

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT

SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE

BLIDA 1 FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE MECANOQUE

**Laboratoire d'études et de recherche en technologie
industrielle LERTI**

Projet De Fin d'Etudes Pour l'Obtention Du Diplôme de
Master en

**Génie Mécanique Option Ingénierie des Matériaux et
des Surfaces**

*Etude de comportement tribologiques des composites à base de
polymères renforcés par des céramiques ternaires*

Proposé et encadré Par :

Pr. M.HADJI

Réaliser Par :

ZOUBIRI OUSSAMA

Co-promoteur :

BERBER MESSAOUD

SOUAKRI DHIYA

Année Universitaire 2020/2021

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui on voudrait témoigner toute notre gratitude.

On voudrait tout d'abord adresser toute notre reconnaissance au directeur de ce mémoire, Mr.HADJI MOUHAMED , pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.

On désire aussi remercier les chercheurs au niveau du LERTI Chéraga et spécialement notre Co-encadreur Mr BERBER MESSAOUD qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite et au bon déroulement de notre travail expérimental

On voudrait exprimer notre reconnaissance envers les amis et collègues qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de notre démarche.

Enfin, On tient à témoigner toute notre gratitude à nos familles pour leur confiance et leur soutien inestimable toute au long de notre vie .

Sommaire

Introduction générale	9
-----------------------------	---

CHAPITRE 1: LES POLYMERES ET LES MATERIAUX COMPOSITES

12

1-INTRODUCTION	13
----------------------	----

2-Définition d'un polymère	13
----------------------------------	----

3-Classification des polymères	13
--------------------------------------	----

3-1 Selon leur structure.....	13
-------------------------------	----

3-2 selon les unités.....	14
---------------------------	----

3-3 Selon l'origine	15
---------------------------	----

3-4 selon le comportement avec la température.....	15
--	----

4-La résine époxy.....	16
------------------------	----

4-1 Chimie époxy	16
------------------------	----

4-2 Polymérisation.....	17
-------------------------	----

4-3 Principaux types de résines époxydes	18
--	----

5- Matériaux composites	19
-------------------------------	----

5-1 Définition	19
----------------------	----

5-2 Constituants des matériaux composites	19
---	----

5-2-1 La matrice	20
------------------------	----

5-2-2 Les renfort	20
-------------------------	----

5-3 Composites à fibres.....	20
------------------------------	----

5-3-1 Différentes fibres peuvent être employées avec ces matrices.....	20
--	----

5-4 Composites à particules.....	21
----------------------------------	----

6- Les phases MAX	22
-------------------------	----

6-1 Définition et structure	22
-----------------------------------	----

6-2 Description cristallographique des phases MAX.....	22
--	----

6-3 Microstructure	23
--------------------------	----

6-4 Quelques applications des phases MAX.....	24
---	----

7- Les phase MAB	24
------------------------	----

CHAPITRE 2: TRIBOLOGIE.....

27

1- Histoire de la Tribologie.....	28
-----------------------------------	----

2- Définitions de la tribologie	28
---------------------------------------	----

3- Un système tribologique	28
----------------------------------	----

4- Mécanismes d'usure	29
-----------------------------	----

4-1 Usure abrasive	31
--------------------------	----

4-2 Usure adhésive.....	33
4-3 Usure corrosive.....	34
4-4 Usure par fatigue	34
5-Le paramètre qui influence la tribologie des polymères.....	34
5-1 La charge.....	35
5-2 La vitesse de glissement.....	35
5-3 la température.....	35
6- Tribologies des Composite à base de polymères renforcés par des céramiques MAX....	35

CHAPITRE 3: PARTIE EXMEREMENTAL..... 40

1- Synthèse des poudres de phase MAX cr2AlC par frittage sans pression.....	41
Introduction	41
2- Préparation des composites	41
2-1 Matériel utilisé.....	41
3- Caractérisation par diffraction des rayons-X.....	43
4- Mesure de MICRODURETE VICKERS	44
4-1 Définition.....	44
5- Le polissage	46
6- Etude tribologique	47
6-1 PRESENTATION DU TRIBOMETRE PION-DISQUE.....	47
6-2 Tests tribologiques.....	48

CHAPITRE 4: INTERPRETATION DES RESULATATS..... 49

1- Diffractogramme époxy composite Cr2AlC	50
2- Diffraction des rayons X (DRX)	50
3-Propriétés tribologiques Composite époxy/Cr2AlC.....	51
3-1 Comportement tribologique des échantillons Composite époxy/Cr ₂ AlC.....	51
3-2 La perte de masse	52
4- Composite époxy / MoAlB	52
4-1 Comportement tribologique des composites époxy/MoAlB.....	52
4-2 Perte de masse	53
5- Evaluation de la Dureté.....	53
Conclusion général.....	54

Liste des figures

Chapitre I

Figure 1 : dessin qui résumé les structure des polymères.....	12
Figure 2: (A) Éther Diglycidyl du bisphénol A (DGEBA, nom commercial: EPON 828), (B) Dibsphénol E Cyanate Ester (nom commercial: Primaset LECY), et (C) oligo (3-méthylène-1,5- phénylécyanate ester) (nom commercial: Primaset PT-30). Adapté avec la permi	16
Figure 3 : (A) polymérisation par étapes de l'époxy réalisée par une amine primaire ou secondaire, et (B) initiation anionique de l'extension de chaîne de l'époxy. Adapté avec la permission de . Les monomères époxy avec plus d'un cycle oxirane produisent un réseau therm durcissable.....	18
Figure 4: matériaux composites	20
Figure 5 : Extrait du tableau périodique indiquant les éléments M, A et X pouvant réagir pour former une phase MAX.....	22
Figure 6 : Les trois mailles élémentaires (211, 312 et 413) des phases MAX	23
Figure 7 : Structure nano lamellaire de Ti_3SiC_2 : (a) Déformation des lamelles observée sur une face fracturée ; (b) Analogie avec un jeu de carte déformé par une sollicitation parallèle aux plans des cartes.....	23
Figure 8 : Structures cristallines de diverses phases de MAB et de borures binaires structurellement apparentés : (a) type 212 [Cmmm], (b) type 314 [Pmmm], (c) type 416 [Cmmm], (d) 222- type [Cmcm], (e) type 414 [Immm], (f) CrB/ β -MoB [Cmcm], (g) Cr $_3$ B $_4$ [Immm], et (h).....	26

Chapitre II

Figure 9 : un système tribologie.....	29
Figure 10 :Schéma représentatif des modes d'usure: (a) Usure abrasive par micro coupe d'une surface ductile; (b) usure adhésive ; (c) Flux d'usure accumulé par un flux de cisaillement plastique; (d) Usure par fatigue via l'initiation de fissure et propagation; (e)	30
Figure 11 :Les quatre modes d'usure abrasive.....	31
Figure 12 :Tracé des taux d'usure des MRP (a) m et (b) en fonction de la teneur en Ti_3SiC_2	36
Figure 13 :Coefficient de frottement (μ) en fonction des profils de distance de l'époxy et Composites renforcés Ti_3SiC_2 contre (a) Inconel 718.....	37
Figure 14 :Tracé de m moyens et taux d'usure en fonction de la teneur en Ti_3SiC_2 (% vol) dans la matrice époxy contre (a) Inconel 718, et(b)alumine	37
Figure 15 :La valeur de micro dureté des composites en fonction de la teneur en Ti_3AlC_2	39
Figure 16 : (a) Courbes de coefficient de frottement de l'échantillon en fonction du glissement distance et (b) le taux d'usure des composites en fonction de Contenu Ti_3AlC_2	39

Chapitre III

Figure 17: Schéma d'un diffractomètre en compteur 44

Chapitre IV

Figure 18 :diffractogramme DRX de la poudre Cr₂AlC..... 52

Figure 19 : variation de coefficient de frottement en fonction de la distance 54

Figure 20: histogramme du taux d'usure en fonction des échantillons 54

Figure 21: variation de coefficient de frottement en fonction de la distance de l'époxy pur sous une charge de 5N à une vitesse de 50 cm/s 55

Figure 22: évolution de coefficient de frottement des composites époxy/MoAlB (EP0,EP0.5, EP0,075 et EP1.0) sous une charge de 5N avec une vitesse de 50 cm/s..... 56

Figure 23: histogramme de la perte de masses en fonction des échantillons des composites époxy/MoAlB 57

Figure 24: histogrammes de l'évolution de la microdureté Vickers en fonction des échantillons des composites (a) époxy/Cr₂AlC (EP0,EP1.0, EP2.5, EP5.0) et des composites (b) époxy/MoAlB (EP0,EP0.5,EP0,75,EP1.0)..... 58

LISTE DES TABLEAUX

Table 1: résumé la classification des polymères	15
Table 2 : valeur des paramètres de Cr ₂ AlC et MoAlB.....	49
Table 3: mesure des échantillons de Cr ₂ AlC	49
Table 4: Les valeurs de la dureté des composites époxy/ Cr ₂ AlC	57
Table 5: Les valeurs de la dureté des composites époxy/MoAlB	58

Introduction générale

Les polymères présentent un grand avantage dans plusieurs domaines industriels tels que l'automobile, l'aéronautique, l'électronique, le textile, non seulement pas à cause de leur facilité de mise en œuvre mais aussi à cause de leur faible masse volumique et leur faible coût. Les résines époxy en raison de leurs propriétés comprenant un faible taux de retrait, une force d'adhérence élevée, une résistance à la corrosion, une propriété diélectrique élevée, une stabilité environnementale, un coût relativement faible, etc. sont largement utilisées dans diverses applications. En raison de la forte sensibilité à la corrosion des métaux, divers polymères tels que les résines époxy sont largement utilisés comme revêtements protecteurs sur la surface des substrats métalliques. Cependant, les performances mécaniques et tribologiques des résines époxy sont médiocres. En effet, la résistance à la corrosion et à l'usure des revêtements sont deux facteurs déterminants. De ce fait, l'amélioration de la résistance à l'usure des résines époxy est très importante. A ce jour, de nombreux travaux ont été menés pour améliorer les propriétés mécaniques des résines époxy. Dans la plupart de ces études, l'inclusion de divers renforts tels que des nanotubes de carbone, du graphène, du SiC, de l'Al₂O₃, du TiO₂, du SiO₂, etc. dans les matrices polymériques a été introduite de manière efficace.

Les phases MAX sont des nouveaux matériaux nano-lamellaires qui ont été introduits en tant que céramiques ductiles. Les phases MAX ont les propriétés combinées des métaux et des céramiques. Ces carbures/nitrures ternaires sont connus avec la formule générale du $M_{n+1}AX_n$ où M est le métal de transition précoce, A est l'élément du groupe A, et X_n est le carbone ou l'azote (n=1, 2, 3). Semblables aux métaux, les phases MAX ont une conductivité thermique/électrique élevée et une formabilité élevée. De plus, comme cette céramique, ils ont une résistance spécifique élevée et une résistance à l'oxydation élevée. Dans une autre partie Les phases MAB sont une famille de borures de métaux de transition stratifiés atomiquement ternaires, dans laquelle M est un métal de transition, A est généralement de l'aluminium, Al et B est du bord.

La première phase MAB MoAlB, a été synthétisée en 1966 par Jeitschko, suivi de Mn₂AlB₂ et Fe₂AlB₂ plus tard, ces phases ont fait l'objet d'un regain d'intérêt en raison de leurs propriétés magnéto-caloriques uniques, de leur résistance à l'oxydation à haute température et de leur rôle de précurseur des borures 2D de type MX₂.

Les phases MAX et MAB en raison de leurs propriétés exceptionnelles peuvent être présentées comme le candidat approprié pour améliorer les propriétés des revêtements polymères dans différentes conditions. Toutes Les études qui ont été rapporté sur le renforcement des polymères par les céramique ternaires (phases MAX et MAB) ont conduits à une amélioration considérable des propriétés mécaniques et tribologiques des polymères notamment les résines époxy. Les phases MAX Ti_3SiC_2 et Ti_3AlC_2 et la phase MAB et $MoAlB$ sont les phases MAX les plus couramment utilisées dans diverses applications. Cependant, les travaux exécuté sont principalement utilisé la phase Ti_3SiC_2 MAX comme renfort phase d'amélioration des propriétés des composites à base de polymères.

Le but de ce travail est la synthèse de la phase MAX Cr_2AlC et d'étudier son effet avec des particules de la phase MAB $MoAlB$ sur les propriétés mécanique et le comportement tribologique de la matrice époxy.

Ce mémoire est organisé comme suit :

➤ Un premier chapitre consacré à une étude bibliographie est composée de deux parties; La première partie sur les généralités des polymères et matériaux composites.

Une deuxième partie sur les phases MAX (l'historique de leur invention et de leur développement) , ainsi les phases MAB et leurs caractéristiques.

➤ Un deuxième chapitre consacré à une étude tribologique est composée de trois parties ;Premier partie expose sur la tribologie ; (historique, système tribologique et mécanisme d'usure).

Une deuxième partie traitant les paramètres qui influence la tribologie des polymères.

Troisième partie sur la tribologie des Composite à base de polymères renforcés par des particules des phasesMAX et MAB.

➤ Un troisième chapitre est consacré au travail expérimental de notre étude. Ainsi , les différentes techniques expérimentales utilisées et le protocole de synthèse de les phases(MAX Cr_2AlC , MAB $MoAlB$) et la méthode suivie pour l'étude de son comportement en usure.

- Un quatrième chapitre est dédié aux résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette étude et à leur discussion et interprétation.

Dans ce travail, les propriétés mécaniques des échantillons ont été évaluées par des mesures de micro-dureté. De plus, les performances tribologiques des échantillons ont été étudiés à l'aide d'un tribomètre bille sur disque.

CHAPITRE : 1

POLYMERES ET MATERIAUX COMPOSITE

1- INTRODUCTION

Les matériaux polymères sont généralement utilisés pour leurs propriétés mécaniques particulières et leur aptitude à être mis en œuvre. Ces qualités sont étroitement liées à leur structure et il est possible, à partir d'une structure moléculaire donnée, d'imaginer la morphologie qui en découle et les propriétés qui s'y rattachent. Ce chapitre a pour objet une présentation des principales généralités sur les polymères, et en particulier le polystyrène.

2-Définition d'un polymère

Le terme polymère (du grec *polus* qui signifie « nombreux, plusieurs » et *méros* qui signifie « unité, partie ») ; qui sont typiquement regroupés en un matériau formé par la répétition d'un très grand nombre n de petites molécules de faible masse moléculaire appelées monomères.

- **Le monomère** est une molécule de base (pouvant être par exemple non saturée ou cyclique ou encore comportant des fonctions réactives à ses extrémités. [1])
- **Le terme macromolécule** est souvent utilisé à la place de polymère.
- **La polymérisation** est la réaction qui, à partir des monomères, forme en les liants des composés de masse moléculaire plus élevée, les polymères ou macromolécules.

3-Classification des polymères

3-1 Selon leur structure

➤ Structure cristalline

La structure cristalline est caractérisée par une distribution périodique régulière des particules constituant le matériau (ordre à longue distance, réseau cristallin). L'ensemble des matériaux métalliques et un grand nombre de céramiques ont une structure cristalline [2]

➤ Structure amorphe

La structure amorphe est une structure dense et peu ordonnée, elle est de type pelote statique dans laquelle on ne distingue aucun ordre à grande échelle. Cette structure est rencontrée dans certaines céramiques ainsi que dans de nombreux polymères organiques [2]

➤ Structure semi cristalline

Cette structure est une structure complexe caractérisée par la coexistence de phases amorphes et cristallines en proportion variable (présence de cristallinité). Cette structure est rencontrée dans de nombreux polymères organiques [3]



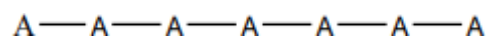
Figure 1 : dessin qui résumé les structures des polymères [4]

3-2 Les polymères selon les unités

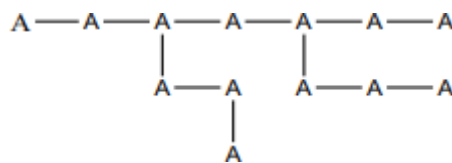
➤ Les homopolymères

Un homopolymère est une grosse molécule composée d'un ensemble d'unités (appelé chaines).[5]

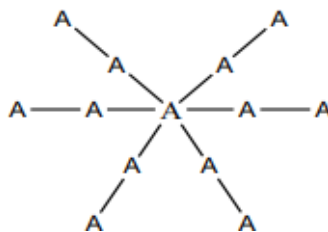
Homopolymère linéaire



Homopolymères branchés



Homopolymères étoilés



➤ Les Copolymères

Polymère obtenu par simple addition de plus d'un motif monomère ou par condensation (libération de matière pendant la réaction).[6]

Copolymère alterné : deux monomères qui alternent sur la chaîne.



