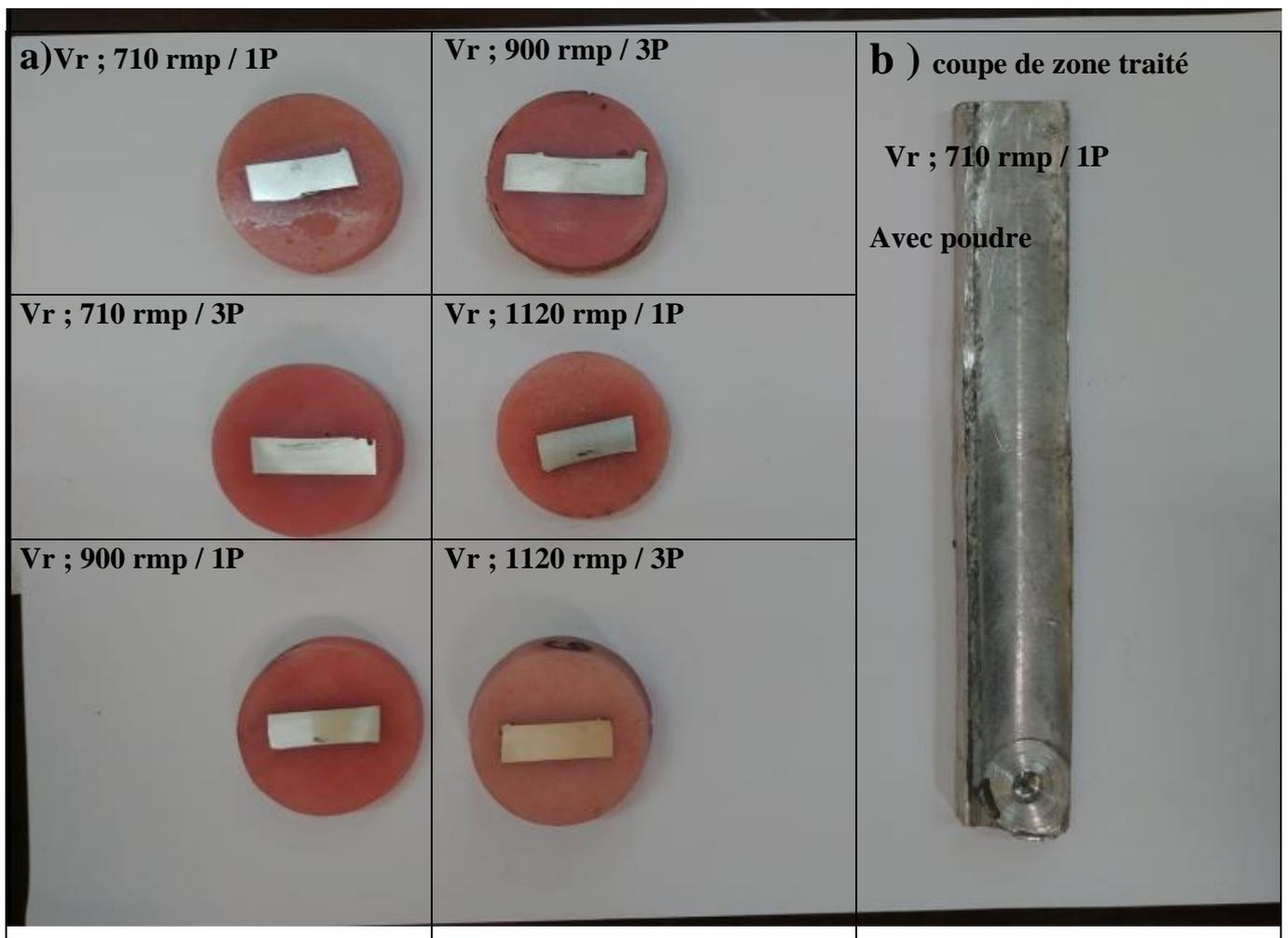
- la pénétration de l'outil ; pendant que l'outil tourne a une vitesse de rotation choisir le pion est placer au milieu de rayure, l'outil est forcé dans la tôle jusqu'à que l'épaulement est pénétré de 1 mm la tôle, cela génère un ramollissement de AL (effet de la chaleur génère par la déformation plastique).
- Le déplacement de l'outil : après pénétration l'outil continue sa rotation avec une vitesse constante, et se déplace avec une vitesse de 60 mm/s suivant la rayure, pendant cela le

pion fait l'action de d'agitation du métal de base et la phase MAX , et l'épaulement maintient la pression où tour du pion **figure IV 19**.