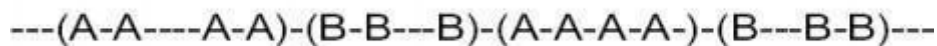
Copolymère statistique :

Deux monomères se suivent dans n'importe quel ordre, A et B se répartissent en suivant une statistique. Les copolymères désordonnés font partie de cette famille.



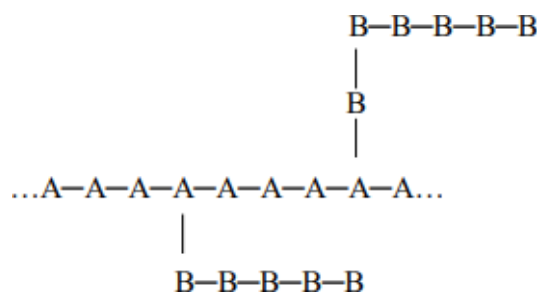
Copolymère bloc :

Les monomères identiques sont groupés. Un copolymère bloc peut être considéré comme deux homopolymères réunis par leurs extrémités, chaque unité constitutive est répétée plusieurs fois de suite pour former de longues séquences.



Copolymères séquencés et greffés

L'exemple le plus simple est celui d'une chaîne d'un homopolymère principal sur lequel des chaînes secondaires d'un autre polymère sont greffées.[7]



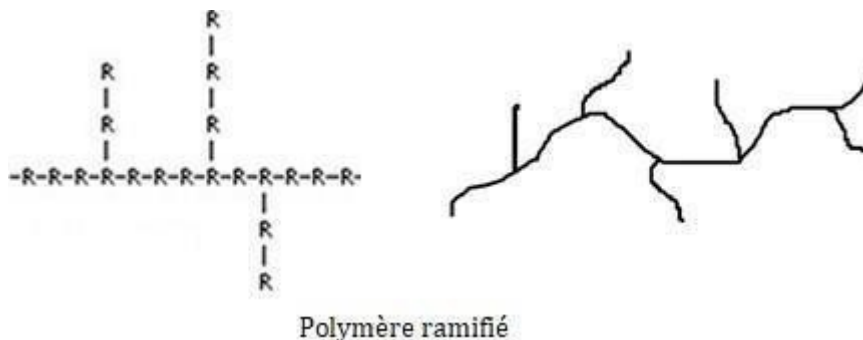
3-2 Selon l'origine

- **les polymères naturels** : sont issus des règnes végétal ou animal.
- **les polymères synthétiques** : totalement issus du génie de l'Homme, sont obtenus par polymérisation de molécules monomères.

Selon leur structure

- **Les polymères linéaires** (ou monodimensionnels), pour lesquels chaque chaîne macromoléculaire est constituée d'un nombre (éventuellement) élève mais fini d'unîtes monomères [8]
- **Polymère ramifié**

Est un polymère présentant au moins un point de ramification (branchement). Des chaînes homo-polymériques ou co-polymériques peuvent se greffer sur la chaîne au cours de la polymérisation. La chaîne branchée est dite greffon lorsque sa composition est différente de celle de la chaîne principale. [9]



3-3 Les polymères selon le comportement avec la température

- **Les thermoplastiques**
Un thermoplastique est un polymère linéaire ou ramifié pouvant être ramolli par chauffage et durci par refroidissement dans un intervalle de température spécifique. [10]
- **Les élastomères** : Un élastomère est un polymère linéaire ou ramifié transformé par vulcanisation en un réseau tridimensionnel faiblement réticulé infusible et insoluble. [11]

- **Les thermodurcissables** : Un polymère thermodurcissable, quant à lui, subit une transformation chimique irréversible lors de sa polymérisation. Il ne peut être mis en forme qu'une seule fois. En effet, lorsqu'il polymérise, le polymère thermodurcissable crée des chaînes macromoléculaires fortement réticulées et liées entre elles par des liaisons fortes qui ne pourront être cassées par la suite. Chauffer un thermodurcissable après sa mise en forme conduit à la détérioration,[11]

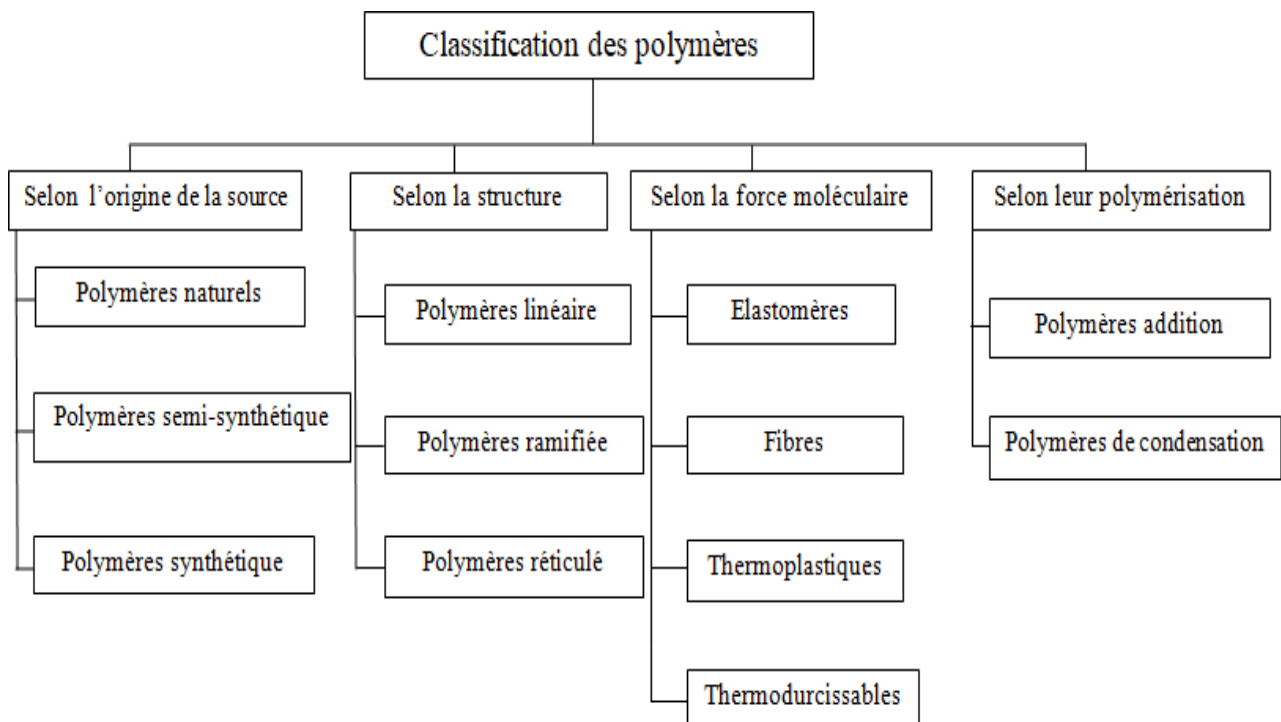


Tableau 1 : résume la classification des polymères

Parmi les polymères thermodurcissables les plus utilisés, notamment pour la fabrication des composites, la résine époxy car elle présente un bon accrochage sur les fibres et de bonnes propriétés mécaniques. Elle possède de bonnes propriétés jusqu'à une température de 170°C [12].

4- La résine époxy

4-1 Chimie époxy

Les époxy sont un type de polymère thermodurcissable dans lequel un réseau réticulé 3-D est formé. Des liaisons covalentes entre les monomères époxy sont formées après durcissement, créant un matériau solide qui ne peut pas être remoulé.

2 Les propriétés mécaniques, thermiques et chimiques de ce matériau peut être ajusté en changeant les monomères, en modifiant l'étendue de la formation du réseau ou en ajoutant des phases de renforcement. La figure 2 montre trois structures époxy monomères ou oligomères basées sur des structures bisphénoliques ou poly- phénoliques. Les monomères époxy à base de bisphénol sont les plus courants, car ils ont une faible viscosité pour le traitement, ainsi qu'une densité et une rigidité de réticulation élevées.

Certains autres polymères thermodurcissables sont les esters vinyliques et les polyuréthanes. Les résines thermodurcissables sont aujourd'hui largement utilisées comme matrice pour les composites renforcés de fibres pour des applications structurelles hautes performances. Ils sont également utilisés comme adhésifs pour assurer le collage entre des pièces complexes, ou comme revêtements hautes performances en raison de leur résistance thermique et chimique.

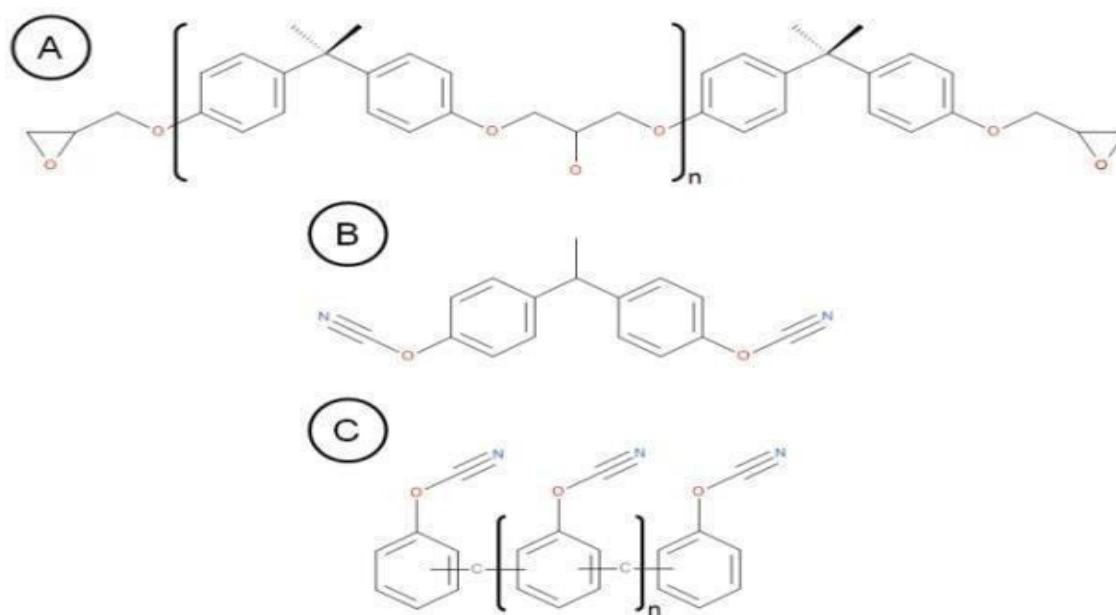


Figure 2: (A) Éther Diglycidyl du bisphénol A (DGEBA, nom commercial: EPON 828), (B) Dibsphénol E Cyanate Ester (nom commercial: Primaset LECY), et (C) oligo (3-méthylène-1,5-phénylénecyanate ester) (nom commercial: Primaset PT-30). Adapté avec la permission de[3]

4-2 Polymérisation

La réaction des époxydes se produit via des réactions d'addition nucléophile qui clivent le cycle oxirane. Les deux mécanismes réactionnels qui peuvent y parvenir sont illustrés à la figure 3.

La première voie de réaction est la polymérisation par croissance par étapes dans laquelle les monomères époxy réagissent avec les amines primaires et secondaires. Le rapport époxy-amine est critique afin de créer la structure la plus optimale. Un excès d'impuretés époxy ou hydroxyle peut entraîner des réactions d'éthérification concurrentes qui diminuent la densité de réticulation et la température de transition vitreuse (T_g). Le deuxième mécanisme de réaction est la polymérisation par extension de chaîne favorisée par un initiateur cationique, qui initie l'ouverture anionique du cycle époxyde. Dans ce mécanisme, il n'y a pas de rapport durcisseur-époxy optimal. Mais la concentration du durcisseur utilisé affectera les propriétés du matériau, car le poids moléculaire moyen entre les réticulations diminuera à mesure que la concentration du durcisseur augmentera. La figure 3 (A) montre la polymérisation par croissance par étapes des monomères époxy, et (B) montre le mécanisme d'extension de chaîne de la formation d'un réseau époxy réticulé.

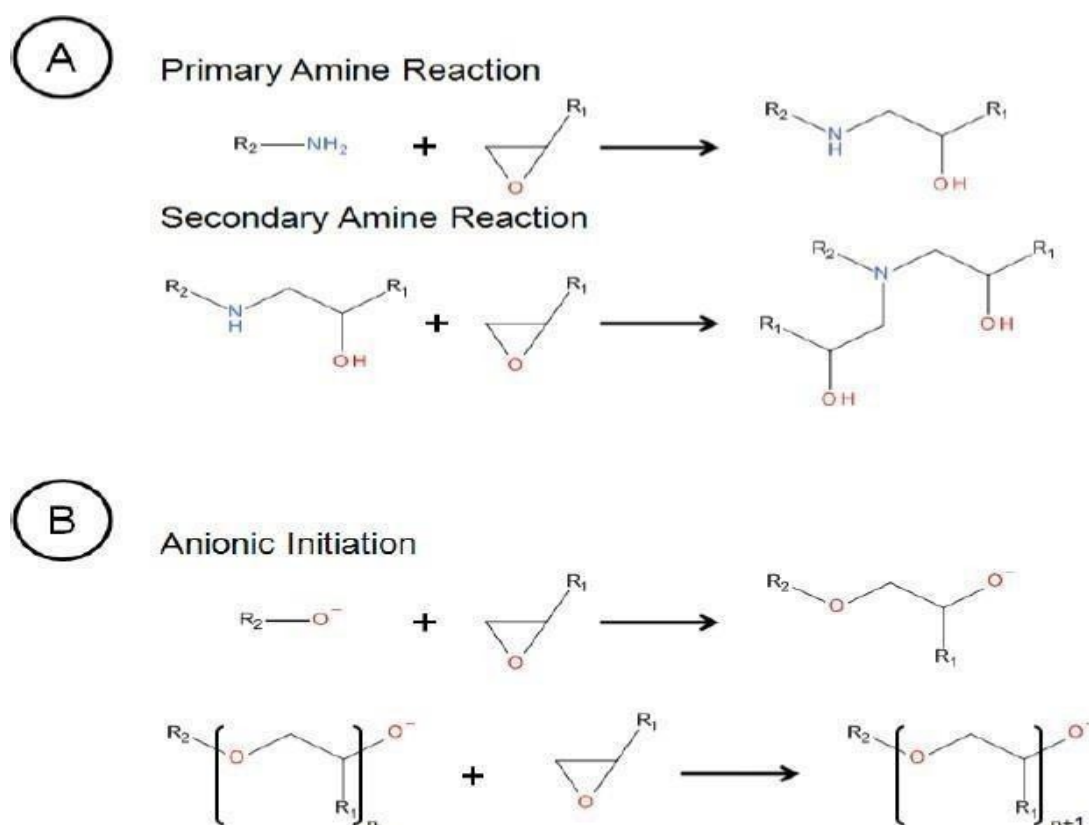


Figure 3 : (A) polymérisation par étapes de l'époxy réalisée par une amine primaire ou secondaire, et (B) initiation anionique de l'extension de chaîne de l'époxy. Adapté avec la permission de [13].

Les monomères époxy avec plus d'un cycle oxirane produisent un réseau thermodurcissable.

4-3 Principaux types de résines époxydes

Il existe plusieurs types de résines époxydes :

➤ **Résines époxydes novo laque**

Elles sont obtenues par action du formaldéhyde sur le phénol en solution acide pour obtenir les époxydes formol phénol novo laques ou (époxydes formol crésol novolaques). Ces résines ont une bonne stabilité à haute température, mais elles sont fragiles[14].

➤ **Résines époxydes à base d'amines aromatiques**

Il s'agit principalement du TGMDA (TetraGlycidylMethylDiAniline). Ces résines ont d'excellentes propriétés thermiques.

➤ **Résines époxydes à base de para-aminophénol**

C'est une résine trifonctionnelle appelée le TriGlycidyléther du Para-AminoPhénol (TGPAP), très utilisée pour la fabrication des pré-imprégnés et les adhésifs.

➤ **Résines époxydes souples**

Les résines époxydes souples sont caractérisées par un squelette ne comportant pas de noyau aromatique (ou un seul). Elles peuvent se mélanger avec d'autres résines époxy pour améliorer leur résistance au choc. Par ajout de Brome ces résines ont un meilleur comportement à la chaleur.[15]

5- Matériaux composites

5-1 Définition

Un matériau composite peut être défini comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante matériaux composites des arrangements de renforts (appelés aussi charges) qui sont noyés dans une matrice.[16]

5-2 Constituants des matériaux composites :

Les matériaux composites sont constitués principalement :

- D'une matrice à laquelle sont ajoutés, dans certains composites des charges,
- D'un renfort.
- D'une interface.

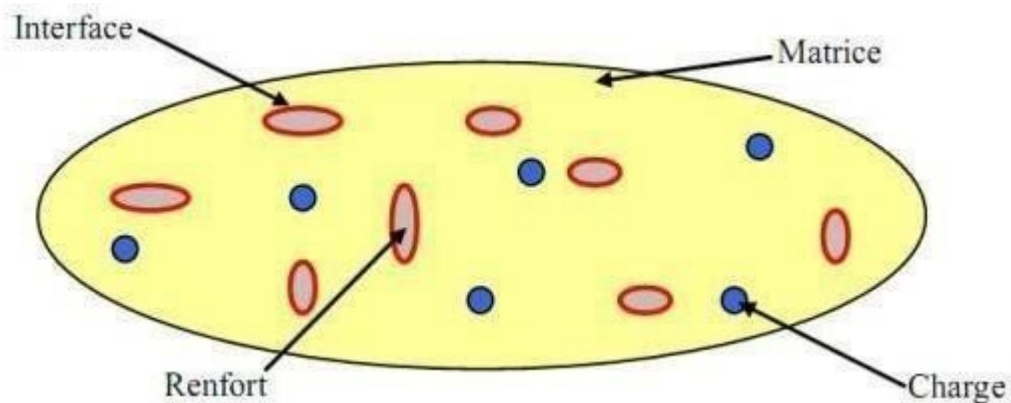
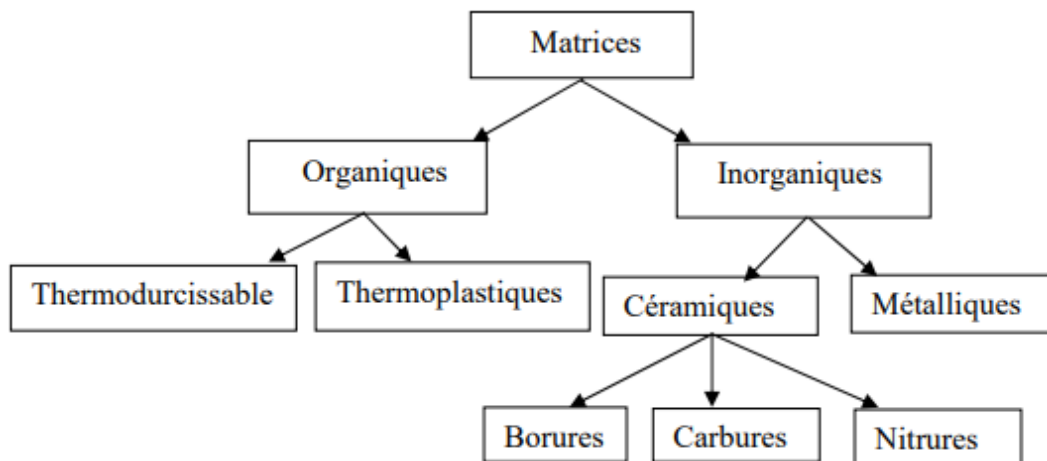


Figure 4: matériaux composites

5-2-1 la matrice

La matrice permet de lier les fibres du renfort fibreux entre elles, ainsi que de répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion). La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des fibres. Généralement, c'est un polymère ou une résine organique.

On peut retrouver dans l'organigramme ci-dessous, les différentes familles de matrices:



5-2-2 Les renfort :

Comme son nom l'indique, le renfort assure la tenue mécanique du matériau, les renforts prenant généralement la forme de fibres ou de particules

5-3 Composites à fibres

5-3-1 Différentes fibres peuvent être employées avec ces matrices

➤ **Les fibres de verre**

ont un excellent rapport performance prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites.[17]

➤ **Les fibres de carbone :**

plus onéreuses mais très performantes d'un point de vue mécanique, utilisées notamment en aéronautique, en construction industrielle et dans les sports et loisirs ;[17]

➤ **Les fibres de bore**

Obtenues par dépôt chimique de chlorure de bore (BCI) et de l'hydrogène (H₂) sur un fil de tungstène de diamètre 13µm chauffé à une température comprise entre 1100 et 1300°C par effet joule.

➤ **Les fibres de carbure de silicium**

Le principe d'élaboration est analogue à celui de fibres de bore, le dépôt résulte de la décomposition chimique à 1200°C du méthyltrichlorosilane en présence d'hydrogène.[7]

➤ **Les fibres d'aramide (Kevlar)**

Ce sont des polyamides aromatiques (ou polyamide) dont la structure est composée de noyaux benzéniques reliés par des groupes CO et HN.[7]

5-4 Composites à particules

On parle de composite à particule lorsque le renfort se trouve sous forme de particules et sont généralement utilisés pour améliorer certaines propriétés des matériaux des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc. Dans de nombreux cas,

Les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le cout du matériau, Sans en diminuer les caractéristiques.

Le choix de l'association matrice-particules dépend des propriétés souhaitées. Par exemple, des inclusions de plomb dans des alliages de cuivre augmenteront leur facilité d'usinage .Des particules de métaux fragiles tels que le tungstène, le chrome et le molybdène incorporé dans des métaux ductiles augmenteront leurs propriétés à température élevées. Tout en conservant le caractère ductile à température ambiante.

Les cermets sont également des exemples de composite métal-céramique à particules, adapté sa des utilisations à température élevée.et pour les protections à hautes températures.

Egalement, des particules d'élastomère peuvent être incorporées dans des matrices polymères fragiles, de manière améliorer leurs propriétés à la rupture et au choc, par diminution de la sensibilité à la fissuration.

Les composites à particules recouvrent un domaine étendu dont le développement s'accroît sans cesse avec des applications dans divers domaines de technologie. En raison de leurs propriétés mécaniques et physiques et leurs performances les céramiques ternaires peuvent être un bon choix pour avoir un matériau multifonctionnel.

6 – Les phases MAX

6-1 définition et structure

Les phases MAX tirent leur nom de leur composition chimique. Elles ont pour formule générale $M_{n+1}AX_n$ (où $n=1, 2$ ou 3) [18] où M est un métal de transition, A est un élément du groupe du tableau périodique, X est le carbone ou l'azote. Suivant la valeur de n, les phases MAX sont dénommées phase 211 ($n=1$), 312 ($n=2$) et 413 ($n=3$). La figure 5 rappelle les différents éléments pouvant être présents dans les phases MAX

1 IA	2 IIA	Métal de transition M										Elément A					X	Cou N					18 VIIA																																									
H	Li	Be	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn

Figure 5 : Extrait du tableau périodique indiquant les éléments M, A et X pouvant réagir pour former une phase MAX[19].

6-2 Description cristallographique des phases MAX

Les phases MAX présentent une structure lamellaire à maille hexagonale dont le groupe d'espace est $P63/mmc$. Leur maille élémentaire est schématisée sur la figure 6. La maille élémentaire peut être simplement décrite par des empilements successifs de n couches d'octaèdres M_6X et d'une couche d'élément A. Les trois structures se différencient par leur nombre de couches d'octaèdres séparant les couches A : on compte 1 octaèdre (i.e. 2 couches de M) pour la 211, 2 octaèdres (i.e. 3 couches de M) pour les 312 et 3 octaèdres (i.e. 4 couches de M) pour la 413.

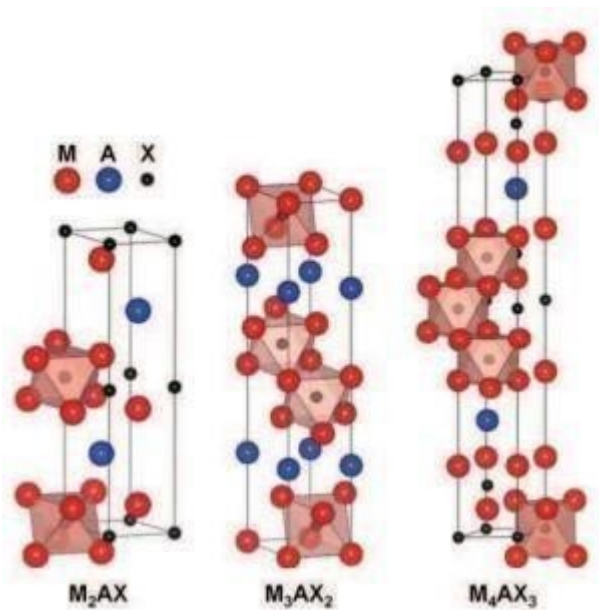


Figure 6 : Les trois mailles élémentaires (211, 312 et 413) des phases MAX

6-3 Microstructure

Les phases MAX sont des céramiques nano lamellaires. Ti_3SiC_2 , comme toutes les phases MAX, est une céramique nano lamellaire. La figure 7 montre une micrographie de cette structure sur un faciès de rupture.

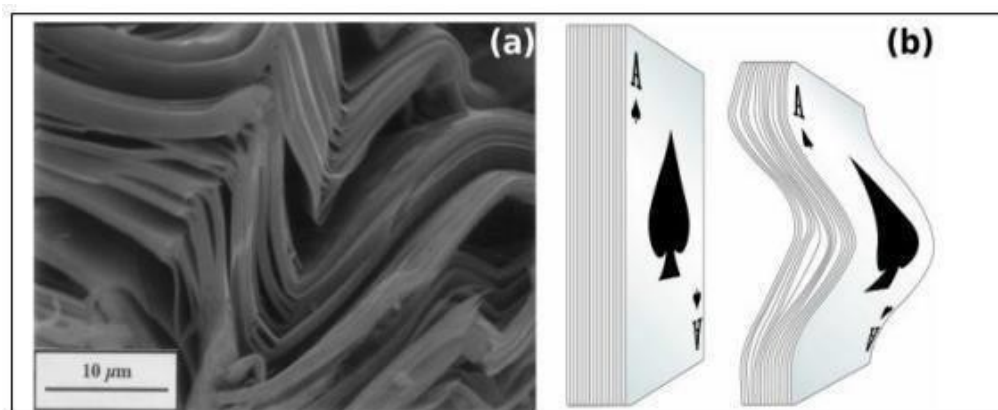


Figure 7 : Structure nano lamellaire de Ti_3SiC_2 : (a) Déformation des lamelles observée sur une face fracturée [17]; (b) Analogie avec un jeu de carte déformé par une sollicitation parallèle aux plans des cartes[16].

Une caractéristique unique des phases MAX est qu'elles possèdent des caractéristiques à la fois des métaux et des céramiques. Ti_3SiC_2 est un exemple de phase MAX largement étudiée présentant des propriétés supérieures à la fois pour les métaux et les céramiques. Les propriétés métalliques notables de cette phase MAX sont excellente conductivité thermique et électrique, facilement usinable, relativement souple, résistant aux chocs thermiques, et comportement plastique à des températures plus élevées. Pourtant, comme une céramique, le Ti_3SiC_2 est résistant à l'oxydation, extrêmement réfractaire et capable de maintenir sa résistance à des températures élevées [20]. De plus, Gupta et al. [9-11] a montré que les phases MAX ont des comportements tribologiques favorables en glissement sec à des températures ambiantes et élevées. Cette classe spéciale de matériaux est très prometteuse pour fournir les propriétés mécaniques, chimiques et tribologiques essentielles des composites et revêtements de nouvelle génération, et peut donc être envisagée pour une variété d'applications telles que les éléments chauffants, l'outillage et le perçage, les feuilles à haute température roulements, contacts électriques et une gamme de autres applications.

6-4 Quelques applications des phases MAX

Donnant de bonnes propriétés mécaniques à haute température les phases MAX trouvent leurs applications comme des composés utilisés à haute température [21]:

- Composites pour des applications structurales. Exemple (poudres de Ti_3SiC_2 et Ti_2AlC ; utilisées pour faire d'autres céramiques structurelles et à haute température [4].
- Les phases MAX sont facilement usinées à des tolérances très élevées, ce qui devrait rendre le coût des pièces finales compétitif par rapport à d'autres céramiques structurelles
- Remplacer les céramiques traditionnelles, les phases MAX se caractérisent par leurs simples usinabilités à la matière finale

7- Les phase MAB

En 1997, Okada et al. ont d'abord rapporté la synthèse de monocristaux de MoAlB et WAlB, et les propriétés chimiques et physiques respectives de ces nouvelles phases de matériaux [2]. En 2015, Ade et Hillebrecht [22] ont rapporté la synthèse de monocristaux d'autres divers borures ternaires, notamment : Cr₂AlB₂, Cr₃AlB₄, Cr₄AlB₆, MoAlB, WAlB, Mn₂AlB₂ et Fe₂AlB₂, ainsi que les différentes structures cristallines de chaque borure ternaire respectif. Les auteurs ont remarqué leur similitude avec les phases MAX.

Les phases MAB sont des borures de métaux de transition (M) (TMB) à couches atomiques, ternaires ou quaternaires, de formule générale $(MB)_{2z}A_x(MB_2)_y$ ($z = 1-2$; $x = 1-2$; $y = 0-2$), dont les structures sont composées d'une transition de sous-réseaux MB entrelacés par des mono- ou bicouches d'atomes A ($A = Al, Zn$). Les phases MAB sont très similaires aux phases MAX en ce qu'elles ont des couches alternées de sous-unités céramiques et intermétalliques, et c'est cette structure anisotrope qui confère leurs propriétés uniques. Cependant, contrairement aux phases MAX, il existe un ensemble beaucoup plus limité de phases MAB, mais leurs structures cristallines sont plus distinctes et complexes en fonction de la composition de la phase MAB. La complexité des phases MAB tient au fait qu'il existe trois variables dans leurs structures : l'épaisseur du composant de borure, le nombre de couches métalliques entre les couches de borure et l'orientation des sous-unités de bore. En comparaison, les phases MAX n'ont qu'une seule variable : l'épaisseur du composant de carbure, qui est ensuite intercalé par une couche métallique « A ».

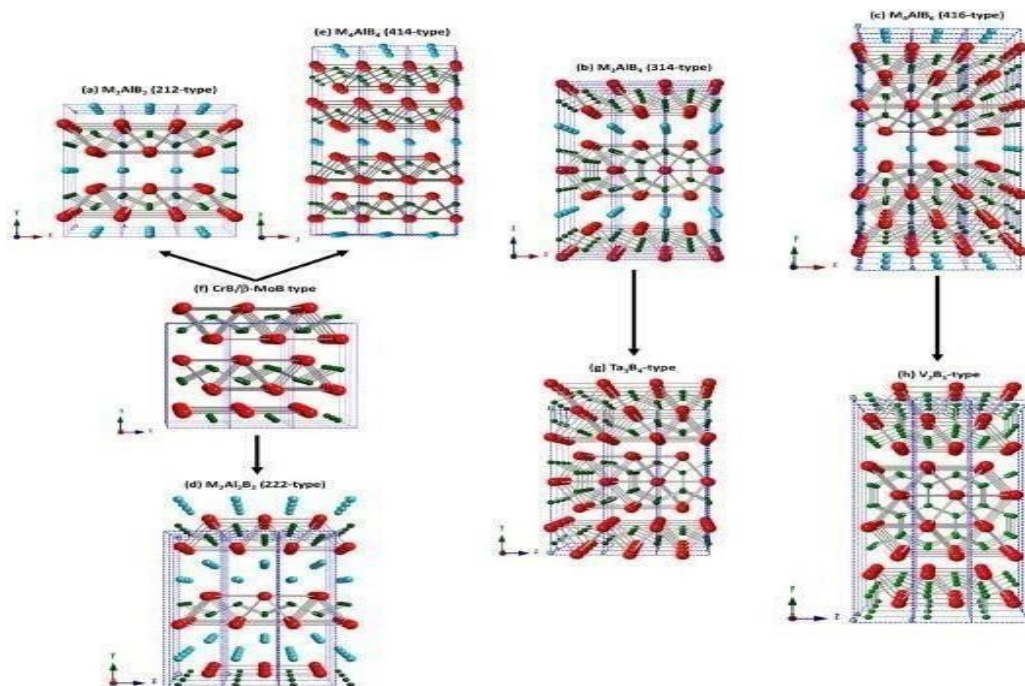


Figure 8. Structures cristallines de diverses phases de MAB et de borures binaires structurellement apparentés : (a) type 212 [*Cmmm*], (b) type 314 [*Pmmm*], (c) type 416 [*Cmmm*], (d) 222- type [*Cmcm*], (e) type 414 [*Immm*], (f) CrB/ β -MoB [*Cmcm*], (g) Cr₃B₄ [*Immm*], et (h)Cr₄B₆ [*cmcm*].