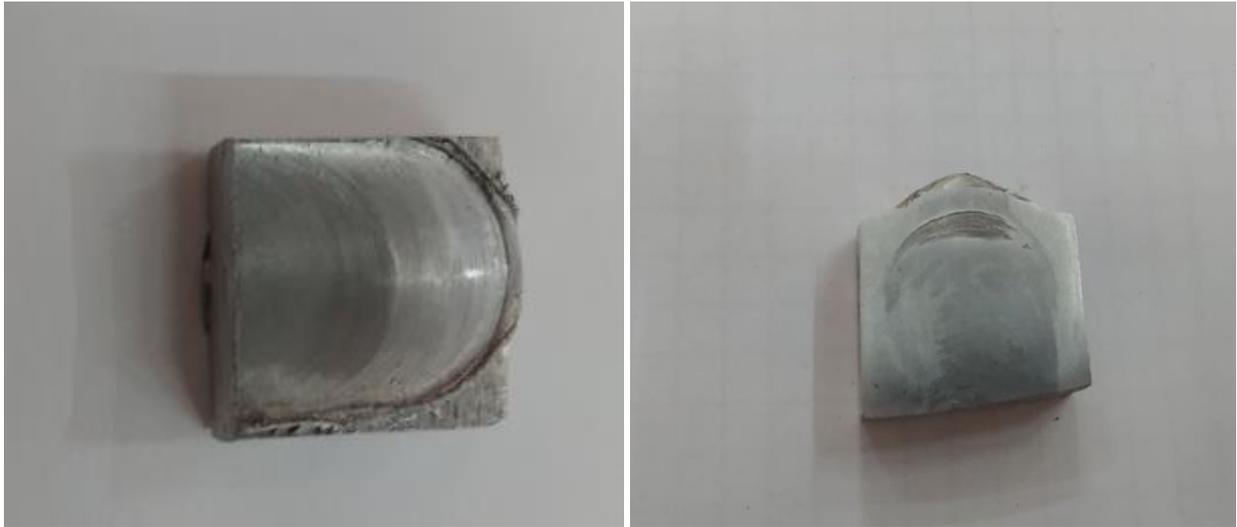
- Le dégagement de l'outil : a la fin de parcours (aven que l'outil sors de la tôle) de rayure l'outil remonte verticalement à la même vitesse de rotation initiale laissant derrière lui une empreinte de pion.

**IV.11 Préparation des échantillon :**

On a découpé les zones traitées chaque une de zone selon c'est configuration **figure IV 20 b** a l'aide de fraiseuse au niveau d'atelier d'usinage du département de génie mécanique après on découpe des échantillons de 20\*20 mm **Figure IV 21** pour les aissés de tribologie et des échantillons pour enrobage destin au contrôle par microscope optique **figure IV 20 a** . l'enrobage a été fait niveau de Centre de Recherech en Technologie Industrielle (CRTI) .



**Figure IV 20** : a) des échantillons enrobé de composite AL/phase Max b) coupe de zone traité .



**Figure IV 21** : coupe de échantillon pour tribologie avant et après polissage .

#### **IV.12 Le polissage des échantillons :**

Le polissage est pour but de éliminer tous sorts de gêne ( rayare ) en rendent la surface plane et brillante en commence par l'enrobage pour les échantillons a examen microscopique et surfacage de échantillon pour tribologie .