Les atomes M, Al et B sont représentés respectivement en rouge, bleu clair et vert.

Ce mémoire se focalise sur le développement de poudres de phase MAX(Cr₂AlC) par réaction sans pression, et de les utiliser avec des poudres de la phases MAB MoAlB pour la fabrication des composites Epoxy.

CHAPITRE : 2

TRIBOLOGIE

1- Histoire de la Tribologie

Le nom tribologie, créé en 1966, vient du Grec "τριβειν" Tribein : frotter, et "λογος" logos parole, étude ou science ; ainsi la tribologie est l'étude ou la science, du frottement. Plus généralement la tribologie regroupe l'étude de la lubrification, du frottement et de l'usure des éléments de machine. Il faut tout d'abord remarquer que le frottement ne présente pas que des aspects négatifs, ainsi la tenue de route d'une automobile dépend directement du frottement entre les pneumatiques et la route. De même sans l'existence du frottement, l'homme serait incapable de marcher. Enfin, si l'homme a appris à maîtriser le feu, il y a plus de 100000 ans, c'est en faisant frotter un morceau de bois dur à l'intérieur d'un morceau de bois tendre. Cependant, dès la construction des premiers mécanismes, l'homme a cherché à supprimer l'usure et à diminuer le frottement pour réduire les efforts. Pour préciser l'ampleur du problème on peut citer le cas des automobiles actuelles pour lesquelles plus du quart de la puissance indiquée du moteur est perdue en frottement dans le moteur et dans la transmission.[23]

2- Définitions de la tribologie

La tribologie est la science de l'usure, des frottements et de la lubrification. Elle étudie les phénomènes qui se produisent lorsque des surfaces entrent en mouvement relatif avec d'autres éléments tribologiques dans des systèmes naturels ou artificiels. Cela inclut la conception et la lubrification des paliers .

3- Un système tribologique

Un système tribologique se définit comme un système mécanique, formé de deux matériaux antagonistes en contact, animés de mouvements relatifs. Ces deux solides évoluent dans un milieu ambiant et peuvent être séparés par un film intercalaire appelé troisième corps. Sur le plan tribologique, le troisième corps est un opérateur qui transmet la charge (ou portance) d'un premier corps sur l'autre et accommode en s'écoulant (débit) d'une façon dissipative (frottement) l'essentiel de la différence de vitesse entre deux corps. Les troisièmes corps séparent partiellement ou entièrement les premiers corps. Ils sont introduits dans le contact ou bien par entraînement cinématique (lubrifiants solides ou liquides) dans les contacts lubrifiés, ou par formation in situ (particules détachées) dans les contacts dits secs. [24]

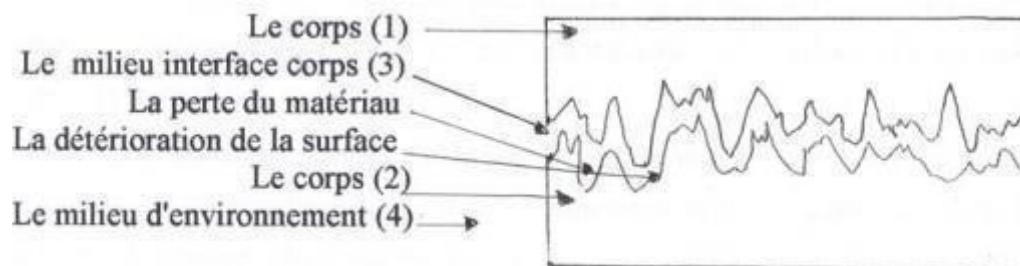


Figure 9 : un système tribologique

4- Mécanismes d'usure :

L'usure est un ensemble complexe de phénomènes, amenant une émission de débris avec perte de masse, de côtes, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces. L'usure est généralement combattue à cause de ses effets négatifs, mais elle présente aussi des aspects favorables. L'affûtage d'un outil, la finition d'une surface par rectification, l'écriture de la craie sur le tableau ou du crayon sur le papier sont des exemples d'usures abrasives utiles. [25]

Dans les premiers instants du frottement, ce sont les écrans superficiels qui subissent l'ensemble des mécanismes inhérents au frottement (effets thermiques, mécaniques ou chimiques). Ensuite, ces mécanismes se relaient ou s'interpénètrent en fonction des multiples conditions présentes.

En général, une pièce subit tout au long de sa vie 3 étapes d'usure :

- **Rodage** : usure rapide avec une vitesse d'usure régulièrement décroissante.
- **Marche normale** : durée de vie (usure faible et constante).
- **Vieillesse et mort** : vitesse d'usure croissante. [25]

L'usure dite mécanique décrit celle gouvernée par un processus de déformation et de fissuration. Le processus de déformation joue un rôle dominant dans les matériaux ductiles, par contre c'est la fissuration qui domine les matériaux fragiles.

L'usure chimique décrit l'usure qui est majoritairement dominée par le taux de croissance des réactions chimiques accélérées mécaniquement par la friction.

Ainsi que l'usure thermique c'est celle qui est dominée par une fusion causée par la génération de la chaleur lors de la friction, l'usure diffusive est un terme utilisé aussi pour décrire l'usure thermique à haute température. [26]

Les trois descriptions de l'usure mentionnées décrivent brièvement la caractérisation des mécanismes d'usure, cependant elles ne sont pas suffisantes pour introduire les modes d'usure pour la prédiction du taux d'usure, les paragraphes qui suivent montrent les différents mécanismes possibles dans un système tribologique.

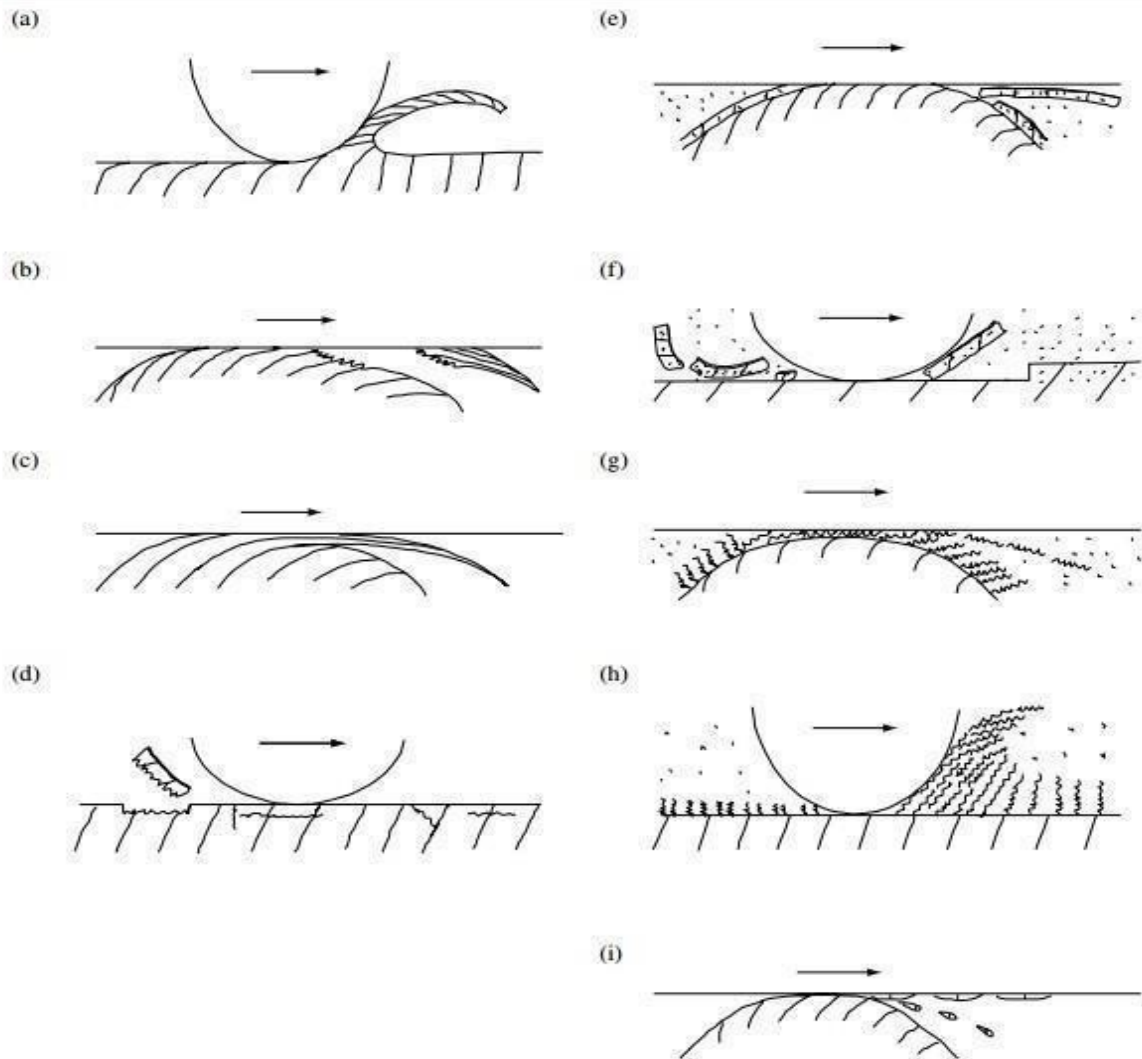


Figure 10, schéma représentatif des modes d'usure ;(a) Usure abrasive par micro coupe d'une surface ductile (b) usure adhésive (c) Flux d'usure accumulé par un flux de cisaillement plastique ;(d) usure par fatigue via l'initiation des fissures et propagation, (e) l'usure corrosive par fracture des tribo-films ductile ; (f) usure corrosive par délamination des tribo-films fragiles ,(g) usure corrosive par accumulation d'un flux plastique de cisaillement des tribo-films ductiles ;(h) usure corrosive par écrasement des tribo-films et (i) Usure par fusion via une fusion locale et transfert ou diffusion [26]

4-1 Usure abrasive

L'usure abrasive est due au contact entre une particule et la surface d'un solide. Lors de son passage dans le contact, cette particule peut enlever de la matière selon quatre modes d'enlèvement de matière figure 11. Elle peut :

- couper, si elle est suffisamment aiguisée,
- repousser la matière en surface,
- provoquer une fracture, si le solide est fragile,
- enlever des grains, si le matériau est insuffisamment homogène.

Ces deux derniers modes se produisent plus rarement que les deux premiers. La nature de l'usure abrasive est aussi déterminée par le mode d'acheminement des particules dans le contact [27].

- si les particules sont fixées à l'une des deux surfaces, il s'agit d'abrasion à deux corps.
- si les particules sont libres de rouler ou de glisser par rapport aux deux surfaces, on parle alors d'abrasion à trois corps. L'usure abrasive est donnée par l'expression :

$$U_{\text{abrasive}} = K_g P C_f V_g$$

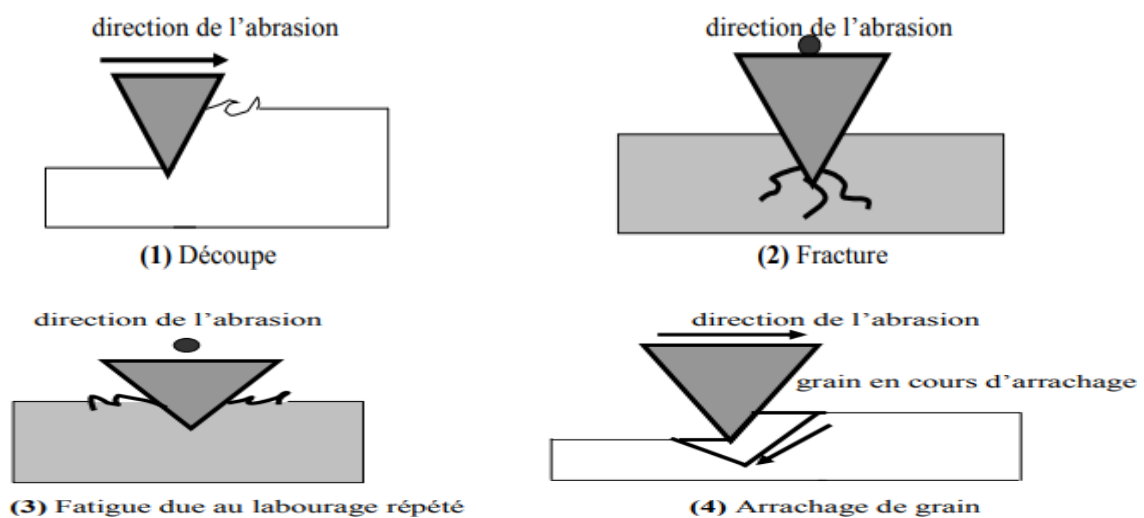


Figure 11. Les quatre modes d'usure abrasive [28]

Pour une cinématique donnée, il existe deux moyens de prolonger la durée de vie d'un contact vis-à-vis de l'usure par abrasion. Il faut soit diminuer la teneur en abrasif, soit en diminuer ses effets. L'efficacité d'un abrasif est liée à sa forme, à sa taille, et au rapport de sa dureté à celle du matériau abrasé.

Williams (1992) montre que si la taille de l'abrasif est plus petite que celle du film d'huile, l'usure sera faible et aucune direction d'usure privilégiée n'apparaîtra. Si la taille des particules abrasives est supérieure à celle du film, des stries apparaîtront dans la direction du glissement [42].

Dans le cas d'une abrasion à trois corps avec des particules dures, il est donc intéressant d'augmenter la durée de vie des surfaces à protéger. Cependant, si l'un des deux solides en contact est beaucoup plus mou que l'autre, les particules vont s'enchâsser à sa surface et l'abrasion à trois corps revient à une abrasion à deux corps. Seul le matériau dur va alors s'user, le matériau mou étant protégé par les particules dures.

4-2 Usure adhésive :

Elle se manifeste par le transfert de matière de l'un des premiers corps sur le corps antagoniste et elle est susceptible d'aboutir au grippage du dispositif. L'usure adhésive résulte de la formation des micro-jonctions entre les surfaces en contact et la création de micro-rupture [29].

Il est généralement admis, que l'usure par adhésion peut être divisée en deux classes : L'usure sévère et l'usure douce. Ces deux types d'usure sont entièrement phénoménologiques [30], pour les distinguer, on base sur les observations suivantes :

La résistance électrique de contact, la composition et la taille des débris d'usure et enfin la topographie des surfaces usées.

➤ La mesure de la résistance électrique de courant

L'usure sévère est caractérisée par de faibles valeurs de la résistance électrique de contact, tandis que l'usure douce est marquée par des résistances de contact élevées.

➤ Analyse des particules d'usure

Pour une usure sévère, les débris contiennent beaucoup de métal et sont de dimensions supérieures à 10 μm , par contre, si l'usure est douce, les particules sont constituées essentiellement d'oxydes obtenus par réactions chimiques avec le milieu ambiant, leurs diamètres étant compris entre 100 \AA à 1 μm [31].

➤ Examens microscopiques des surfaces usées

Lorsqu'il s'agit d'une usure sévère, les traces engendrées par frottement sont profondes, par conséquent, les surfaces sont rugueuses, alors que pour une usure douce, les surfaces frottées sont lisses, souvent plus lisses que leur finition initiale [31].

4-3 Usure corrosive

L'endommagement est ici dominé par des réactions chimiques, et les produits de corrosion sont enlevés par action mécanique. Il y a formation de films inter faciaux compactés.[32]

4-4 Usure par fatigue

Il y a formation de fissures dans les matériaux en présence, sous l'effet de gradients de contraintes cycliques. Les fissures se propagent vers la surface et il y a détachement de « grosses » particules dont la taille peut atteindre le millimètre. On parlera particulièrement d'égrènement lorsqu'il y a formation de trous correspondant à la microstructure initiale des matériaux. Il y a «Déchassement» au niveau des joints de grains d'un métal par exemple. On parle de délamination lorsque les déformations plastiques répétées des premiers corps conduisent à des fissures en sous- surface, parallèles à la surface. Il y a propagation des fissures le long du plan de cisaillement maximum. Malgré une somme importante de travaux sur l'usure, peu d'entre eux abordent le problème dans sa globalité [32].

5-Le paramètre qui influence la tribologie des polymères

Les polymères sont des matériaux complexes dont le comportement face à la pression varie : sous de faibles contraintes, ils réagissent en se déformant de manière élastique et viscoélastique ; sinon,ils suivent un comportement plastique dont il résulte ce qu'on appelle de l'endommagement [33]

La nature des endommagements de surface susceptibles d'apparaître sur un produit est fortement dépendante du tribo-système qui l'intègre.

5-1 La charge :

Briscoe [34] a montré l'influence de la charge normale (parmi d'autres paramètres) sur l'initiation de modes d'endommagements spécifiques durant un test de rayure sur du PMMA.

Le renforcement par fibres de verre des polymères a pour effet d'augmenter la résistance mécanique du matériau d'origine : augmentation du module d'élasticité et de la limite d'élasticité [35]. Le comportement très fragile du verre contribue à limiter la ductilité et donc à une diminution de la déformation à la rupture.

5-2 La vitesse de glissement :

Les polymères sont des matériaux sensibles aux échelles de temps et de température ; la notion de taux de contrainte/déformation, et donc de vitesse de glissement, peut devenir prédominante (en fonction de l'échelle de temps considérée).

5-3 La température

L'impact de la transition vitreuse peut être important dans le cas d'un tribo-système polymère : la température de contact peut augmenter jusqu'à atteindre cette Tg. L'augmentation de cette température peut être accélérée du fait de la faible conductivité thermique des polymères. Une telle transition thermique peut induire des états transitoires dans les mécanismes d'usure, particulièrement à cause des fortes dépendances entre les propriétés thermiques et les propriétés mécaniques (visqueuses). Ces liens peuvent être plus facilement appréciés à l'aide du principe d'équivalence temps-température, qui permet d'extrapoler l'impact du temps ou de la température sur les propriétés visqueuses sans avoir à couvrir l'entièreté de l'échelle de température ou de temps concernée durant les tests.

6- Tribologies des Composite à base de polymères renforcés par des céramiques MAX

Il a été démontré que les phases MAX améliorent les performances mécaniques et tribologiques dans les matrices métalliques, mais Gupta et al. [24-62] leur a également montré qu'ils faisaient de même dans les matrices polymères. Dans de tels cas, ces composites sont appelés polymères renforcés MAX (MRP), et leurs propriétés améliorées font des MRP des candidats viables pour les applications nécessitant des performances mécaniques et tribologiques élevées des composites à matrice polymère. La figure 12 ci-dessous montre les impacts bénéfiques de l'ajout de Ti_3SiC_2 à diverses matrices polymères [36].

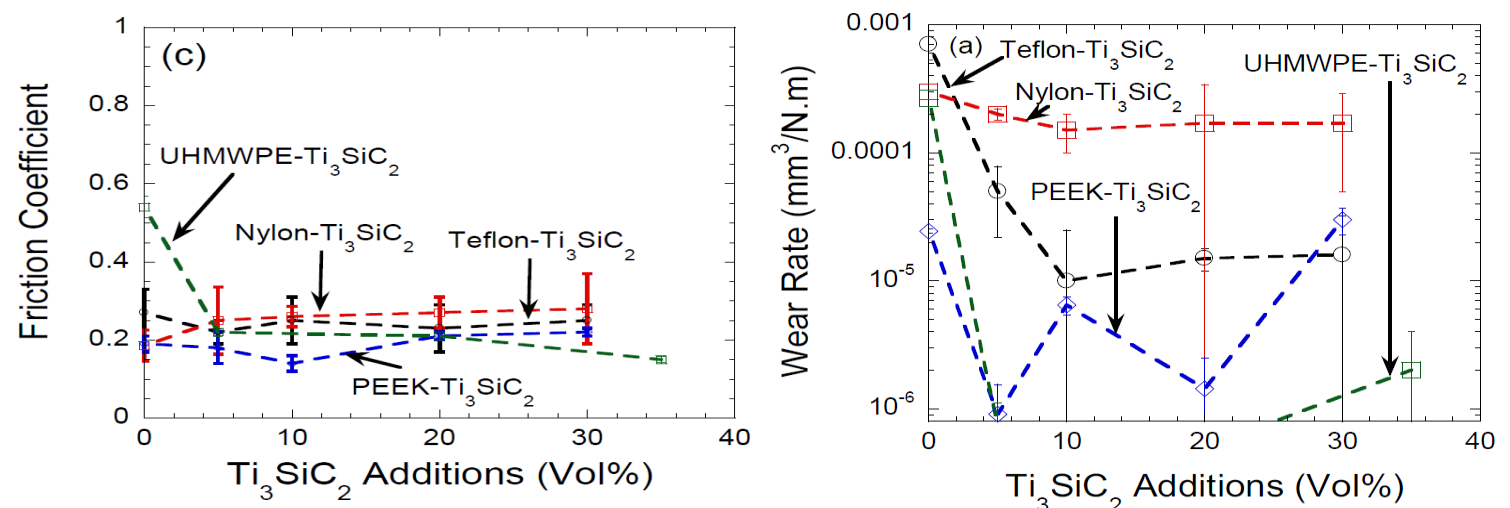


Figure 12 : Tracé des taux d'usure des MRP (a) et (b) en fonction de la teneur en Ti_3SiC_2 [36].

En 2015 Gupta et al ont rapportés aussi pour la première fois la synthèse et caractérisation des composites Ti₃SiC₂-époxy (MAXPOL). Trois nouveaux composites ont été conçus en ajoutant 20,7, 30,6, et 71,6 % en volume de particules de Ti₃SiC₂ dans une matrice époxy. L'évaluation de la microstructure par microscopie électronique à balayage(MEB) a montré que les particules de Ti₃SiC₂ sont bien dispersées dans la matrice époxy. L'ajout de Ti₃SiC₂ a amélioré la limite d'élasticité ultime (UYS) et dureté de tous les composites par rapport à l'époxy. Des études tribologiques ont été effectuées par une méthode tab-on-disc contre Inconel 718 et substrats d'alumine. Dans les deux cas, le coefficient de frottement moyen (moyenne) diminuait à mesure que la concentration de Ti₃SiC₂ dans l'époxy de matrice a été augmentée. Les taux d'usure concomitants (WR) ont également diminué régulièrement puis augmente légèrement après avoir atteint une concentration d'environ 32,6 % en volume de Ti₃SiC₂. Les études tribologiques prouvé de façon concluante que l'ajout de Ti₃SiC₂ dans la matrice époxy confère une autolubrification aux composites. Les tribo-films formées sur différentes tribo-surfaces ont également été caractérisées par enquêtes SEM détaillées.

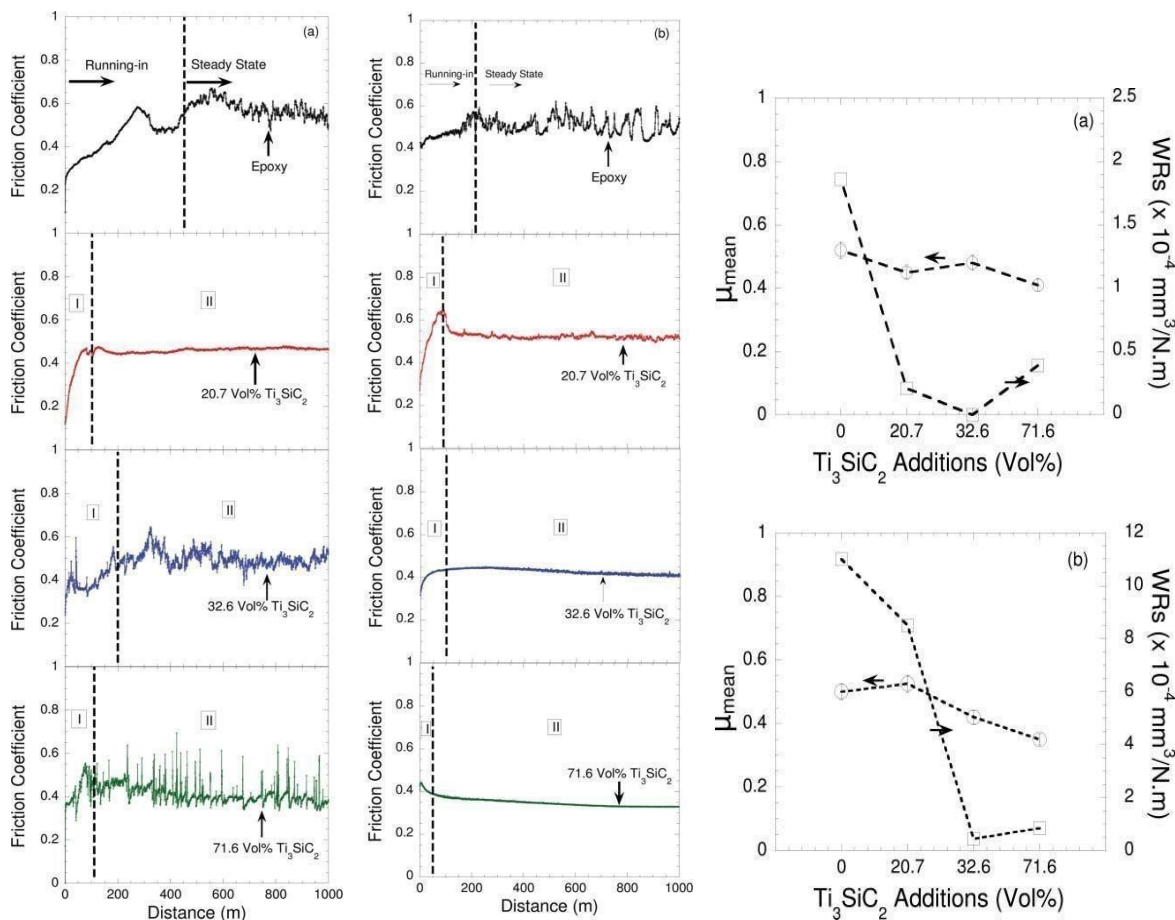


Figure 13 coefficient de frottement (μ) en fonction Des profils de distance de l'époxy et composites renforcés Ti₃SiC₂ contre (a) Inconel 718

figure 14 tracé de moyens et taux d'usure en fonction de la teneur en Ti₃SiC₂ (vol) dans la matrice époxy Contre (a) inconel 718 et (b) alumine

En 2019 la phase Ti₃AlC₂ a été incorporé dans une matrice époxy Les résultats ont montré que les valeurs de micro dureté étaient augmentées en raison de l'augmentation de la teneur en Ti₃AlC₂ dans la matrice époxy. À cet égard, la valeur la plus élevée de 39,24 Hv a été atteinte pour les composites contenant 0,75 % en poids de Ti₃AlC₂, ce qui correspond à l'amélioration de 75,4% de la valeur de micro dureté par rapport à l'époxy pur. De plus, les résultats d'usure ont démontré que les valeurs de coefficient de frottement et de taux d'usure étaient diminuées par l'ajout de particules de Ti₃AlC₂ dans la matrice époxy.

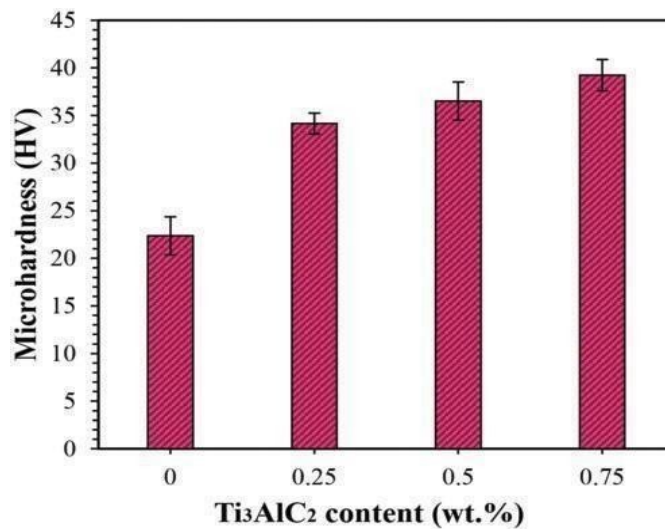


Figure 15. La valeur de micro dureté des composites en fonction de la teneur en Ti₃AlC₂

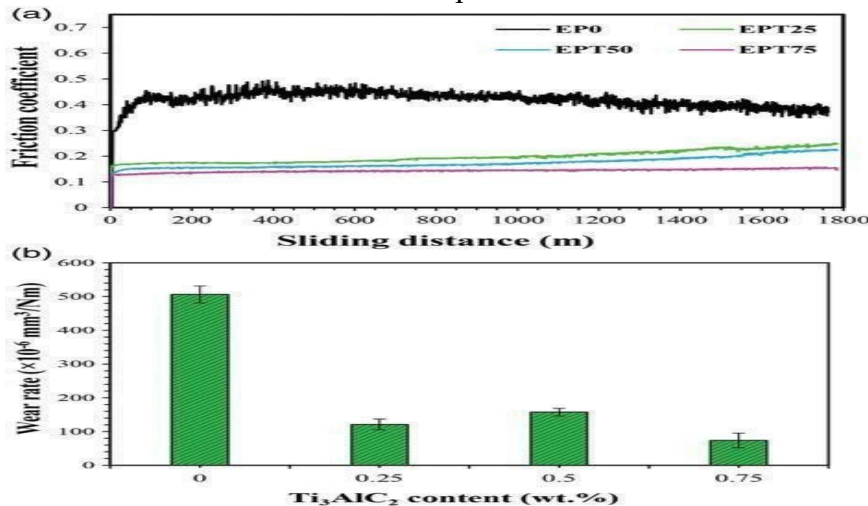


Figure : 16 . (a) Courbes de coefficient de frottement de l'échantillon en fonction du glissement distance et (b) le taux d'usure des composites en fonction de Contenu Ti₃AlC₂

CHAPITRE : 3

Technique Expérimental

1- Synthèse des poudres de phase MAX Cr_2AlC par frittage sans pression :

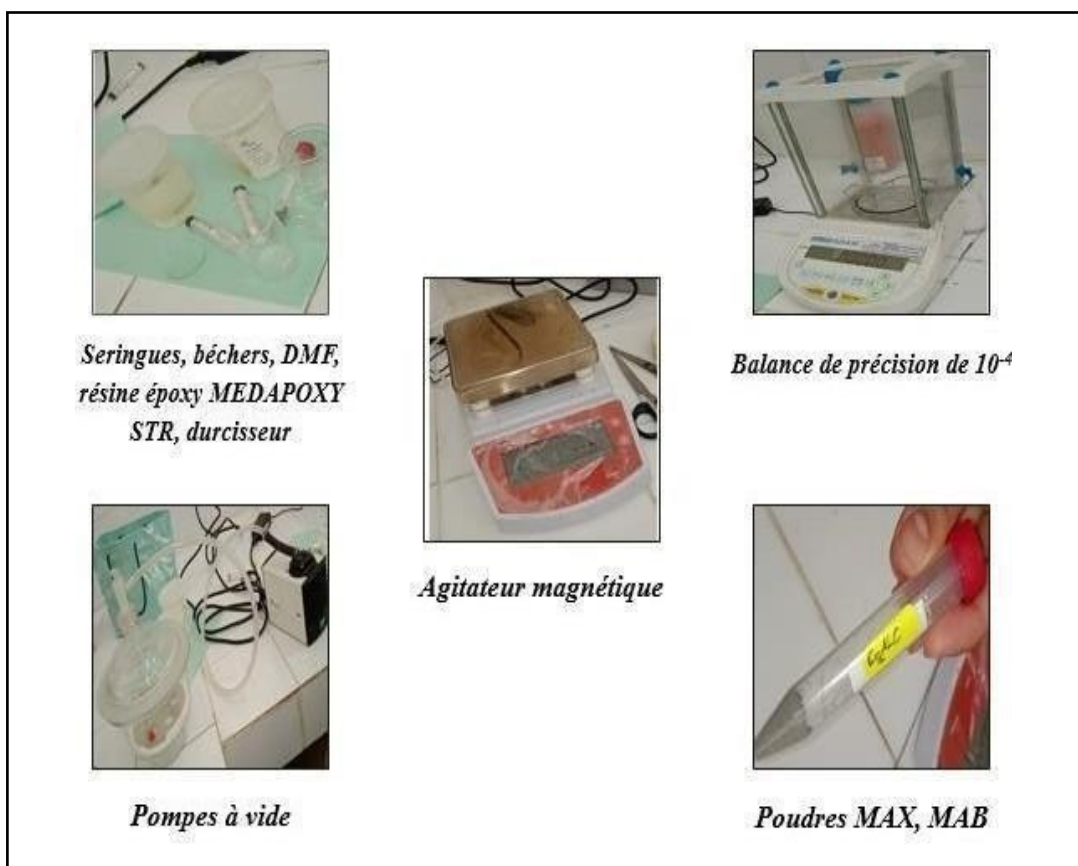
Préparés par frittage sans pression d'Al (taille de particule : -300 mesh, pureté de 99,5 %), Cr (taille de particule : -300 mesh, pureté de 99,5 %) et C (taille de particule : -300 mesh, pureté de 99 %) poudres avec un rapport molaire de $\{\text{Cr}=2, \text{Al}=1, \text{C}=1\}$. Les poudres de départ ont été mélangées pendant 24 h, puis pressées à froid dans un moule en acier inoxydable à 20 MPa pour former des compacts d'un diamètre de 20 mm et d'une hauteur d'environ 5 mm. Les compacts ont été placés dans un creuset en alumine, Les échantillons ont été chauffés dans un four sous vide pendant 1h à 1300°.