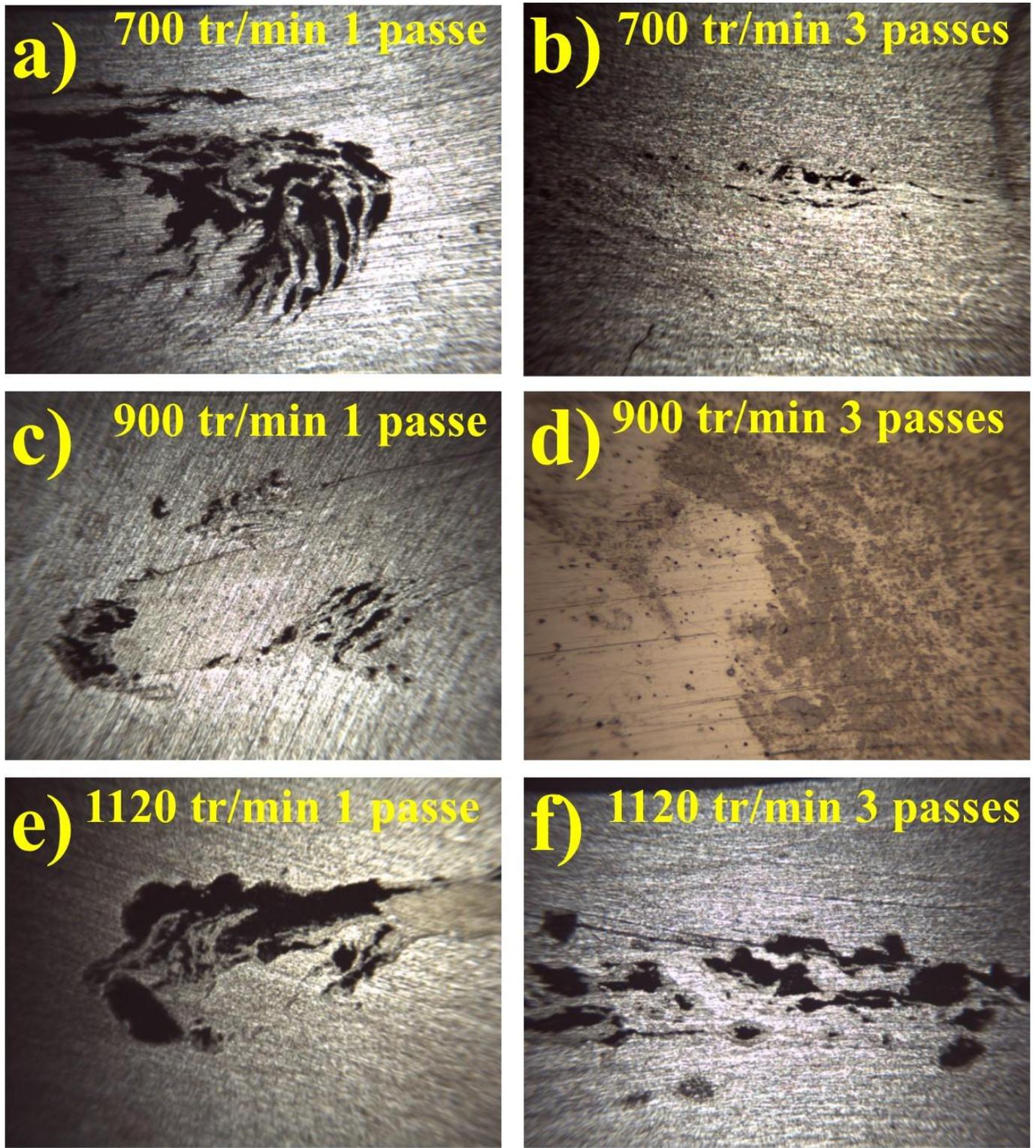
Le polissage a été réalisé a l'aide de polisseuse a double plateau **figure IV 22** , au niveau du labo SDM département de génie mécanique avec des papiers abrasifs de granulométrie.

De plus en plus fin p80 – p 280 – p 400 – p800 – p1200 – p2000.

#### **IV.13 La caractérisation des échantillons :**

##### **IV.13.1 La caractérisation optique :**

Le but de cette observation a l'aide de microscope optique d'échantillons poli enrobé de FSP avec et sans poudre est de Défier Laquelle du paramètres de procédé (FSP) est le plus réussi, cette réussite est réussite et présenté par un minimum des pores et une microstructure homogène (poudre bien mélange). **Figure IV 23.**

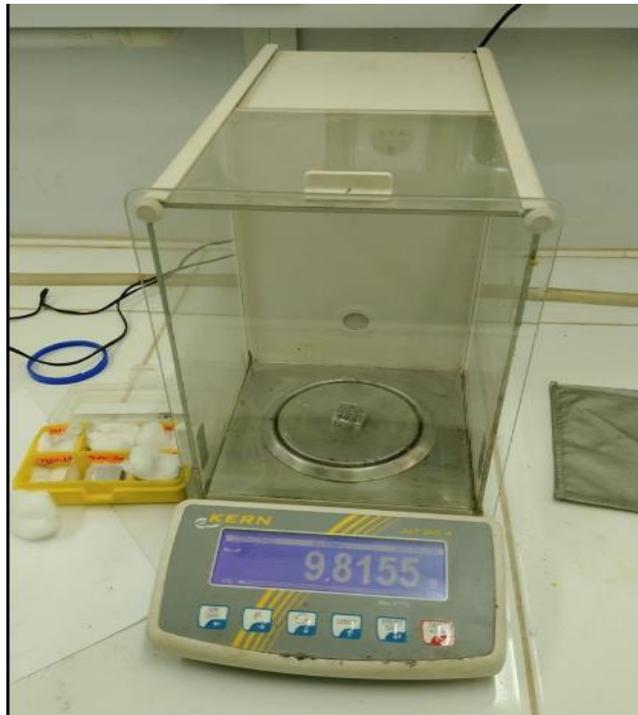


**Figure IV 24 :** microstructure de composite AA15083/  $Ti_3SiC_2$

L'échantillon fabriqué par la vitesse rotative 900 tours/min avec 3 passes a présenté la meilleure microstructure avec moins de défauts et plus d'homogénéité.

### **IV.13.2 Caractérisations tribologiques :**

Le comportement tribologique n'est pas une propriété intrinsèque des matériaux mais dépend des caractéristiques mécanique et structurales de deux matériaux en contact, les essais d'usure ont été réalisés à l'aide d'un tribomètre **Figure IV.13**, les résultats exploitables sont la perte de masse  $\Delta m$  on Pèsent les échantillons avant et après l'essais **Figure IV 24**.



**Figure IV 24** : balance haute précision (département chimie)

### **IV.13.3 Paramètres des essais tribologiques ;**

Les paramètres sont présentés dans le tableau IV 2.

Condition de travail	Charge 6.5N
Temp (min)	5
Rayon (mm)	37.70
Vitesse de rotation (m/s)	0.251
Distance parcourir (m)	75.4
Température	Ambiante
Humidité	Ambiante
Echantillon	Composite Al/MAX -
Bille	Témoins

**Tableau IV 2 :** Les paramètres d'essai tribologique.

#### IV.14 Essais tribologiques :

L'essai consiste de fixer un échantillon de 20\*20 mm (poli) de chacun de paramètres de FSP (6 avec poudre de la phase MAX – 6 témoins) dans le tribomètre **figure IV.25** en suivant les paramètres des essais **Tableau IV.2**, les résultats de perte de masse est présenté dans le **tableau IV.3**.



**Figure IV.25 :** l'empreinte de bille après un essai de tribologie.

Échantillon	m Initial (g)	m finale (g)	$\Delta m$ (g)
V1120/1p avec poudre	8.8629	8.8606	0.0023
V1120/3p avec poudre	7.3629	7.3619	0.010
V900/1p avec poudre	9.0043	8.9938	0.0105
V900/3p avec poudre	9.6092	9.6074	0.0018
V700/1p avec poudre	9.3937	9.3885	0.0052
V700/3p avec poudre	8.1843	8.1837	0.0010
V1120/1p FSP sans poudre	8.9702	8.9689	0.0013
V1120/3p FSP sans poudre	9.8155	9.8151	0.0004
V900/1p FSP sans poudre	8.2600	8.2594	0.0006
V900/3p FSP sans poudre	9.2641	9.2635	0.0006
V700/1p FSP sans poudre	10.4011	10.3985	0.0026
V700/3p FSP sans poudre	8.2081	8.2097	0.0004

**Tableau IV.3 :** Les résultats de perte de masse après tribologie.

Les résultats de l'usure des échantillons fabriqués par FSP sans un renfort en  $Ti_3SiC_2$  ont présenté une meilleure résistance à l'usure par rapport à ceux renforcés par la céramique  $Ti_3SiC_2$ . Ces résultats montre que l'effet de la lubrification du  $Ti_3SiC_2$  n'été pas voyante pour notre cas, ca peut s'expliqué par la faible distance de glissement qui est 75m, là ou le  $Ti_3SiC_2$  joue un role d'un troisième corps abrasive. Il est à proposé que le temps de glissement n'été pas favorable pour l'oxydation des particules du

## **CHAPITRE 4 : réalisation et application pour la caractérisation tribologique** \_\_\_\_\_.

Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>, ces derniers qui sont responsable de la meilleure résistance à l'usure d'un composite à matrice métallique.