Introduction

L'objectif de ce travail est la synthèse de la phase MAX Cr_2AlC et sous forme de poudres et de les incorporés avec des poudres de la phase MAB MoAlB dans une matrice à base d'époxy dont le but est la fabrication des composites EP/ Cr_2AlC et Epoxy MoAlB et étudier leurs comportements tribologiques. Les tests tribologiques et micro dureté ont été effectués au niveau du laboratoire d'études et recherche en technologie industrielle LERTI.

2-Préparation des composites

2-1 Matériel utilisé



Rapport de mélange résine/durcisseur

Résine : 1

Durcisseur : 0,666

La résine époxy (MEDAPOXY STR), durcisseur, des poudres de Cr_2AlC sont utilisés pour préparer les composites Epoxy Cr_2AlC , tout d'abord, la résine époxy et les particules de Cr_2AlC ont été additionnées dans un bécher en verre La relation entre les poudres et la résine époxy est présentée en pourcentage en poids (1%, 2,5%, 5%). Le mélange a été placé dans agitateur magnétique à une certaine température pendant 1h pour cassé les agglomérats. Après l'heure stipulée, le durcisseur (rapport de 100 :66,6) est ajouté au mélange et on continue l'agitation pendant encore quinze minutes. Pendant ce temps, l'apparence du mélange commence à changer de viscosité faible à élever. Immédiatement après cela, le mélange est versé dans le moule souhaité et le durcissement est initié. Le mélange moulé est durci à température ambiante puis à 100 °C pendant une heure. La procédure similaire a été adoptée pour préparer les composites époxy/ $MoAlB$ avec différents pourcentages en poids de $MoAlB$ (0,25%-0,5%-0,75%et 1%). La taille des échantillons préparés était : diamètre de 40 mm et une épaisseur de 4mm. Les échantillons obtenus sont nommés EP0, EP1.0, EP2,5, EP5.0 pour les composites époxy/ Cr_2AlC et EP0, EP0,25, EP0.5, EP0.75, EP1.0 pour les composites époxy/ $MoAlB$.

3- Caractérisation par diffraction des rayons-X

La diffraction des RX nous permet d'identifier les phases présentes à partir de leurs structures cristallographiques. La méthode d'analyse DRX ou diffractométrie DRX utilise une technique radio-cristallographique non destructive d'analyse de diffraction spectrale.

➤ Diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X est une technique d'analyse structurale non destructive. Elle permet de fournir des données sur la structure cristalline des matériaux et sur leurs orientations préférentielles. Elle permet également d'identifier les phases cristallisées présentes dans un échantillon et de remonter à la taille des cristallites. Son principe de base est fondé sur la diffusion élastique du rayonnement X par un matériau cristallin. Dans la arrive sur λ , un faisceau de rayons X monochromatique de longueur d'onde θ - 2θ technique avec une famille de plans réticulaires d'indices hkl .

On a θ l'échantillon en faisant un angle diffraction lorsque la relation de Bragg ci- dessous est vérifiée.[37]

$$2d \sin\theta = n\lambda$$

Où d : la distance entre deux plans réticulaires

θ : angle d'incidence des rayons X

n : ordre de la diffraction

λ : longueur d'onde de diffraction

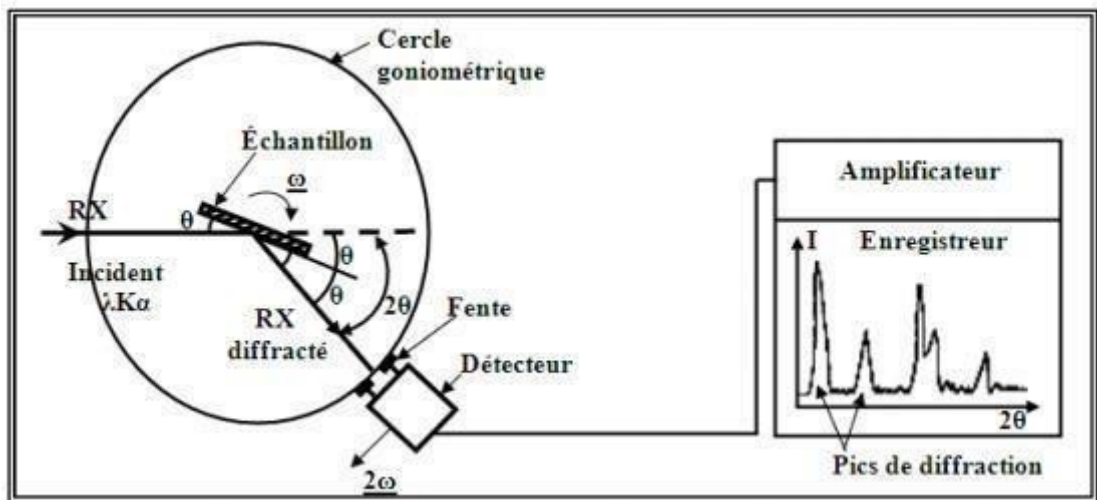


Figure 17 : Schéma d'un diffractomètre en compteur [38]

4- Mesure de MICRODURETE VICKERS :

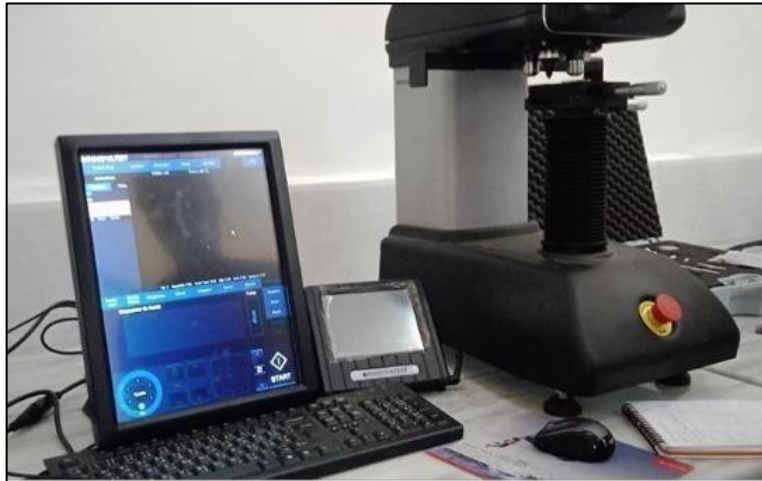
4-1 Définition

La dureté d'un matériau c'est la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un poinçon, s'il résiste bien alors il est dit dur, sinon il est dit mou. La dureté se mesure sur différentes échelles selon le type de matériau considéré.

On utilise généralement des essais de rebondissement ou de pénétration pour caractériser la dureté des métaux, des matières plastiques et des élastomères. Ces essais ont l'avantage d'être plus simples à réaliser et de donner des résultats reproductibles. Il existe une grande variété d'essais de dureté possibles.

L'essai consiste à déterminer la résistance d'un matériau à une force de pénétration. Le pénétrateur peut être de géométrie sphérique, conique ou pyramidale selon le type de dureté à mesurer (Brinell, Rockwell ou Vickers).

Comme notre université dispose que du micro d'uromètre de marque FLACON 400, nous avons procédé à l'essai de micro dureté Vickers.[39]



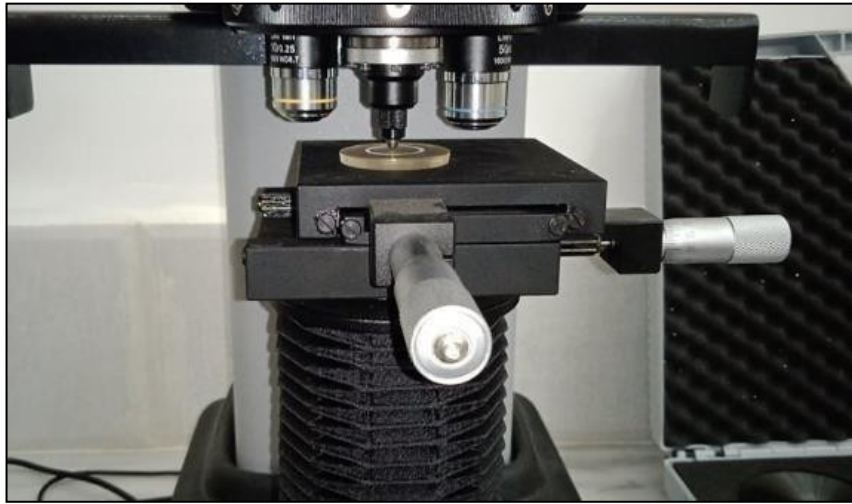
➤ Application

Le FALCON 400 améliore les méthodes d'essai de dureté conventionnelles, en s'efforçant d'éliminer l'influence de l'utilisateur sur les résultats des essais. La technologie avancée des capteurs de force utilise un système en boucle fermée de cellules de charge à commande électronique avec retour de force, afin d'obtenir une précision, une fiabilité et une répétabilité absolues, indépendamment de la force utilisée pour un essai [40].

➤ Mode opératoire

Placer le pénétrateur en contact avec la surface du matériau. Appliquer une charge de 10 gF. Maintenir cette charge pendant 10 secondes.

Mesurer sur l'empreinte, La mesure est effectuée a l'aide d'un dispositif grossissant et d'une règle graduée tenant compte de facteur de grossissement. [41]



➤ Principe

La mesure de dureté Vickers se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée. L'empreinte a donc la forme d'un carré ; on mesure les trois diagonales D_1 et D_2 et D_3 de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur d en effectuant la moyenne de D_1 et D_2 et D_3 . C'est d qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalisées.[41]

5- Le polissage

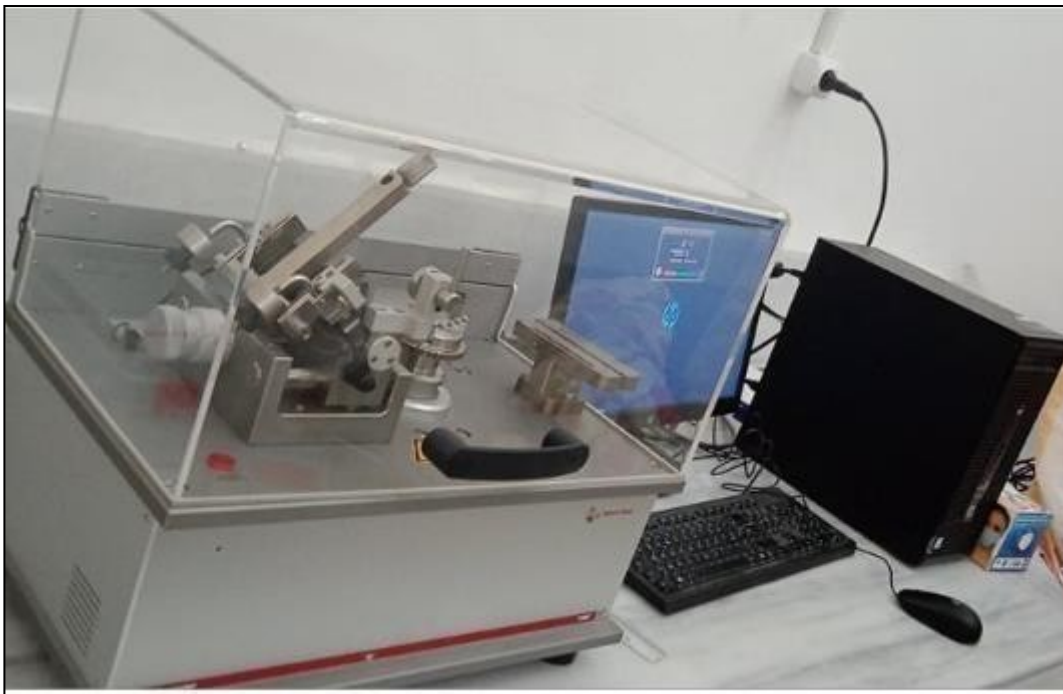
Le polissage est une opération visant à affiner les rayures, ce dernier a été effectuée avec des papiers abrasifs de différentes granulométries : 1200, 4000 et une solution diamantée, Il est obtenu manuellement, vise à rendre les surfaces uniformes. Il consiste à abraser la surface sous une charge constante, à l'aide du papier abrasifs de grade montés sur des tourets de polissage dont la vitesse est de 300 tr/min, équipés d'un système d'arrosage à l'eau courante pour éviter l'échauffement des échantillons. La diminution de la taille des grains d'abrasif d'un papier à l'autre permet d'affiner progressivement l'état de polissage et de diminuer la rugosité moyenne, la surface à polir se couvre de rayures de plus en plus fines.



6-Etude tribologique

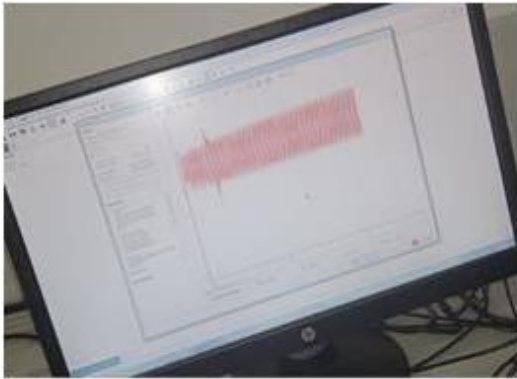
6-1 PRESENTATION DU TRIBOMETRE PION-DISQUE

La machine dont on dispose est un tribomètre pion-disque. Il comprend essentiellement : un bâti, disque, pion et un moteur électrique. Les essais ont été effectués (à l'air ambiant). Le test consiste à appliquer une charge normale sur le pion fixe en contact avec le disque qui, lui-même est fixé par une vis animée d'un mouvement de rotation. La force tangentielle de frottement F_t est mesurée par un capteur de force. Cet appareil est composé d'un module de base sur lequel s'adaptent six modules spécifiques d'étude en tribologie. Le module de base est composé d'une plaque support sur laquelle est monté le moteur, la boîte de vitesse, le capteur de force et un coffret de contrôle et de commande.



6-2 Tests tribologiques

Notre travail consiste à réaliser des tests tribologiques sur différents échantillons en utilisant une bille d'acier inoxydable sous différentes conditions. Les échantillons subissent un déplacement rotatif en contact avec la bille pendant certain temps qui dépend à conditions opératoires telles que la vitesse de glissement et la distance parcourue. Ces essais nous ont permis de trouver empiriquement la valeur de coefficient de frottement μ . Les essais tribologiques ont été réalisés en configuration pion-plan à l'aide d'un tribomètre de marque Anton Paar doté d'un logiciel (instrument X) sur PC.



<i>Paramètres</i>	<i>CR₂ALC</i>	<i>MoAlB</i>
<i>Vitesse de glissement (cm/s)</i>	<i>7</i>	<i>50</i>
<i>Charges normales (N)</i>	<i>5</i>	<i>5</i>
<i>Longueur de glissement (m)</i>	<i>200</i>	<i>2000</i>
<i>Température (°C)</i>	<i>23</i>	<i>23</i>
<i>Humidité (%)</i>	<i>60</i>	<i>60</i>

Tableau 2 : valeur des paramètres de Cr₂ALC et MoAlB

Mesures

Les échantillons et la bille ont été nettoyés à l'aide de l'éthanol et pesés avant et après chaque essai tribologique par une balance de précision de 10^{-4}

Echantillons	Poids avant	Poids après
EP 0%	4,8104	4,8093
EP 1%	5,7327	5,7319
EP2,5%	5,0947	6,0938
EP5%	6,1433	6,1426

Tableau 3 : mesure des échantillons de Cr₂ALC

CHAPITRE : 4

Interprétation

1-Diffractogramme époxy composite Cr₂AlC

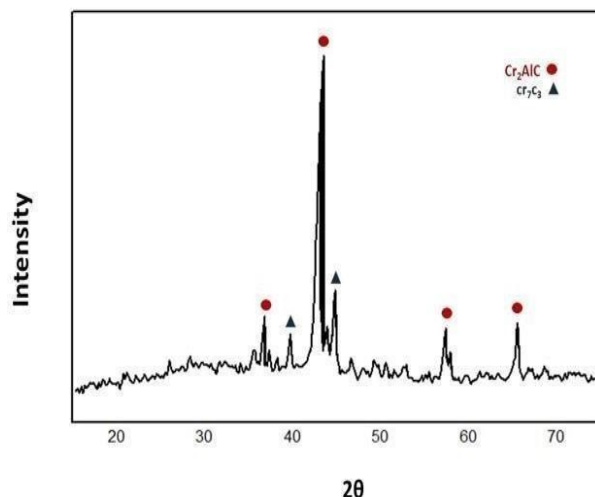


Figure 18 : diffractogramme DRX de la poudre Cr₂AlC

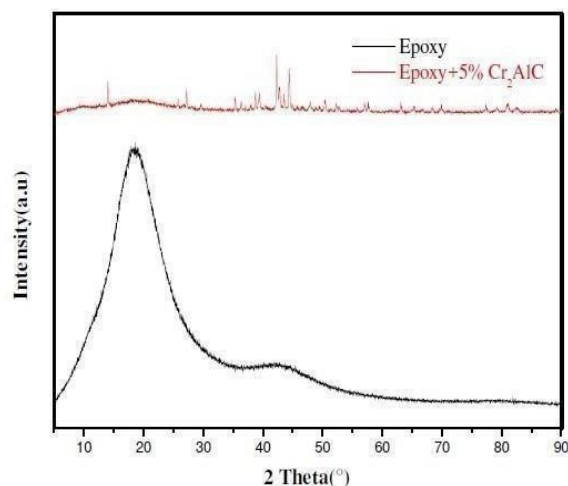
Cette figure représente le diffractogramme DRX de la poudre Cr₂AlC , les pics a 2theta= 42,46° ; 36,49° ; 57,38° et 65,68° sont correspond à la phase Cr₂AlC tandis que les pics a 2theta=39° et 45° correspond à la phase Cr₃C₇ ce qui montre que la phase MAX Cr₂AlC a été synthétisé avec succès .

2- Diffraction des rayons X (DRX)

Le but de cette étude est consulter le comportement à l'usure de composites époxy charges deCr₂AlC.

A partir des profils DRX, les pics à 2Theta 43 °et 45 ° ont montré que les nanoparticules ont été incorporées avec succès dans la matrice de base époxy +5%Cr₂AlC .A partir de ces données, on peut remarquer que les pics aigus n'étaient pas très intense pour la matrice époxy incorporée avec5%.

Les résultats ont indiqué que les propriétés des composites époxy Cr₂AlC étaient meilleures que celle des composites époxy pur.



2 Propriétés tribologiques Composite époxy/Cr₂AlC

2-1 Comportement tribologique des échantillons Composite époxy /Cr₂AlC

D'après les résultats obtenus après le test tribologique on a remarqué que les échantillons ont un différent comportement tribologique sous une charge de 5N avec une vitesse de rotation de 5cm/s. La figure ci-dessous représente la variation de coefficient de frottement en fonction de la distance des échantillons EP0, EP1.0, EP2.5 et EP5.0. D'après cette figure on peut apercevoir que les échantillons EP0 et EP1.0 ont le même comportement sous les conditions cités en dessus, le coefficient de frottement augmente brusquement puis se stabilise à une valeur de 0,6. Les courbes (c) et (d) représentent l'évolution de coefficient de frottement des composites EP2.5 et EP5.0, testés sous les mêmes conditions. A partir de ces résultats on peut remarquer qu'il y a un changement de comportement, Les deux courbes ont présentées une période de rodage plus large à celles des échantillons EP0 et EP1.0. Cette période devient de plus en plus large avec l'augmentation de concentration de Cr₂AlC.

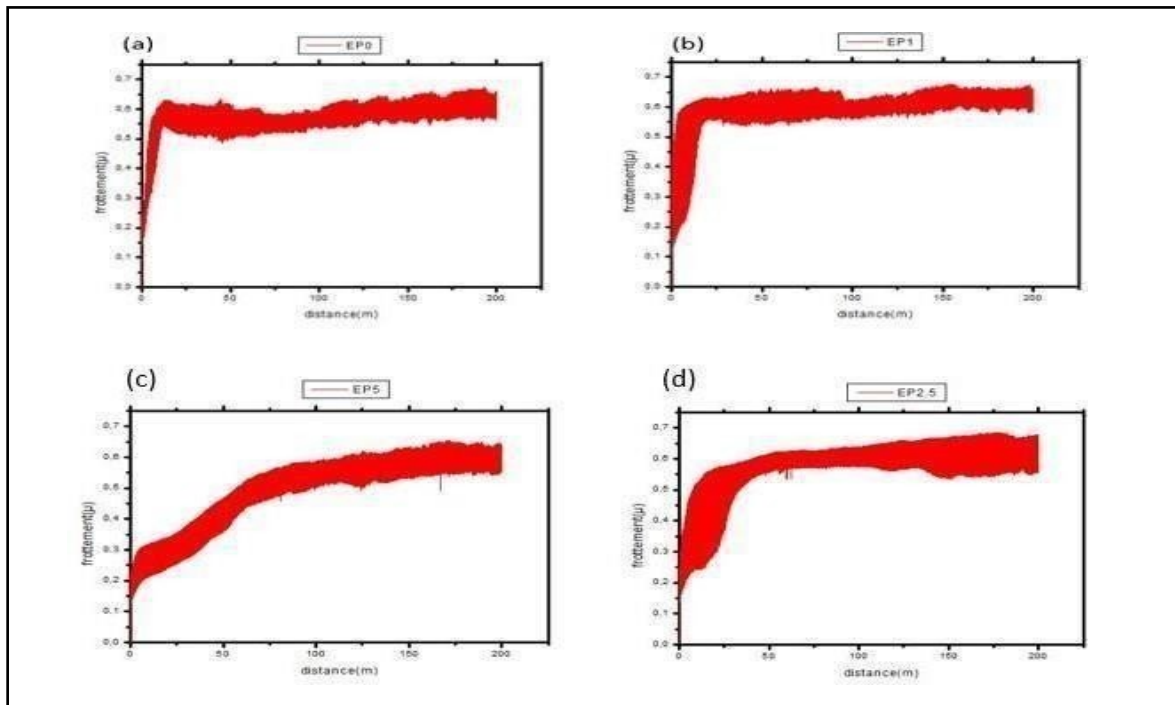


Figure 19 : variation de coefficient de frottement en fonction de la distance des composites (a) EP0 et EP1.0

2-2 La perte de masse

Afin de déterminer la valeur de la perte de masse de chaque échantillon, nous avons réalisé des mesures de la masse avant et après chaque essai tribologique à l'aide d'une balance de précision de 10^{-4} .

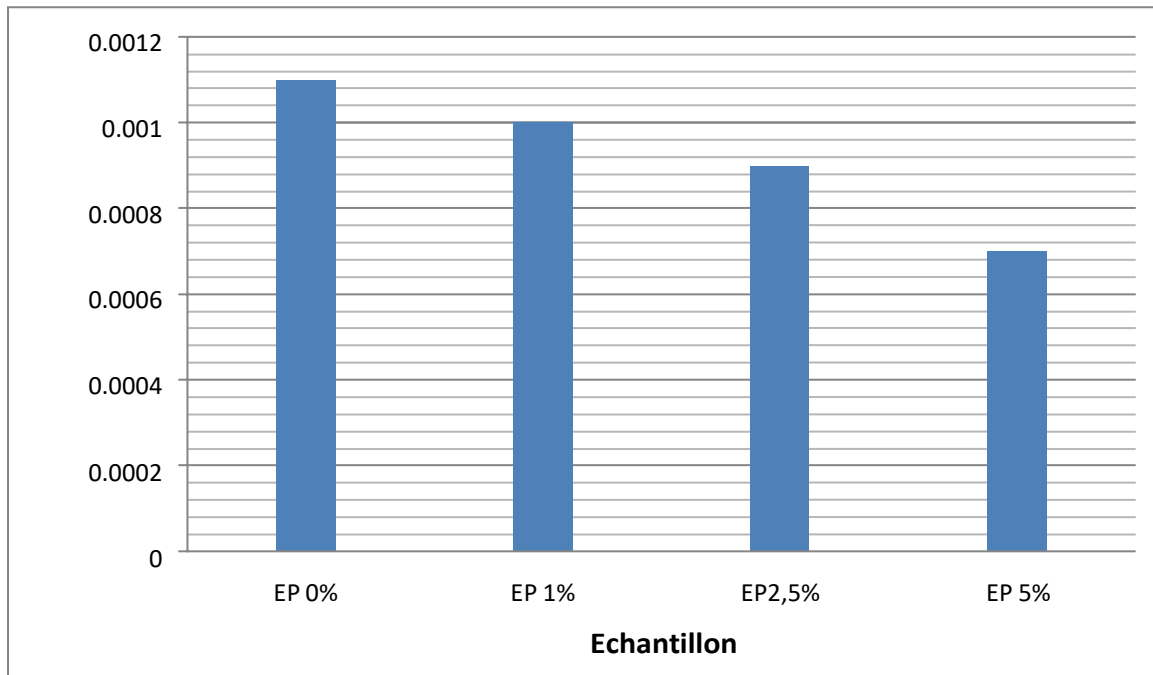


Figure 20 : histogramme du taux d'usure en fonction des échantillons

La figure 20 montre l'historgramme de la perte de masses des échantillons. Une tendance décroissante de la perte de masses des échantillons avec la teneur en particules de phase MAX Cr₂AlC dans la matrice époxy est observée. À cet égard, le taux d'usure de l'échantillon EP5.0 ($0,0007 \cdot 10^{-4}$) est d'environ (63,63%) inférieur à celui de l'échantillon EP0 ($0,0011 \cdot 10^{-4}$). Ces résultats indiquent l'effet positif des particules de phase MAX Cr₂AlC dans l'amélioration de la résistance à l'usure de la matrice époxy.

3- Composite époxy / MoAlB

4-1 Comportement tribologique des composites époxy/MoAlB

La Figure ci-contre représente la variation de coefficient de frottement de l'époxy pur sous une charge de 5N, d'après cette figure on remarque que le coefficient de frottement stabilise à une valeur de 0,6 avec une absence de la période d'adaptation des surfaces de deux antagonistes bille/échantillon.

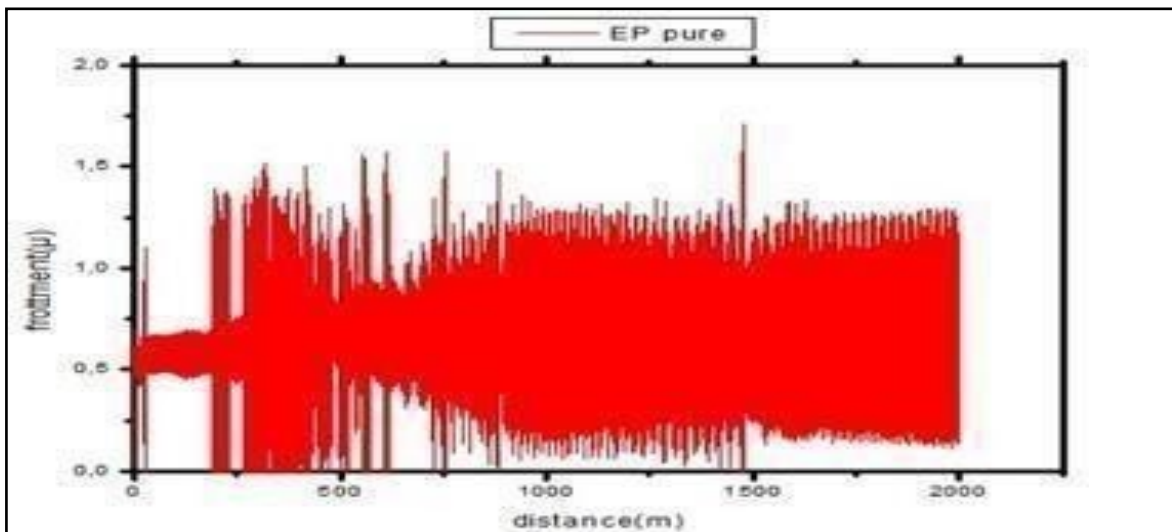


Figure 21 : variation de coefficient de frottement en fonction de la distance del'époxy pur sous une charge de 5N à une vitesse de 50 cm/s

D'après la figure 21 on constate que les composites EP0.5, EP0.75, et EP 1.0 ont un comportement différent, Notre étude d'usure a montré l'existence de trois phases d'usure :

Phase transitoire: phase d'adaptation des surfaces, appelée aussi phase de rodage ou d'incubation.

Phase stationnaire ou régime stabilisé :

Mode d'utilisation normale où la perte de Matière est sensiblement régulière. Dans cette Phase, l'évolution de la perte de matière est quasi linéaire en fonction du temps ;

Phase d'usure catastrophique : accélération de l'usure aboutissant à une mise hors service du composant.

La phase transitoire augmente avec l'augmentation de la concentration en poids de la phase MAB MoAlB. L'échantillon EP0,75 a présenté la phases de rodage la plus importante (environs de 1150m) ce qui a montré l'effet positif de l'incorporation de la phase MAB MoAlB sur les propriétés tribologique de matrice époxy.

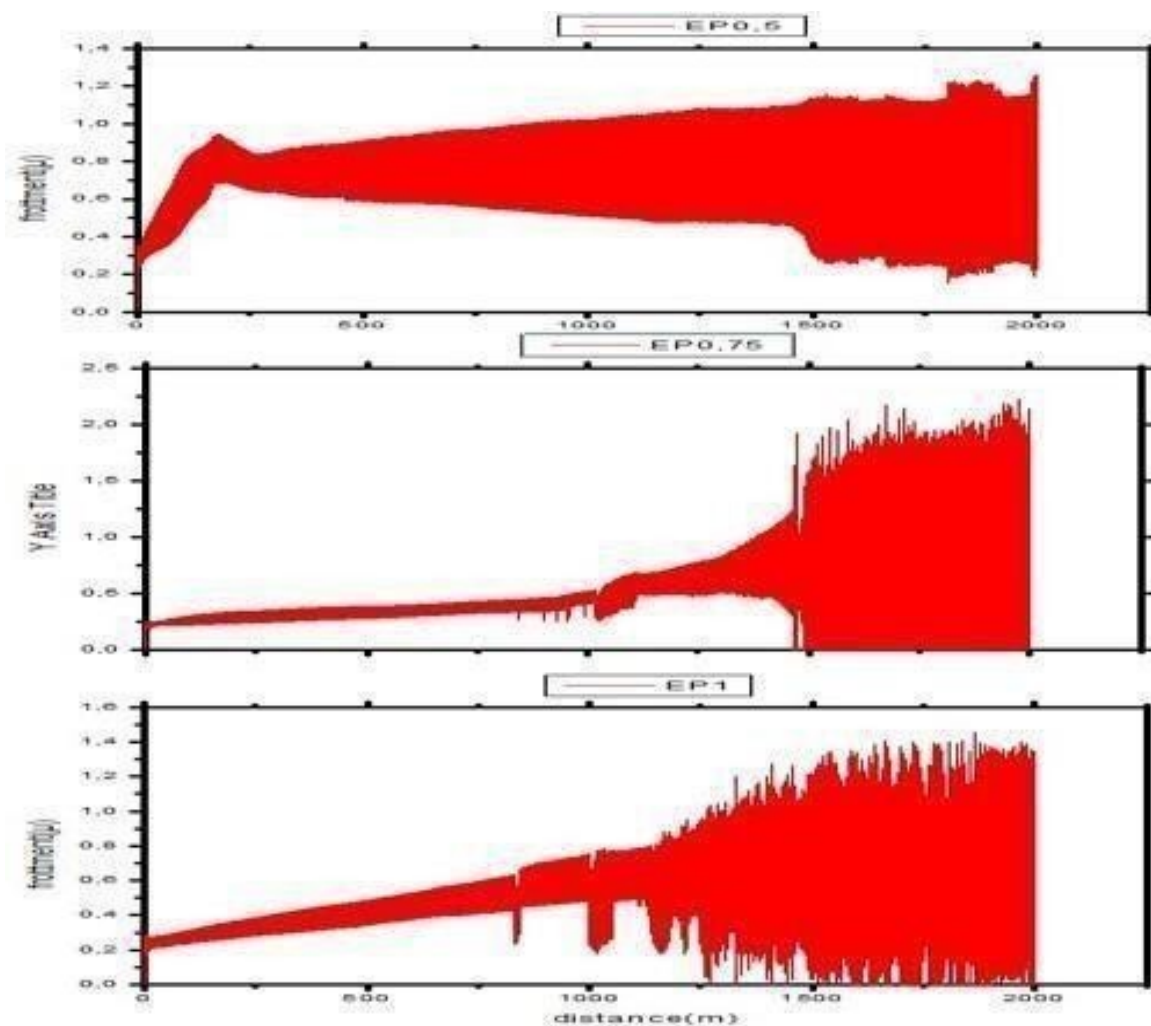


Figure 22 : évolution de coefficient de frottement des composites époxy/MoAlB (EP0,EP0.5, EP0,075 et EP1.0) sous une charge de 5N avec une vitesse de 50 cm/s.