Un autre point qu'il faut considérer, c'est qu'il faut utiliser un profilo-mètre pour exclure les erreurs de la balance analytique utilisée.

## **Conclusions et perspectives :**

Ce travail de mémoire de fin d'étude nous a permis de faire les conclusions suivantes :

1-Le tribomètre pion-sur-disque réalisé au seins de notre département a montré un bon fonctionnement pour la caractérisation des échantillons.

2-Le tribomètre nommé LERTI09 a besoins d'être amélioré par les propositions suivante : changer le moteur électrique par un autre moteur plus performant, placer un réducteur et un variateur de vitesse pour assurer une grande marge de vitesses de glissement, continuer le travail sur la partie électronique du tribomètre, ainsi fabriquer un dispositif spéciale pour les essais avec lubrification et tribo-corrosion.

3-L'optimisation des paramètres FSP a donnée une seule configuration optimale (vitesse de rotation : 900 tours/min, vitesse d'avance : 60mm/min, avec 3 passes) pour le bon mélange du renfort céramique ( $Ti_3SiC_2$ ) dans la matrice AA5083-H111.

4- Les tests sur les composites fabriqués a montré que le  $Ti_3SiC_2$  ne peut jouer un role de lubrifiant dans les conditions tribologiques étudiés.

## Références bibliographiques

[I-1] Dr. GHOMARI Fouad. UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID. SCIENCE DES MATERIAUX

DE CONSTRUCTION

[I-2] Aide-mémoire Métallurgie. DUNOD

[I-3] M. AZZOUG, Mémoire de Master, soudage par friction malaxage d'un alliage 2024-T3, Université de SAAD DAHLEB, 2011.

[I-4] Aide-mémoire, science des matériaux, DUNOD.

[I-5] Wikipedia. [fr.wikipedia.org/wiki/Alliage\\_d%27aluminium\\_pour\\_corroyage](http://fr.wikipedia.org/wiki/Alliage_d%27aluminium_pour_corroyage)

[I-6] AUBERT & DUVAL 9300a 5085

[I-7] PLANCAST PLUS Alliage 5083

[I-8] S. Myhra, J.W.B. Summers, E.H. Kisi, Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>– a layered ceramic exhibiting ultra\_ low friction, Mater. Lett. Mater. Lett. 39 (1999) 6–11.

[I-9] Z.M. Sun, Y.C. Zhou, S. Li, Tribological behavior of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>-based material, J.Mater. Sci. Technol. 18 (2002) 142–145.

[I-10] D. Sarkar et B.Basu, Tribological properties of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>, J. Am. Ceram. Soc.,88[11] 3245–3248 (2005)

[I-11] Z.Y. Huang, H.Z. Zhai, M.L. Guan, X. Liu, M. Ai, Y. Zhou, Oxide-film dependent tribological behaviors of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>, Wear 262 (2007) 1079–1085.

[I-12] Barsoum, M. W. The MAX Phases: Unique New Carbide and Nitride Materials. Am. Sci. 89, 334–343 (2013)

[I-13] Xiaoliang Shi et al. Friction and wear behavior of NiAl–10 wt%Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>composites, Wear 303 (2013) 9–20.

[II-1] Gay, D., *Matériaux composites*. 2015 : Lavoisier.

- [II-2] Nathalie VILLAR, J.M., *Élaboration des composites à particules*. 2006: Ed. Techniques Ingénieur.
- [II-3] Kaw, A.K., *Mechanics of Composite Materials, Second Edition*. 2005 : CRC Press.
- [II-4] Ly, E.H.B., *Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose*. 2008, Grenoble, INPG.
- [II-5] Ali Lahoual, *Elaboration et caractérisation d'un alliage Ferro-TiC*, Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2018.
- [II-6] Lepetitcorps, Y., et al., *Forgeage de précision de matériaux composites à matrice d'alliage d'aluminium*. *Matériaux & Techniques*, 1999. 87(3-4) : p. 23-28.
- [II-7] Kaczmar, J.W., K. Pietrzak, and W. Wlosinski, *The production and application of metal matrix composite materials*. *Journal of Materials Processing technology* 2000(106) : p. 58-67.
- [II-8] Kremer, A., *Étude du choix structurel d'outils coupants en diamant revêtu ou polycristallin massif pour l'usinage compétitif et environnemental des composites à matrice métallique et renfort céramique particulaire (CMMP Al/SiC)*. 2009, Arts et Métiers ParisTech.