4-2 Perte de masse

La figure 23 représente l'historique de la perte de masses des composites époxy/MoAlB,

L'intégration de la phase MAB MoAlB à faible concentration en poids a conduit à une amélioration importante de la résistance à l'usure où la perte de masse a diminuée de $4,7 \times 10^{-3}$

Pour l'époxy pur à 2×10^{-3} pour l'époxy à 0,75% MoAlB qui a présenté une meilleure résistance à l'usure.

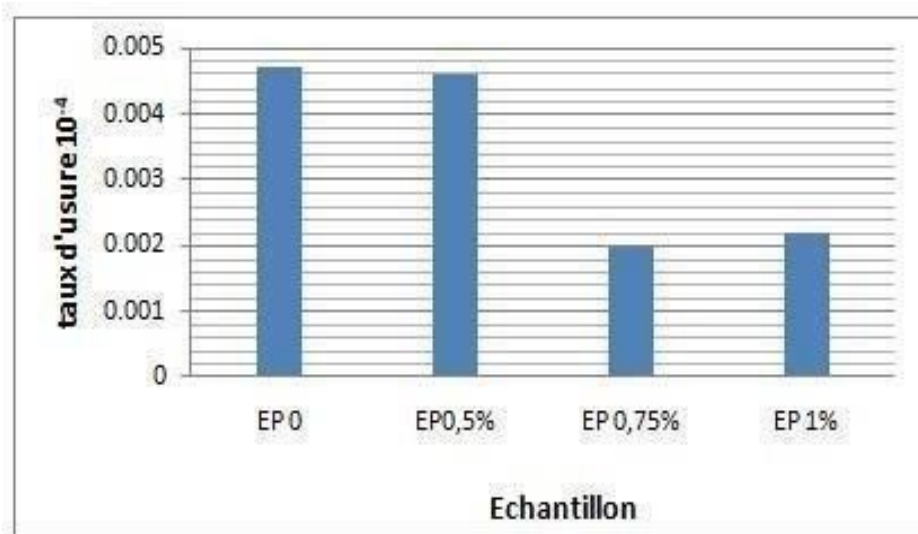


Figure23 : histogramme de la perte de masses en fonction des échantillons des Composites époxy/MoAlB

4- Evaluation de la Dureté :

Pour évaluer la dureté de nos échantillons et s'assurer de l'effet de l'intégration de la phase MAX Cr_2AlC et la phase MAB MoAlB sur la dureté nous avons effectué une série d'essais de dureté Vickers Hv sur la totalité des échantillons étudiés, le Tableau 4 et 5 représente les différentes valeurs de dureté Vickers Hv lors de nos essais pour chaque échantillon. La valeur moyenne a été calculée à partir de trois essais.

Tableau 4 : Les valeurs de la dureté des composites époxy/ Cr_2AlC .

<i>Echantillon Cr_2AlC</i>	<i>Essai 1</i>	<i>Essai 2</i>	<i>Essai 3</i>	<i>Valeur moyenne</i>
<i>EP0</i>	<i>11,03</i>	<i>11,84</i>	<i>12,95</i>	<i>11,94</i>
<i>EP1.0</i>	<i>15,02</i>	<i>14,79</i>	<i>14,08</i>	<i>14,63</i>
<i>EP2.5</i>	<i>15,01</i>	<i>15,94</i>	<i>16,80</i>	<i>15,91</i>
<i>EP5.0</i>	<i>20,99</i>	<i>18,72</i>	<i>18,72</i>	<i>19,47</i>

Tableau 5 : Les valeurs de la dureté des composites époxy/MoAlB

<i>Echantillon MoAlB</i>	<i>Essai 1</i>	<i>Essai 2</i>	<i>Essai 3</i>	<i>Valeur moyenne</i>
<i>EP0</i>	<i>10,34</i>	<i>10,49</i>	<i>10,10</i>	<i>10,31</i>
<i>EP0.5</i>	<i>11,50</i>	<i>11,89</i>	<i>11,90</i>	<i>11,76</i>
<i>EP0.75</i>	<i>12,50</i>	<i>12,10</i>	<i>12,93</i>	<i>12,51</i>
<i>EP1.0</i>	<i>14,42</i>	<i>13,60</i>	<i>13,75</i>	<i>13,92</i>

Les valeurs moyennes de la micro dureté Vickers des composites époxy/ Cr₂AlC et des composites MoAlB sont représentées dans le figure ci-dessous :

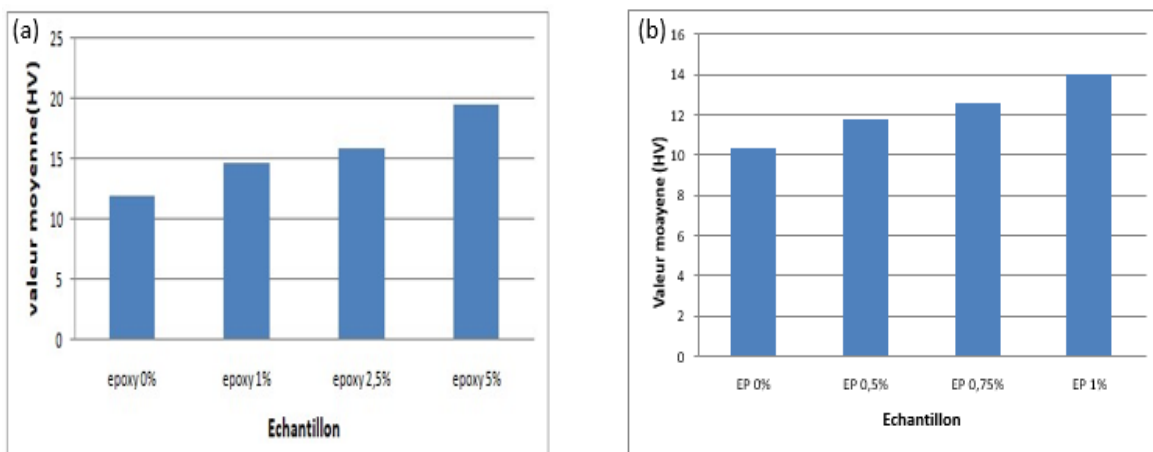


figure 24: histogrammes de l'évolution de la micro dureté Vickers en fonction des échantillons des composites (a) époxy/Cr₂AlC (EP0,EP1.0, EP2.5, EP5.0) et des composites (b)époxy/MoAlB (EP0,EP0.5,EP0,75,EP1.0).

L'essai de la dureté Hv sur le témoin époxy pur nous a permis d'avoir une référence à laquelle on peut comparer les résultats des autres échantillons, il est donc apparent au cours de nos essais que l'intégration de la phase MAX Cr₂AlC et la phase MAB MoAlB ont directement contribué à l'augmentation de la micro-dureté des composites, à partir de là on remarque que plus le pourcentage de poudre de Cr₂AlC et MoAlB dans l'échantillon est élevé, plus il est dur et leurs propriétés mécaniques sont meilleures.

Conclusion général

Ce mémoire se focalise sur la fabrication de poudres de la phase MAX(Cr₂AlC), et de les utiliser avec des poudres de la phases MAB MoAlB pour la fabrication des composites Epoxy avec une étude de leurs comportement tribologique. Les principaux résultats des investigations peuvent être résumés comme suit :

- L'analyse DRX a montré que la poudre de la phase MAX Cr₂AlC et le composite époxy/Cr₂AlC ont été fabriqué avec succès.
- Le renforcement de la résine avec la phase MAX Cr₂AlC a conduit à une amélioration de la dureté ainsi la résistance à l'usure. Le composite EP5.0 a présenté une de dureté élevée avec une résistance à l'usure remarquable.
- L'incorporation de la phase MoAlB à faible concentration dans la résine époxy a conduit a une amélioration surprenante de sa dureté et leur propriétés tribologique. Une amélioration de la dureté a été enregistrée, avec une augmentation de 10,1 pour l'époxy pure à 13,92 Pour l'EP1.0.
- L'échantillon EP0,75 a montré une meilleur résistance à l'usure.

Références bibliographiques

- [1] Teraoka ,polymères solutions , An introduction to physical properties , ED polytechnic University brooklyn New York 2002
- [2] Mouloud Mustapha Etude de la conduction électrique dans les polymères isolants ,Thèse de Doctorat en Electrotechnique ,Université de Tizi –Ouzou ,2010
- [3] CERCLÉ Claire, optimisation du phénomène d'émulsion dans les Mélanges Amidon thermoplastique/polyéthylène, Université de Montréal École Polytechnique de Montréal, mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise ès sciences appliquées, génie chimique, octobre 2009, 33-40.
- [4] Thèse CONTRIBUTION À L'UTILISATION DES POLYMÈRES À MÉMOIRE DE FORME POUR LES STRUCTURES À AMORTISSEMENT CONTRÔLÉ
- [5] Internaute ,peel rodrigo(article),Homopolymere,NEWSLETTERS,2009.
- [6] English book,"POLYMER CHEMISTRY" ,Sebastian Koltzenburg.
- [7] mémoire de MAGISTER, ‘‘introduction aux modélisations et aux méthodes de calcul des matériaux composite ‘‘
- [8] étude des polymères Université PARISXII, 2007
- [9] H-H Kausch et col ‘MATERIAUX POLYMERES ‘ propriétés Mécaniques et physusques traité des materiaux . presses polytechniques et universitaire romande lausanne vol ,2001.
- [10] La commission de nomenclature de l'IUPAC 2010
- [11] :MICHEL FONTANILLE, YVES GNANOU, Chimie et Physico-chimie Des Polymères(cours), 2e et 3e cycles. Dunod, Paris, 4-8, 2005
- [12] Karkanis P.I., Partridge I.K., Attwood D., « *Modeling the Cure of a Commercial Epoxy Resin for Applications in Resin Transfer Moulding* », Polymer International, vol. 41, (1996),pp.183-191.

- [13] Cours de Pr.BENRABAA Rafik(IAP :institut algérien du pétrole),2015.
- [20] V. Dolique, Elaboration et caractérisation structurale de films minces et revêtements deTi₂AlN , Thèse de doctorat de l'université de Poitiers,2007.
- [14] Zinck P., Salmon L., Gérard J.F., « Durabilité d'Interfaces Poly époxyde / Fibre de Verre Eau Sein de Micro composites et de Matériaux Composites Unidirectionnels en Milieu humide », *Micromechanical Modeling Polymer*, vol 42, (2001), pp. 5401-5413.
- [15] Denq B.L., Hu Y.S., Chen L.W., Chiu W.Y., Wu T.R., « *The Curing Reaction and Physical Properties of DGEBA/DETA Epoxy Resin Blended with Propyl Ester Phosphazene* », *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 74, (1999), pp. 229–237.
- [16] BOUDENNE.A, « Etude expérimentale et théorique des propriétés thermo-physiques dematériaux composite à matrice polymère », Université PARISXII, 2003.
- [17] Mémoire de master Mme mohamadi seddika 2013
- [18] Cyril Duquenne, Bogdhan Popescu, Pierre-Yves Tessier, Marie-Paule Besland, Yves Scudeller, Christian Brylinski, Sylvain Delage, M-Abdou Djouadi, Magnetron Sputtering of Aluminium Nitride Thin Films for Thermal Management, *Plasma Processes and Polymers* 4(1),S1- S5 (2007).
- [19] V. Dolique, M. Jaouen, T. Cabioc'h, F. Pailloux , Ph. Guérin et V. Pélosin, Formation of (Ti,Al)N/Ti₂AlN multilayers after annealing of TiN/TiAl(N) multilayers deposited by ion beam sputtering, *Journal of Applied Physics* 103, 083527 (2008).
- [20] Barsoum, M. . *Fundamentals of Ceramics*. (2002).
- [21] A. Bouhemadou, Volume 403, Issue 17, *Physica B: Condensed Matter*, 2008 - Elsevier.
- [22] Synthesis of MXene- Epoxy Nano composites ,Drexel University .
- [23] Thèse de doctorat Adel Haddad ; Traitement thermochimique et comportement TribologiqueDes Phases MAX.
- [24] Source: Tribologie des céramiques, Techniques d'ingénieur.

- [25] Nicolas FILLOT. ETUDE MÉCANIQUE DE L'USURE Modélisation par Discrets des débits de troisième corps solide. , *L'Institut Natl. Des Sci. Appliquées Lyon* (2004).
- [26] Stachowiak, G. W. Materials, Mechanisms and Practice. *Wear* 480
- [27] G. Colin, Les mécanismes de l'usure et du frottement, traitement thermique. 208, 79-86,(1987).
- [28] G. Colin, Les mécanismes de l'usure et du frottement, traitement thermique. 208, 79-86,(1987).
- [29] O. Thaer, Simulation de l'usure et d'avaries sur des dentures d'engrenages cylindriques - Influence sur le comportement statique et dynamique de transmissions par engrenages. Thèse de doctorat, option : Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique (MEGA), Spécialité: Mécanique, (2012).
- [30] H. Werkstofftechnik, Wear and Wear Mechanisms; Tribology. Materials Science & Engineering. Lotharstr 1, 47057 Duisburg, Germany
- [31] J. M. George, Frottement, usure et lubrification. La tribologie où Sciences des surfaces, CNRS Editions ; ISBN10 : 2-212-05823-3, (2000).
- [32] Cornets Et Deville, 1998, « Physique Et Ingénierie Des Surfaces », 1998
- [33] Thèse Propriétés mécaniques de friction et de déformation des surfaces de polymères
- [34] B. J. Briscoe, "Isolated contact stress deformations of polymers; the basis for interpreting polymer tribology", *Tribology International*, 31 (1-3) (1998), 121-126
- [35] Ashby M.F, Jones D.R.H, Matériaux 2. microstructure et mise en œuvre, Dunod, Paris, 1991
- [36] S. Ghosh, R. Dunnigan, M.A. Habib, and S. Gupta, "Novel MAX-Polymer Multifunctional Composites", Proceedings of 40th International Conference & Expo on Advanced Ceramics & Composites (ICACC 2016).
- [37] Mémoire « Influence de certains additifs organiques sur les caractéristiques d'un revêtement à base de zinc élaboré par voie électrochimique » application : « Evaluation de la résistance à la corrosion dans un milieu NaCl à 3 % en poids »

[38] Mémoire ‘ ‘ Préparation et caractérisation des nano-cristallites de TiO₂ Effets des conditions préparatoires ‘

[39] mémoire de « hammache daoud « « Elaboration et caractérisation d’un composite à renfort biodégradable »

[40] Thèse MESURE DE DURETE SUBMICRONIQUE Z INSTRUMENTÉE MÉTHODE ET APPLICATIONS

[41] These Etude de la micro dureté Vickers des poudres chimiques de Ni-P

[42] J. Williams and A.M. Hyncica, Mechanisms of abrasive wear in lubricated contacts. Wear Volume 152, Issue 1, Pages 57-74, 5 January (1992)